

**Döwlet Baýramow**

# **FIZIKA (Molekulýar fizika)**

Aşgabat  
2010

BBK 22.3

T 70

UDK 53

**Baýramow D.**

**T70 Fizika. Molekulýar fizika.** Tehniki ýokary okuw  
mekdepleri üçin okuw kitaby.

Talyplara hödürlenilýän şu okuw kitaby tehniki ýokary okuw mekdeplerinde geçilýän umumy fizika dersiniň okuw maksatnamasyna laýyklykda düzüldi. Gollanma molekulýar fizikanyň we termodinamikanyň, molekulalaryň tizlikleri we energiýasy boýunça paýlanyş kanunlarynyň, geçiş we aýlaw hadysalarynyň, suwuklyklaryň, gaty jisimleriň, mehaniki, garmoniki yrgyldylaryň öwrenilişi we tolkunlar barada düşüňjeleri öz içine alýar.

T 1604010000 (4309000000)-363

ISBN 5-06-001540-8 O D.Baýramow, 2007

BBK 22.3

UDK 53.

## Giriş

Materiýanyň madda görnüşde bar zatdygyny, onuň ýüze çykyşyny, onuň atom-molekulýar gurluşynyň bardygyny öwredýän fizikanyň bölümine molekulýar fizika diýilýär. Bu bölümde materiýanyň madda görnüşde dürli hallardaky ýüze çykmasynyň makroskopik aýratynlyklary, maddanyň bir haldan beýleki hala geçişindaki ýüze çykýan kanunalaýyklygy, maddany düzýän atomlaryň we molekulalaryň hyýallaşdyrylan nusgasyndan onuň barlyk nusgasyna geçmegiň mümkinçilikleri, şol geçişde atomlaryň we molekulalaryň arasyndaky ýüze çykýan güýçleriň ululyklary, olary hasaplamagyň ýollary öwrenilýär. Bu aýdylanlary özleşdirmek üçin molekulýar-kinetik nazaryýetiň esaslaryny, hyýali gazlara degişli molekulýar-kinetik nazaryýetini, hyýali gaz kanunlaryny bilmek zerurdyr.

Durmuşda energiýa, iş, ýylylyk, temperatura, ýylylyk sygymy, sowadyjy abzallar diýilýän düşünjelere gündelik durmuşda gabat gelýäris. Olar bilen iş salyşýarys. Şu düşünjeleriň esasynda ýylylyk, şeýle hem iş ýatýar. Beýle diýildigi ýylylygyň kömegi bilen nähilidir bir işi ýerine yetirmek ýa-da haysydyr bir mehaniki işi ýerine ýetirip, ýylylyk almak zerur diýilidigidir. Umuman ýylylyk hem-de iş bilen baglanyşykly ylma Grek alymlary termodinamika diýip at beripdirler. Diýmek, termodinamika munuň özi gazlaryň, suwuklyklaryň we gaty jisimleriň energiýa, ýylylyk, temperatura bilen baglanyşykly häsiýetlerini, elektrik we magnit hadysalarynda ýylylygyň bölünip çykmasyny ýa-da ýuwudylmasyny, ýylylyk şöhledenmesini öwrenýär. Termodinamikany, onuň esasy kanunlaryny inženerçilik hunärleri boýunça hünärmen taýýarlaýan institutlarda öwrenmek zerurdyr. Energiýanyň saklanmak we öwrülme kanunyny termodinamikanyň birinji başlangyjy, ýylylygyň bir jisimden beýleki bir jisime öz-özünden iş etmezden geçip bilmek mümkinçiliginiň ýokdugyny ikinji başlangyjy

öwredýär. Absolýut nol temperaturada molekulalaryň ýylylyk hereketiniň togtadygyny we temperaturanyň şol bahasyndan aşakda tebigatda hiç hili bahasynyň ýokdugyny üçünji başlangyjy öwredýär. Olary bilmeklik fizikany öwrenýänler üçin gyzykly we zerur bolup durýar.

Molekulýar fizikanyň we termodinamikanyň esaslaryny materiýanyň madda görnüşinde, gaz halynda ýüze çykmasyň kanunalaýyklyklary anyklanylandan soň, gazlaryň we suwuklyklaryň özara biri-birine öwrülişiniň kanunalaýyklygyny, suwuklyklaryň häsiýetini, gaty jisimleriniň suwuklyklara öwrülme kanunalaýyklygyny yzygiderlilikde öwrenmek maksada laýykdyr. Madda materiýanyň ýüze çykmagynyň bir ýerik gutarnykly ölçegde üşürilenligi, jemlenenligi bilen häsiýetlendirilse, meýdan bolsa materiýanyň ýüze çykmasyň giňişlikde üznüksiz ýaýraýanlygy bilen häsiýetlendirilýär. Madda we meýdan materiýanyň iki hili ýüze çykasydyr, onuň tebigi ýagdaýda barlygydyr. Olar özara baglanyşykly. Maddanyň aralykdan bolan özara täsirleri diňe öz döredýän meýdanlarynyň üsti bilen amala aşyrylýanlygy bilen düşündirilýär.

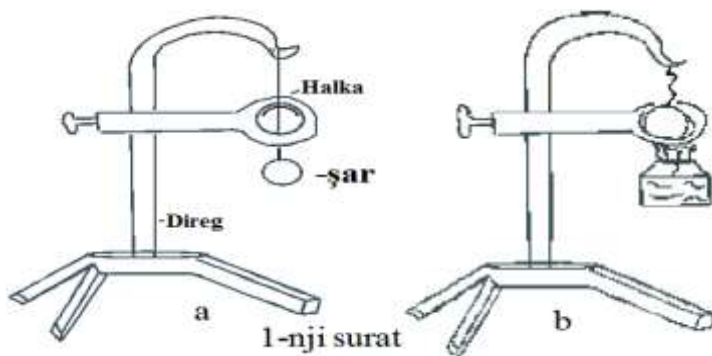
Elektrik meýdanyny elektrik zarýady döredýär. Elektrik zarýady munuň özi matarial göräji bolup madda bilen aýrylmaz baglanyşyklydyr. Öň belläp geçişimiz ýaly jisimler maddadan, onuň fiziki we himiki häsiýetlerini özünde saklap bilýän molekulalardan, olar atomlardan, atomlar ýadrodan we elektronlardan düzülýär. Ýadrony düzýän proton, onuň daşynda dürli halkada (orbitada) aýlanýan elektronlar elektrik zarýadlanandyr. Özem olar tebigatda iň az elektrik zarýadyny göterýärler. Diýmek, elektrik zarýadynyň atomdyr molekulalaryň özara täsir güýjüni ýüze çykarýanlygyny anyklamak we öwrenmek molekulýar fizikada hem zerur bolup durýar. Şu okuw kitabynda mehanika degişli garmoniki yrgyldylar we tolkunlar hem öwrenilýär.

Ýokarda sanalyp gecilen yzygiderlikde molekulýar fizikany we termodinamikany okuw maksatnamasy boýunça öwrenmek göz önünde tutulýar. Onuň üçin molekulýar-kinetik nazaryýeti ýatlalyň. Ol bolsa beýan edilmeli düşüňjeleri çuňňur özleşdirmäge fizika dersini öwrenijilere ýardam berer.

**Molekulyar-kinetik nazaryýet.** Durmuşda gabat gelýän ýönekeýje hadysalara ýüzleneliň. Sowadylýan suw  $0^{\circ}\text{C}$ -da buza öwrülýär, ýagny suwuklyk halyndan gaty hala geçýär. Eger-de buz gyzdrylsa ol  $0^{\circ}\text{C}$ -de ýene-de suwuklyga öwrülip başlaýar, buzuň hemmesi suwuklyga öwrülýança ondaky temperatura üýtgeşsiz galýar. Gyzdymagymyzy dowam etdirsek, suw kem-kemden gaz halyna, ýagny bug halyna geçýär. Şu sereden üç halymyzyň, gaz haly gysylmaga, beyleki ikisi, suwuk we gaty hallary az gysylmaga ukyplydyr. Munuň başga hili däl-de, edil şeýledigine jogap bermek mümkin, ýöne ol jogaba çenli maddalaryň içki gurluşlary hakynda düşüňje bermek we ony öwrenmek maksada laýyk bolsa gerek.

Madda - munyň özi jisimi düzýän köp sanly owunjak bölejiklerden-atomlardan we molekulalardan düzülen material zatdyr. Suw, alýuminiý, demir, howa, duz, kislorod, kömürturşy gazy we ş.m.hemmesi maddadyr. Ondan ýa-da olardan taýýarlanan önümler fiziki jisimdir. Fiziki jisimiň görnüşi (formasy) we käbir göwrümi bar. Edil şu ýerde "Gaz hem öz gezeginde fiziki jisim. Onuň näme formasy barmy" diýilen soragyň ýüze çykmagy mümkin. Elbetde, gaz salnan gabynyň tutuş göwrümini eýelemeklige ukyply. Gabyň görnüşi silindir şekilli bolsa, onuň içindäki gaz molekulalary silindir görnüşi, göwrümi bolsa silindriň göwrümne deň bolar.

Indi, 1-nji suratda görkezilen demir halka we şar alalyň. Şar adaty 1-nji a suratdaky ýagdaýda halkanyň içinden geçip bilýär. Gyzdryylan şary halkadan geçirjek bolanymyzda, şar ondan geçmän, 1-nji b suratda görkezilişi ýaly halkada saklanýar.



Diýmek, şar gyzdrylanda öz göwrümini giňeldipdir, ýagny onuň göwrüm ölçegi ulalypdyr. Halkada duran şary sowatsak belli bir wagtyň geçmegi bilen şaryň ölçegi kiçeler, ýagny göwrümi gysylar. Netijede, şar halkadan ýene-de aşak gaçar. Jisimi gyzdymaga we sowatmaga, deňişlilikde, onuň göwrümini ulaltmaga we kiçeltmäge belli bir wagt gerekligini tejribe görkezýär

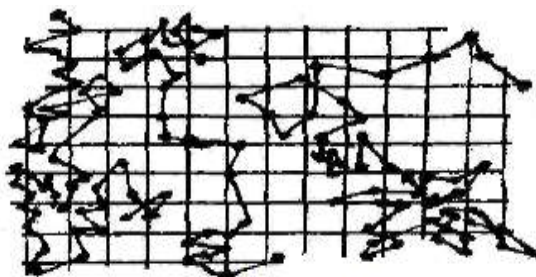
Seredýän şarymyz fiziki jisim. Ol bölejiklerden düzülen maddadan durýar. Diýmek, maddanyň öz içki gurluşy bar. Öz gezeginde maddanyň ol gurluşy aýratyn göze görünmeýän bölejiklerden düzülýär. Ol bölejikleriň ölçegleri juda ujypsyz. Ýöne olar biri-birine deňişip duranoklar-da, olaryň arasynda käbir aralyk bar. Göze görünmeýän bölejikleriň aralyklary jisim gyzdrylanda ulalýar. Netijede, jisimiň göwrümi giňelýär. Jisim sowadylan wagtynda jisimi düzýän bölejikleriň arasy gysylýp jisimiň göwrümi kiçelýär.

Ýokardaky ýatlan, maddany düzýän bölejiklerimize fizikada maddanyň molekulalary diýilýär. Maddanyň molekulalary özara biri-birine meňzeş. Molekulalar maddanyň esasy fiziki we himiki hasiýetlerini özünde saklaýar we oz gezeginde atomdan ýa-da atomlardan düzülýär. Tebigatda bir atomly, iki atomly we köp atomly molekulalar bar. Meselem, wodorodyň molekulasyň, şeýle-de kislorodyň

molekulasynyň iki atomy bar. Atom hem öz gezeginde maddanyň himiki häsiýetini özünde saklaýar.

Molekulýar-kinetik nazaryýet maddalaryň gurluşyny, häsiýetini olary düzýän molekulalaryň hem-de atomlaryň özara täsiri we hereketi bilen düşündirýär we onuň häsiýetini özünde saklaýan iň kiçijik bölejik hökümünde öwrenýär. Bu nazaryýet tejribeler arkaly anyklanyldy we özüniň giňişleýin ösüşine, rus alymy M.W. Lomonosowyň ylmy işlerinden soň eýe boldy. Ol, esasan, gazlaryň häsiýetini düşündirýär. Gaz molekulalarynyň özüni alyp barşyny öwrenýär. Gaz molekulalarynyň bitertip, bulam-bujar (haotik) hereket edýändigine, biri-birine urulýandyklaryna, ýöne özara urluşandan soň biri-biri bilen itekleşýändiglerine göz ýetiripdir. Mundan başga-da, ol, gaz molekulalarynyň tizligi hakynda düşüňjani, maddanyň gyzdyrylmagy netijesinde ýüze çykýan temperaturanyň üýtgemesi bilen düşündiripdir. Ýene-de, temperaturanyň absolýut nol bahasynyň barlygy hakynda ylmy çaklamany öňe sürüpdür. Şeýlelikde, M.W.Lomonosow molekulýar-kinetik nazaryýetiň düýbünü tutyjylaryň esasyalarynyň biridir.

**Broun hereketi.** İňlis alymy Broun 1827-nji ýylda suwuklygy düzýän bölejiklere mikroskopda gözegçilik edip, ol



2-nji surat

bölejikleriň 2-nji suratda görkezilişi ýaly bitertip, bulam-bujar hereket edýänligine göz ýetiripdir, olaryň hereketini öwrenipdir. Bu bölejikler suwuklygyň molekulalary bilen

çaknyşyp özleriniň hereket ugruny we tizliklerini üýtgedipdirler. Şunuň bilen birlikde suwuklygyň molekulalary hem öz tizliklerini ululyklary we ugurlary boýunça üýtgedipdirler. Suwuklyklarda gözegçilik edilýän Broun hereketi gaz molekulalaryna hem mahsusdyr.

**Gazlarda we suwuklyklarda diffuziýa.** Käsä guýlan gaýnan suw alalyň. Onuň ýüzüne gury çay atalyň. Suwuň, gury çay atylan erkin üsti özüniň reňkini üýtgedýär. Soňra suwuň reňkiniň üýtgemegi kem-kemden onuň aşaky gatlaklaryna geçip ugraýar we wagtyň geçmegi bilen çäýiň reňki öz-özünden kasedäki gyzgyn suwuň tutuş göwrümüne ýaýraýar. Edil şunuň ýaly ýagdaýa gazlarda hem düş gelse bolýar. Aýdalyň otagdaky howada ys ýaýrap bilýär. Ysyň ýaýraýyş çaltlygy otagdaky howanyň temperaturasyna bagly. Hadysa ýokary temperaturada ýokary çaltlykda geçýär. Bu hadysa, ýagny gazlaryň we suwuklyklaryň içinde başga bir jisimiň molekulalarynyň ýaýramagyna, has takygy bir jisimiň molekulalarynyň arasyna başga bir jisimiň molekulalarynyň aralaşmak hadysasyna diffuziýa diýilýär.

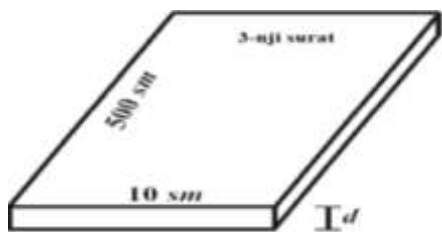
Diffuziýa mahalynda gazlaryň we suwuklyklaryň molekulalarynyň arasyna aralaşan başga bir maddanyň molekulasy hemme tarapa ýaýraýar, ýagny maddanyň molekulalary hemişe hereketdedir. Şeýle garaýyş netijesinde, aýdalyň kümşi düzýän molekulalaryň orta tizligi üçin tejribe üsti bilen alnan alnan netije  $\langle v_{\text{kümüş}} \rangle = 500 \text{ m/s}$  deň bolupdyr.

**Molekulanyň ölçegi.** Hasaplamalara görä,  $1 \text{ sm}^3$  göwrümlü gapdaky bar bolan howa molekulalarynyň her sekuntda 100 milliony şol gapdan çykar ýaly deşik deşilse, ondaky howanyň bar bolan molekulalarynyň hemmesiniň şol gapdan cykmagy ucin 9000 yyl gerek. Bu hasaplama molekulanyň ölçeginiň juda kiçidigine güwä geçýär. 3-nji suratda görkezilen göwrümi  $0,001 \text{ sm}^3$  bolan ýag damjasy suwuň ýüzünde ýaýranda  $5000 \text{ sm}^2$  meýdanda ýuka örtgi



gatlagyny emele getirýär. Örtügiň göwrümi, tutýan meýdany belli. Onda ol örtügiň galyňlygyny hasaplamak mümkin,

$$d = \frac{V}{S} \quad \text{ýa-da} \quad d = \frac{0,001 \text{ sm}^3}{5000 \text{ sm}^2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ sm}.$$



3-nji surat

Suwuň ýüzünde ýaýramakdan alnan ýag örtgüsiniň galyňlygy molekulanyň diametrinden 10 esse uly. Häzirki zaman abzallary molekulanyň diametrini ölçemäge mümkinçilik berýär we onuň daşky görnüşi şar şekilli diýsek, molekulanyň ölçegi, takmynan, aşakdaky ululyga deň bolar:

$$d = 2 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ sm} = 2 \text{ Å (Angestrem)}.$$

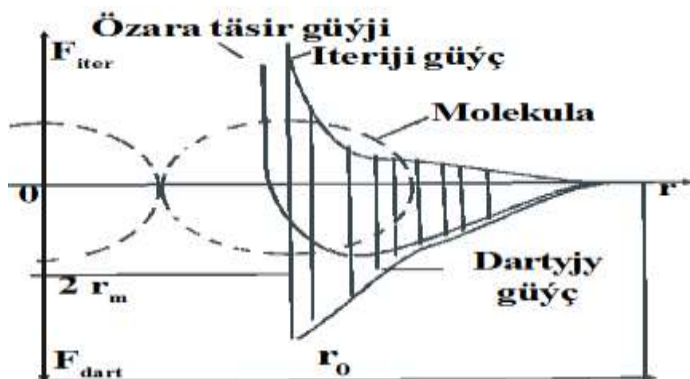
**Molekulanyň massasy.** 1 g massaly suwda ( $\text{H}_2\text{O}$ )  $3,7 \cdot 10^{22}$  sany molekula bar, onda suwuň 1 molekulasyň massasy,  $\frac{1}{3,7 \cdot 10^{22}} = 2,7 \cdot 10^{-23}$  gramma deň bolar. Alnan bu san örän ujypsyz, şonuň üçin hem hasaplamalarda massanyň görälik bahasy ulanylýar. Ony  $M$  harpy bilen belgileýärler. Maddanyň görälik atom massasy  $M$  diýlip, berlen maddanyň atomynyň  $m$  massasynyň uglerod atomynyň massasyna bolan gatnaşygyna aýdylýar, ýagny

$$M = \frac{m}{\frac{1}{12}m_c}.$$

Atomyň massasyny kesgitlemäge mümkinçilik berýän tejribeler bar. Ionlaşan atomyň udel zarýadyny ( $\frac{q}{m}$ ) kesgitleýän, ol gatnaşygyň kömegi bilen atomyň massasyny anyklamaga mümkinçilik berýän abzal bar. Oňa massspektrometr diýilýär.

**Awogadro sany.** Maddanyň mukdar birligi deregine 1 mol alynýar. Mol jisimdäki bar bolan molekulalaryň sanyny görkezýär. 1 mol - uglerodyň 0,012 massasynda näçe sany molekula bar bolsa 1 mol maddanyň mukdarynda hem şonça molekula ýa-da atom bardyr. Diýmek, islendik maddanyň 1 molunda bir deň mukdarda molekulalar, ýagny atomlar bardyr. Maddanyň 1 molundaky atomlaryň sanyny  $N_A$  – bilen belgiläp Awogadro sanyny alarys:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

**Atomlaryň (molekulalaryň) özara täsiri.** Molekulalar (atomlar) özara biri-biri bilen molekulýar dartyş we itekleýiş güýçleriň täsiri bilen baglanyşýarlar. Aşakdaky 4-nji suratda özara täsir edişýän molekulalaryň arasynda ýüze çykýan itekleýji, şonuň ýaly-da dartyjy güýçleriň, olaryň özara aralyklaryna baglylygynyň grafiki şekillendirilen.



4-nji surat

$r_0$  aralykda molekulalaryň özara dartyş güýji ýüze çykýar, oňa molekulýar täsiriň radiusy diýilýär we ol güýç tä  $r_0 > 2r_m$  aralyga çenli molekulalar biri-birine ýakynlaşýança dowam

edýär. Soňra görkezilen çäkden geçip juda golaýlaşanlarynda molekulalaryň arasyndaky dartys güýji kiçelip-kiçelip, ahyrda ýitýär. Olaryň soňraky ýakynlaşmasynda özara itekleşýän, biri-birini özara daşlaşdyrýan güýç ýüze çykýar.

Icki özara itgi güýji molekulalaryň  $2r_m=d$  aralykdan kiçi aralyga süýsmekligine, ýagny ýakynlaşmaklygyna mümkinçilik bermeyär.

Dartyjy we iteriji güýçleriň, molekulalaryň arasynda ýüze çykmasyna molekulalardan düzülen maddanyň gysylýan we giňelýän mahalynda maýyşgak güýçleriň ýüze çykýandygy bilen düşündirilýär.

**Hyýaly gazlar we olaryň häsiýeti.** Tebigatda bar, Mendeleýewiň jedwelinde bolan gazlara hakyky gazlar diýilýär. Olaryň häsiýetlerini, özlerini alyp baryşlaryny fiziki nukdaý nazardan öwrenmelik zerur. Onuň üçin olaryň häsiýetlerini kem-käs özlerinde jemlap biljek diýilip hasap edilýän hyýaly gazlara degişli kanunlar öwrenilýär.

Hyýaly gaz diýlende molekulalarynyň ölçegi ýok, olaryň öz aralarynda itekleýji we dartyjy güýçleri bolmaýan, aralykdan tasir edişmeýän gaz, gazlaryň molekulalaryny göz önüne getirmegi başarmaly. Hyýaly gaz hakyndaky şeýle düşüňjani girizmek bilen biz hakyky gaz molekulalary bilen baglanyşykly bolan meseleleri, şeýle hem hakyky gazyň molekulasyň häsiýetine we özüni alyp barşyna degişli meseleleri öwrenmegi, meseleleriň dogry çözgüdini tapmagy sadalaşdyrýars.

Berlen göwrümdäki hakyky gazyň molekulalarynyň umumy sanyny azaltsak, göwrümdäki galan hakyky gazyň molekulalary özlerini edil hyýaly gazyň molekulalary ýaly alyp barýarlar. Gaz molekulalarynyň seýreklandirilişi güýçli boldugyça, berlen göwrümde hakyky gazyň molekulalarynyň biri-birine görä özara aralyklary ulalýar.

**Gözegçiligiň statistik we termodinamik usullary.** Molekulýar-kinetik nazaryýetde jisimiň aýratynlygyny,

tejribelerden gelip çykýan netijeleriň esasynda, onuň molekulalarynyň jemlenen täsiri hökmünde kabul etmeklik göz önünde tutulýar. Munuň üçin köplenç statistik usul giňden ulanylýar, çünki şeýle usulda aýratyn alnan molekulalaryň özüni alyp barşyna seretmegiň zerurlygy aradan aýrylýar. Gözegçi şeýle usuly ulananda köp mukdarda toplanan bölejikler bilen iş salyşýar. Ol bölejikleriň her biriniň hereketini nusgawy mehanikanyň kanunlary bilen düşündirmek mümkin. Ýöne olaryň hereketi tötänleýin hadysa bolup, molekulalaryň özara, ýa-da salnan gabynyň diwarlaryna bolan urgulary ähtimallyk nazaryýetiniň kanunlaryna boýun egýän bolmaly. Şonda, molekulalaryň, atomlaryň toplumynyň özüni alyp barşyny öwrenmek üçin statistikanyň düzgünlerini ulanmak mümkin bolar.

Umuman, hereketdäki bölejigiň käbir wagtdaky koordinatasy we tizligi anyk bolsa, onda berlen ulgamdaky molekulanyň islendik wagtdaky koordinatasyny we tizligini dinamiki usuly ulanyp kesgitlemek mümkin. Bölejikleriň hereketi ýylylyk bilen baglanyşan bolsa, onda ol ulgamdaky bölejikleriň makroskopik hasiýetnamalaryny özara baglanyşdyrýan parametrlerini kesgitlemekde termodinamiki usul ulanylýar. Öwrenilýän hadysanyň içki baglanyşygy termodinamiki usulda seredilmeýär. Termodinamik netije hökmünde tebigatyň umumy kanunlary, ýagny başlangyçlar esas edilip alynýar. Termodinamikanyň başlangyçlary sözli deňşdirmelerde esaslandyrylmaýar. Olar adamzadyň tejribesiniň umumlaşdyrylmasy we adamyň iş ýüzündäki işeňňirliги bilen tassyklanylmalýdyr. Bu usul maddanyň dürli häsiýetleriniň gatnaşygyny belli edýär. Ýöne muňa garamazdan ol gatnaşyklaryň mukdar mümkinçiligini ol usulyň häsiýetlendirip bilmeýänligini onuň ýetmezçiligi hökümünde alsa bolar. Şeýle hem bu usul hal deňlemesini tapmaga mümkinçilik bermeýär. Muňa garamazdan maddanyň bir häsiýetini tejribe usuly bilen anyklap ýatladylan

kynçylyklary ol usula esaslanyp ýeňip geçmek mümkinçiliginiň barlygyny hem ýatlamalydyrys.

**Termodinamiki ululyklar.** Gaba salnan gazyň molekulalary gabyň diwaryna urulýarlar. Ol urgy, gabyň diwaryna basyşy ýüze çykarýar, çünki olar gabyň diwaryna urulmak bilen şol gabyň diwaryna käbir güýç bilen täsir edýärler. Beýle diydigimiz  $\Delta t$  wagtyň dowamynda her bir molekula diwara özüne degişli  $F$ - güýç bilen täsir edip, şol güýje proporsional kesgitli impulsy diwara berýär. Kabir impulsa eýe bolan diwar deformirlenýär. Deformasiýa maýyşgak häsiýete eýe bolanlygy üçin, diwar öz öňki durkuny dikeldende urulýan molekula garşylaýyn ugrukdyrylan impuls berip, molekulany yzyna itekleýär. Gaz gyzdryylan ýagdaýynda onuň molekulalarynyň hereket tizligi artýar. Munuň özi, molekulalaryň hereket tizliginiň artmagy bilen olaryň gabyň diwaryna bolan urgulary mukdar taýdan artýar diýiligidir. Netijede, molekulanyň urgusynyň ululygy, ýagny diwara bolan täsir güýji ulalýar. Diýmek, gaz molekulalary gyzdrylanda olaryň temperaturasy we tizligi artýar, urgunyň mukdary köpeliýär, güýç ulalýar, diwara molekulalar tarapyndan bolan basyş ulalýar. Bularyň hemmesi gazyň hemişelik göwrümünde bolup geciýär.

Netijede, gaz molekulalarynyň halyny kesgitlemek üçin esasan üç ululyk: basyş  $P$ , göwrüm  $V$ , temperatura  $T$  ulanylýar. Şu üç ululygyň biriniň üýtgemegi beýleki ikisiniň üýtgemegine getirýär. Köp halatda şu üç ululygyň haýsy hem bolsa biri hemişelik galyp beýleki ikisi özara üýtgändäki ýagdaýynda duş gelinýär, we şeýle hal bilen baglanyşykly meseleleri öwrenmek gyzyklydyr.

**Deňagramlylyk haly we hadysalary, olaryň termodinamiki diagrammalarda aňladylyşy** – Ulgamyň (jisimiň) deňagramlylykda bolmagy üçin ol ulgamyň (jisimiň) hemme ýerinde ulgama degişli ýokarky sanan ululyklarymyz juda uzak wagtda dowamynda hemişelik saklanmalydyrlar.

Ýokarda ýatladan ululyklarymyza ulgamyň (jisimiň) dykzlygyny hem goşmak gerek. Ol ululyklara gysgajyk häsiýetnama bereliň:

a. Dykzlyk-göwrüm birligindaki massa, ýagny maddanyň mukdary, ýa-da  $\rho = \frac{m}{V}$ ; *HU*-da birligi  $[\rho] = 1 \text{ kg/m}^3$ .

b. Basyş - gazyň molekulalarynyň salnan gabynyň diwaryna edýän urgularyny häsiýetlendirýän, gabyň meýdan birligine perpendikulýar täsir edýän güýje san taýdan deň bolan fiziki ululykdyr. Ol  $P$  harpy bilen belgilenýär we  $P = \frac{F}{S}$  formula bilen kesgitlenýär. *HU*-da ölçeg birligi  $[\rho] = 1 \frac{N}{m^2} = 1 \text{ Paskal}$ .

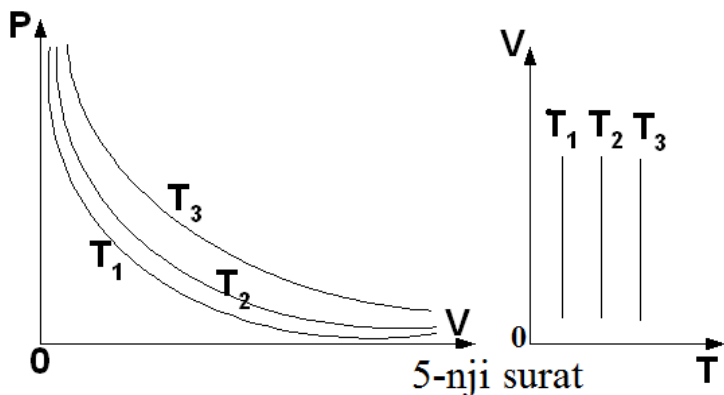
ç. Ulgamda (jisimde) temperaturalar tapawudy bilen häsiýetlendirilýän ölçeg ululygyna ýylylyk deňagramlylygynyň bozulmagy diýip düşüňäris. Empirik  $t$  we absolyut  $T$  temperaturalar bar. Olar özara biri-biri bilen,  $T = t + 273,15$  formula arkaly baglanyşdyrylýar.

Üç esasy ululyklar - basyş  $P$ , absolyut temperatura  $T$  we göwrüm  $V$ - özbaşdak baglanyşyksyz ululyklardyr. Olar hal deňlemesi diýlip atlandyrylýan deňleme bilen baglanyşýandyr, ýagny  $f(P, V, T) = 0$ . Ululyklaryň haýsy hem bolsa birine görä şu deňleme çözülse ol deňlemäniň hususy hallaryny alarys, ýagny:  $V = f(P, T)$ ,  $P = f(V, T)$ ;  $T = f(V, P)$ .

**Boýluň-Mariottanyň kanuny.** Aýdalyň, berlen gapdaky üýtgemeyän  $m$  massaly gazyň temperaturasy  $T = \text{const}$ , beýleki iki ululyk basyş  $P$  we göwrüm  $V$ , deňişlikde, üýtgeýär diýeliň. Temperaturanyň üýtgewsiz geçmesine izotermiki hadysa diýilýär. Umuman fizikada, ýagny molekulýar fizikada we termodinamikada ululyklaryň biri-birine bolan baglanyşygyny häsiýetlendirmek üçin  $PV$ ,  $VT$ ,  $PT$  - diagrammalar giňden peýdalanylýar.

Izotermiki hadysany öwrenmek üçin 5-nji suratda görkezilen  $PV$  (we  $VT$ ) - diagrammadan peýdalanylýň. Dik

okda gazyň gabyň diwaryna edýän basyşynyň ululygyny, kese okda gazyň salnan gabynyň göwrüminiň üýtgeýşini aňladalyň.



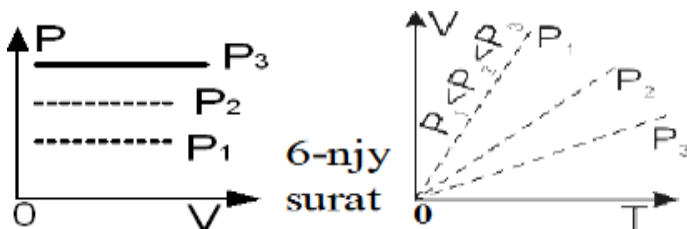
Geçirilýän tejribäniň netijesinde, hemişelik temperaturada gazyň basyşynyň ulalmagyndan onuň göwrüminiň kiçelýändigine ýa-da tersine, gazyň basyşynyň kiçelmegi netijesinde onuň göwrüminiň ulalýandygyna göz ýetirmek mümkin. Şeýle-de, gazyň islendik ýagdaýda, onuň basyşynyň göwrümine köpeltmek hasylynyň hemişelik ululykdygyna göz ýetirmek kyn däl. Onda, bu baglanyşygy  $P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = P_3 \cdot V_3 = \dots = P_n \cdot V_n = \text{const}$  görnüşinde aňlatmak bolar. Alnan formulanyň okalyşy: üýtgameýän  $m$  massaly gazyň islendik ýagdaýy (haly) üçin onuň basyşynyň degişli göwrümine köpeltmek hasyly ( $PV = \text{const}$ ) hemişelik ululykdyr. Munuň şeýledigine, suwuklykly manometri gazyň salnan gaby bilen birikdirip, tejribe üsti bilen göz ýetirmek bolýar. Bu baglanyşygy grafikde aňladanymyzda her bir hemişelik temperaturada olaryň özlerine degişli çyzygy - parabolany alarys (ýokardaky 5-nji surata seret).

**Gey-Lýussagyň kanuny.** Berlen gapdaky üýtgameýän  $m$  massaly gazyň, ýagny onuň salnan gabyndaky basyşy  $P = \text{const}$  hemişelik. Beýleki iki ululyk, göwrüm  $V$  we

temperatura  $T$  üýtgeýärler. Hadysa hemişelik basyşda geçse, oňa izobarik hadysa diýilýär.

Göwrümiň we temperaturanyň biri-birine baglanyşykly üýtgeýänligine tejribeleriň netijesinde göz ýetirmek mümkin. Hakykatdan hem, hemişelik basyşda gazyň berlen massasy üçin islendik ýagdaýda onuň göwrüminiň temperatura bolan gatnaşygynyň hemişelik ululykdygyny hasaplamalar üsti bilen hem alyp bolýar:  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} = \dots = \frac{V_n}{T_n} = \text{const}$ . Onda, gazyň islendik ýagdaýy üçin  $\frac{V}{T} = \text{const}$  formulany alarys.

Hemişelik basyşda geçýän hadysany grafik usulda aňlatmaklyk üçin 6-njy suratda görkezilen  $VT$  – diagrammany alalyň. Dik okda  $V$  göwrümi, kese okda  $T$  temperaturany ýerleşdireliň. Bu hadysada göwrümiň we temperaturanyň özara baglanyşygy göni çyzygy berýär, çünki alnan  $\frac{V}{T}$  gatnaşyk çyzykly funksiýadyr. Her çyzyga degişli basyş bolup, olar biri-birinden tapawutlanýar, ýagny  $P_1 < P_2 < P_3$ .

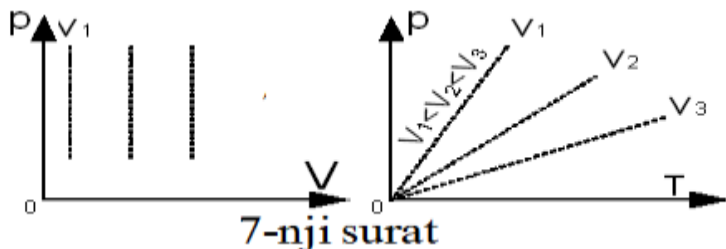


**Şarlyň kanuny.** Goý, berlen gapdaky üýtgemeyän massaly gazyň göwrümi  $V = \text{const}$  bolsun. Beýleki iki ululyk, basyş  $P$  we temperatura  $T$ , özara, deňişlilikde üýtgeýär. Tejribeleriň netijesinde gazyň, ýagny onuň gapdaky basyşynyň üýtgemeginiň temperaturanyň üýtgemegine göni baglanyşykdygyna göz ýetirmek mümkin. Dogrudan hem, basyşyň üýtgemeginiň gazyň temperaturasyna bolan gatnaşygynyň, üýtgemeyän  $m$  massaly şol gazyň islendik ýagdaýy üçin, hemişelikdigini hasaplamalar üsti bilen alarys, ýagny,



$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3} = \dots = \frac{P_n}{T_n} = \text{const}, \text{ ýa-da } \frac{P}{T} = \text{const}.$$

Hadysa hemişelik göwrümde geçse oňa izohorik hadysa diýilýär. Bu hadysany grafikde aňlatmak üçin 7-nji



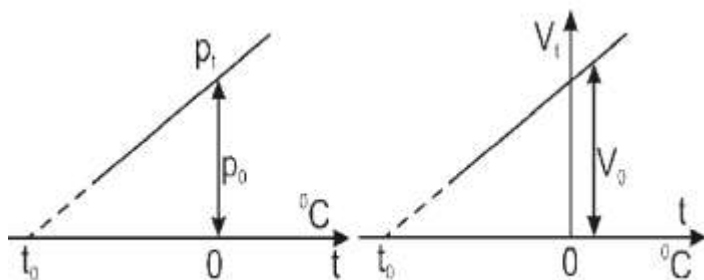
suratda görkezilen  $PT$  diagrammany alalyň. Dik okda  $P$  basyşy, kese okda  $T$  temperaturany ýerleşdireliň. Her çyzyga deňişli göwrüm bar. Olar biri-birinden tapawutlanýar, ýagny  $V_1 < V_2 < V_3$ .

Ýokardaky öwrenen hadysalarymyzdaky kanunalaýyklyklara, deňişlilikde, Boýl-Mariottyň, Geý-Lýussagyň we Şarlyň kanunlary diýilýär.

**Absolýut nol temperatura hakynda düşünje.** Geý-Lýussagyň kanunynda basyş hemişelik bolan ýagdaýynda, Şarlyň kanunynda göwrüm hemişelik bolanda, göwrümiň we basyşyň ol hadysalardaky deňişlilikdäki üýtgemelerini aşakdaky ýaly ýazarys:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t) \quad \text{we} \quad P_t = P_0(1 + \alpha t).$$

Göwrümiň we basyşyň Selsiýniň şkalasyndaky temperatura bolan baglanyşygyny grafiğiň üsti bilen aňlatsak, deňişlilikde, hemişelik göwrümdäki we hemişelik basyşdaky hadysalaryň çyzykly baglanyşyk esasynda 8-nji suratda görkezilişi ýaly aňladylyşyny alarys. Onda dik okuň 0-dan sag tarapyna temperaturanyň üýtmesiniň položitel bahalaryny, 0-dan cep tarapyna otrisatel bahalaryny goýup deňişli grafikler alarys.



8-nji surat

Göwrümiň we basyşyň temperatura baglylykdaky ýazylan formulalarynda  $\alpha$  ululyga göwrümine giňelmek koeffisiýenti diýilýär we onuň san bahasy  $\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ grad}^{-1}$  deň.

Ýokardaky alnan grafikleriň ikisinde hem göwrümiň we basyşyň ululygy temperaturanyň Selsiýniň şkalasy boýunça üýtgemesiniň käbir otrisatel bahasynda 0-a deň, ýagny  $V_t = 0$  we  $P_t = 0$ . Bulary göwrümiň we basyşyň temperature baglylykdaky üýtgeme formulasyna goýup alarys:

$$0 = V_0(1 + \alpha t_0), \text{ şeýle hem } 0 = P_0(1 + \alpha t_0).$$

Alnan formuladaky başlangyç göwrüm  $V_0$  we başlangyç basyş  $P_0$  nola deň däldir, ýagny  $V_0 \neq 0$ ,  $P_0 \neq 0$ . Onda, alnan iki deňlemäniň sag tarapyndaky ýaýyň içi nola deň bolar, ýagny  $1 + \alpha t_0 = 0$ . Diýmek,  $\alpha$ -nyň san bahasyny ýerine goýup alarys.  $1 + \frac{t_0}{273,15} = 0$  ýa-da  $\frac{1}{273,15} t_0 = -1$ . Alnan aňlatmadan  $t_0$  taparys,  $t_0 = -273,15^\circ\text{C}$ .

Diýmek, gazyň göwrümi we basyşy Selsiýniň şkalasy boýunça aňladylan temperaturanyň  $-273,15^\circ\text{C}$  bahasynda nola deňdirler. Şu alnan  $-273,15^\circ\text{C}$  temperaturadan aşak temperatura tebigatda ýok. Sebäbi şol temperaturada  $t_0 = -273,15^\circ\text{C}$ , ýa-da şoňa çenli temperaturalarda gaz molekulalary gaz halyndan suwuklyk halyna ýa-da gaty halyna geçip ýetişýärler. Netijede,  $t_0 = -273,15^\circ\text{C}$  temperaturada molekulalaryň ýylylyk hereketi togtayar. Diýmek,

molekulalaryň ýylylyk hereketi togtayan halyna ýokarky alnan formulalar maddanyň gaz halyna ulanarlyksyz ýagdaýa geçýär. Olary suwuklyk we gaty jisimler üçin ulanmak mümkin.

Selsiýniň şkalasy boýunça temperaturanyň  $t_0 = -273,15^\circ\text{C}$  bahasyna temperaturanyň absolýut nol bahasy diýilýär. Temperaturanyň bu bahasy  $T=0$ -bilen belgilenýär. Bu temperatura ýetmek mümkin däl-de oňa ýakynlaşan bahalary almak mümkin. Ýöne şu temperaturada molekulalaryň ýylylyk hereketi togtasa-da, atomlaryň elektronlaryň, protonlaryň, neýtronlaryň atomyň içindäki hereketi togtamaýar. Mareriya elmydama hereketdedir, sebabi  $T = 0$  K-de hem maddalary düzýän bölejikleriň yrtdydy hereketi togtamaýar. Bu barada kwant mehanikasynda yetirlik maglumaty tapyp bolýar.

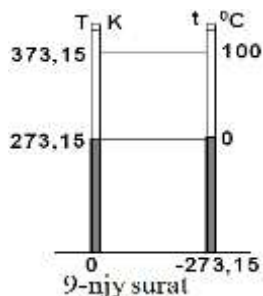
İňlis fizigi Kelwin temperaturanyň absolýut bahasy üçin Selsiýniň şkalasy bilen baglanyşykly bolan 9-njy suratda görkezilen täze şkalany öňe sürdi.

Ol şkala boýunça temperaturanyň absolýut nol bahasyny aşakdaky ýaly aňladyp bolýar:  $T = t + 273,15$ .

### **Maddanyň dykzlygy.**

Maddanyň dykzlygy diýip, göwrüm birligindäki maddanyň massasyna aýdylýar we  $\rho = \frac{m}{V}$ -harpy bilen belgilenýär,  $\rho = \frac{m}{V}$  formula bilen aňladylýar.

Ýokardaky öwrenen hadysalarymyzda hemişelik massaly gaz gysylmaga we giňelmäge sezewar edilýärdi. Diýmek, gazyň göwrümi ýa-da basyşy üýtgeýär. Dykzlygyň formulasyndan görnüşi ýaly, gazyň salnan gabynyň göwrümi üýtgände onuň dykzlygy hem üýtgeýär. Eger-de temperaturanyň  $T = \text{const}$  ( $t = \text{const}$ ) hemişelik bahasynda aýdalyň gazyň dykzlygy  $\rho_1$ , degişlilikde, gowrumi  $V_1$  basyşy  $P_1$  bolsa, onda  $\rho_1 = \frac{m}{V_1}$ .  $P$ -niň



we  $V$ -niň käbir üýtgemelerinde gazyň, degişlilikdäki dykzylygy  $\rho_2 = \frac{m}{V_2}$ . Onda, alnan aňlatmalary deňleşdirip aşakdaky ýaly gatnaşyk alarys:

$$m = \rho_1 V_1 \text{ we } m = \rho_2 V_2 \text{ ýa-da } \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_2}.$$

Hemişelik temperaturada üýtgemeyän  $m$  massaly gazyň dykzylygy göwrümiň üýtgemegine ters proporsionaldyr:

$$\rho_1 = \rho_2 \frac{V_2}{V_1} \text{ ýa-da } \rho_2 = \rho_1 \frac{V_1}{V_2}.$$

Hemişelik temperaturada göwrüm we basyş özara ters proporsionallykda üýtgeýär,

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2}, \text{ onda } \frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

Alnan formuladan görnüşi ýaly hemişelik temperaturada üýtgemeyän  $m$  massaly gazyň dykzylygy basyşa göni proporsional ekeni.

**Hyýaly gaz halynyň deňlemesi.** Gazyň hemme  $P$ ,  $V$ ,  $T$  ululyklarynyň üýtgemesini öz içine alýan aňltma hyýaly gaz halynyň deňlemesi diýilýär.

Ýokarda sereden izoproseslerimizde üç ululygyň biri hemişelik galyp, beýleki ikisi üýtgeýärdi. Ýöne, tebigatda käbir halatlarda gazyň üç ululygynyň üýtgeýän halyna hem gabat gelinýär.

Goý, gazyň iki haly üçin şol üç ululyk aşakdaky bahalara eýe bolsun, başda  $P_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$ , soňunda  $P_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ . Gazy başda üýtgemeyän hemişelik basyşda gysmak bilen birinji haldan aralyk hala  $T_1$ ,-den  $T_2$ , cenli gyzdymak bilen geçireliň. Onda gazyň ululyklary, degişlilikde  $T_1, V_1 \frac{1 + \alpha t_2}{1 + \alpha t_1}, T_2$  bolar. Soňra, gazy izoterma prosesine sezewar edip soňky halyna geçireliň. Soňky halyna geçen gazyň ululyklary, degişlilikde  $P_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$  bolar. Diýmek ahyrky  $P_2$ ,  $V_2$ ,  $T_2$  halyna hemişelik temperaturada geçende Boýl-Mariottýň kanunyna boýun egýär, onda,

$$\frac{P_1 V_1}{1 + \alpha t_1} (1 + \alpha t_2) = P_2 T_2 \text{ ýa-da } \frac{P_1 V_1}{1 + \alpha t_1} = \frac{P_2 V_2}{1 + \alpha t_2}.$$

Alnan deňleme m massaly gazyň islendik haly üçin dogrudyr we hemişelik ululyga deňdir. Onda m massaly gazyň islendik haly üçin ol formulany aşakdaky ýaly ýazyp bileris,

$$\frac{PV}{1+\alpha t} = const.$$

Basyşyň göwrüme köpeldilmek hasylynyň  $1+\alpha t$  ululyga bolan gatnaşygy hemişelik ululykdyr.

**Klapeýronyň deňlemesi.** Gazyň iki haly üçin ýazan deňlemämizi absolýut temperaturanyň üsti bilen aňladyp aşakdaky ýaly ýazyp bileris:  $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$ .

Alnan formula m massaly gazyň islendik haly üçin dogrudyr,  $\frac{PV}{T} = const$ . Alnan bu aňlatma hyýaly gaz halynyň birleşdirilen deňlemesi diýip at berilýär ýa-da Klapeýronyň deňlemesi diýilýär.

Indi, alnan deňlemäni adaty şertde bolan hyýaly gazyň 1 moly üçin ýazalyň. Adaty şertlerde  $V=22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$ ,  $P_0=101325 \text{ Pa}$ ,  $T_0=273,15 \text{ K}$ , onda  $\frac{PV_m}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0} = R$  – uniwersal gaz hemişeligi,  $V_m$  - adaty şertde gazyň molýar göwrümi. Molýar göwrüm  $V_m$  molekulalaryň sanynyň üsti bilen aňladylýar. Gazyň erkin göwrümi üçin:  $V = \nu V_m$ . Onda:

$$\frac{PV_m}{T} = \frac{P}{V} \cdot \frac{V}{\nu} = const = R,$$

bu ýerde  $\nu = \frac{m}{\mu}$  - bir moldaky molekulalaryň sany,  $m$  – bir mol molekulanyň massasy,  $\mu$  – gazyň molýar massasy.

**Mendeleyew-Klapeýronyň deňlemesi.** Islendik m massaly gaz üçin Mendeleyew tarapyndan umumylaşdyrylan we Mendeleyew-Klapeýronyň adyny alan deňlemäni  $PV = \frac{m}{\mu} RT$  görnüşde ýazarys, ýa-da umumy görnüşde  $PV = \nu RT$ . Bu birleşdirilen gaz halynyň islendik massasy üçin Mendeleyew - Klapeýronyň deňlemesidir.

**Uniwersal gaz hemişeliginiň san bahasy.** Uniwersal gaz hemişeliginiň san bahasyny gazyň adaty şertde bolan ýagdaýy üçin hasaplamak mümkin:

$$R = \frac{P_0 V_0}{T_0} = \frac{101325.22 \cdot 4.10^{-3}}{273.15} = 8,31 \frac{J}{mol \cdot K} = 8,31 \frac{kJ}{kmol \cdot K}.$$

**Molekulýar kinetik nazaryýetiň nukdaý nazaryndan basyş we temperatura.** Gaz köp molekulalardan, aýdalyň  $N$  molekulalardan düzülipdir. Olaryň hemmesi bitertip hereketde. Geçýän ýollary çylşyrymly. Hereket edýän ugurlary durli-durli. Aýratyn alnan artykmaç hereket ugurlary ýok. Olaryň hemmesiniň hereketini, hereket ýoluny yzarlamak asla mümkin däl. Şeýle hereketdäki molekulalar köplüginin biriniň hereket tizligi beýlekilerine garaňda deňeşdirersiz uly, başga biriniň tizligi deňeşdirersiz kiçi bolmagy mümkin. Ýene-de bir bellap geçmeli zat, ol hem hereketiň dowamynda molekulalaryň biri-biri bilen çaknyşýanlygydyr.

Goý, her bir molekulanyň tizliginiň ululygynyň san bahasy, degişlilikde  $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4, \dots, \vartheta_n$  bolsun. Ýöne, gaz molekulalarynyň hereketini häsiýetlendirýän tizliklerine degişli ululyklarynyň orta bahasynyň kesgitli san ululygy bardyr. Şeýle ululyklaryň biri hem gaz molekulalarynyň hereket tizliginiň orta arifmetik bahasyna degişlidir we ol

$\langle \vartheta \rangle$  bilen belgilenýär.

Orta arifmetik tizlik aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$\langle \vartheta \rangle = \frac{\langle \vartheta_1 \rangle + \langle \vartheta_2 \rangle + \langle \vartheta_3 \rangle + \dots + \langle \vartheta_N \rangle}{N},$$

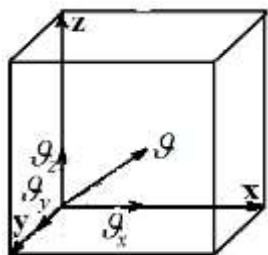
bu ýerde  $N$  – molekulalaryň umumy sany.

Orta arifmetik tizlik düşünjesinden başga-da, molekulýar fizikada we termodinamikada orta kwadrat tizlik diýen düşünje hem girizilýär we aşakdaky formula bilen kesgitlenýär:

$$\langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = \frac{\langle \vartheta_1^2 \rangle + \langle \vartheta_2^2 \rangle + \langle \vartheta_3^2 \rangle + \dots + \langle \vartheta_N^2 \rangle}{N}.$$

Molekulalaryň giňişlikdäki hereket tizlikleriniň giňişlik koordinatalarynyň oklaryna bolan tizlik wektorynyň ugry we biri-birine, şeýle

hem her haýsysy bir diwara perpendikulýar bolan üç duzuji proyeksilary,  $\vartheta_x$ ,  $\vartheta_y$  we  $\vartheta_z$ , 10-njy suratda kub görnüşli gabyň



10-njy surat

içinde bir molekula üçin görkezilen.

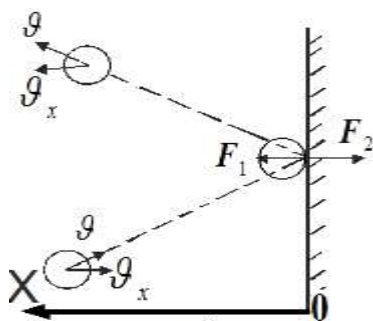
Molekulalaryň orta kwadrat tizliginiň ululygy koordinat oklaryna bolan proyeksiýalarynyň orta kwadrat tizlikleriniň j e m i n e:  $\langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = \langle \vartheta_x^2 \rangle + \langle \vartheta_y^2 \rangle + \langle \vartheta_z^2 \rangle$

deňdir.

Molekulalaryň bitertip hereket edýändigine sebäpli, olaryň  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$  oklarynyň ugruna bolan hereketi deňgüýçlidir, ýagny  $\langle \vartheta_x^2 \rangle = \langle \vartheta_y^2 \rangle = \langle \vartheta_z^2 \rangle$ . Onda, gaz molekulalarynyň orta kwadrat tizligini aşakdaky ýaly ý a z a r y s:

$$\langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = 3 \langle \vartheta_x^2 \rangle ; \langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = 3 \langle \vartheta_y^2 \rangle ; \langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = 3 \langle \vartheta_z^2 \rangle .$$

Gazlaryň basyşyny gabyň içinde saklanýan gaz molekulalarynyň gabyň diwaryna edýän urgulary bilen düşündiripdik. Beýle diýdigimiz gabyň diwary we onuň içinde saklanýan gaz molekulalarynyň "diwar-molekula", "molekula-diwar" aralygynda özara täsiriň bar diýiligidir.



11-nji surat

Goý, özara täsire, ýagny uрга çenli molekulalaryň impulsynyň  $x$  okuna bolan proyeksiýasy  $m_0 \vartheta_x$ , özara tasirinden, ýagny urgudan soňky impulsynyň  $x$  okunyň otrisatel ugruna bolan proyeksiýasy, degişlilikde -  $m_0 \vartheta_x$  bolsun. Molekular  $x$ -okuň ugruna hereket edýän

bolsa, olaryň şol okuň ugrundaky diwara bolan urgulary netijesinde ýüze cykýan güýçleri we olaryň impulslarynyň ugruny aşakdaky ýaly görkezip bileris (11-nji surat).

Molekulanyň impulsynyň üýtgemegi olaryň güýç impulslarynyň üýtgemegine hem getirýär. Onda, Nýutonyň ikinji we üçünji kanunlarynyň esasynda alarys:

$$F_1 \Delta t = m_0 \langle v_x \rangle - (-m_0 \langle v_y \rangle) = m_0 \langle v_x \rangle + m_0 \langle v_y \rangle = 2m_0 \langle v_x \rangle.$$

11-nji suratda  $F_1$ -diwaryň molekula görkezýän garşylyk gýýji,  $F_2$  - molekulanyň diwara täsir edýän güýji. Bu güýçleriň, Nýutonyň üçünji kanuny esasynda, san ululyklary özara deň, ugurlary gapma-garşylykly diýip aýdyp bileris.

Eger-de göwrüm birligindäki molekulalaryň sanyny  $n$  harpy bilen belgilesek, onda molekulalaryň konsentrasiýasy diýen düşüňjani matematiki görnüşde aşakdaky ýaly aňladyp bileris:  $n = \frac{N}{V}$ . Bu ýerde:  $N$  – molekulalaryň umumy sany,  $V$  – gaz molekulalarynyň salnan gabynyň göwrümi, ýa-da gazyň göwrümi hem diýilýär.

Goý, käbir  $\Delta t$  wagtdowamynda molekulalaryň diwara edýän urgusynyň sany  $Z$ -bolsun. Şeýlelikde, şol urgularyň sanyna degişlilikdäki güýjüň impulsynyň üýtgemesini aşakdaky ýaly ýazyp bileris,  $F \Delta t = Z 2m_0 \langle v_x \rangle$ . Berlen göwrümdäki molekulalaryň umumy sany:

$$N = n V = n S = n \langle v_x \rangle \Delta t S.$$

Molekulalaryň diwara edýän urgularynyň  $\Delta t$  wagtdowamyndaky  $Z$  sanyny aşakdaky ýaly ýazyp bileris:

$$Z = \frac{N}{2} = \frac{n \langle v_x \rangle}{2} \Delta t S.$$

Alan urgy sanymyzy güýjüň impulsynyň üýtgame formulasyna goýup aşakdaky aňlatmany alarys:



$$F \Delta t = Z 2m_0 \langle \vartheta_x \rangle = \frac{n \langle \vartheta_x \rangle \Delta t}{2} s. 2m_0 \langle \vartheta_x \rangle = \\ = nm_0 \langle \vartheta_x^2 \rangle S \Delta t.$$

Deňligiň iki tarapyny hem  $S \Delta t$  bölüp alarys:

$$\frac{F \Delta t}{S \Delta t} = \frac{nm_0 \langle \vartheta_x^2 \rangle S \Delta t}{S \Delta t}, \text{ ýa-da } \frac{F}{S} = nm_0 \langle \vartheta_x^2 \rangle .$$

Alnan aňlatmanyň çep tarapy gaz molekulalarynyň gabyň diwaryna edýän basyşyny aňladýar. Onda,  $\langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = 3 \langle \vartheta_x^2 \rangle$  göz önünde tutup  $P = \frac{F}{S} = nm_0 \langle \vartheta_x^2 \rangle$ ,

$$\text{deňlikden alarys: } P = nm_0 \frac{1}{3} \langle \vartheta_{kw}^2 \rangle = \frac{1}{3} nm_0 \langle \vartheta_{kw}^2 \rangle .$$

Gazyň basyşynyň aňlatmasyny, molekulýar kinetik nazaryýete esaslanyp çykardyk we gaz molekulalarynyň gabyň diwaryna edýän basyşynyň formulasyny aldyk. Soňky aňlatmany ikä köpeldip we bölüp alarys:  $P = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \langle \vartheta_{kw}^2 \rangle}{2}$ . Bu ýerde  $\frac{m_0 \langle \vartheta_{kw}^2 \rangle}{2} = \langle W_k \rangle$  - molekulalaryň öňe hereketiniň orta kinetik energiýasy.

Jisimiň öňe hereketindäki onuň orta kinetik energiýasynyň bahasyny basyşyň formulasyna goýup alarys:  $P = \frac{2}{3} n \langle W_k \rangle$ . Bu aňlatma Klauziusyň deňlemesi ýa-da gazlaryň molekulýar-kinetik nazaryýetiniň esasy deňlemesi diýilýär. Klauziusyň formulasyndan görnüşi ýaly, hyýaly gaz molekulalarynyň basyşy göwrüm birligindäki molekulalaryň konsentrasiýasyna we ol molekulalaryň öňe hereketiniň kinetik energiýasyna göni proporsionaldyr.

**Energiya we temperatura arasyndaky özara baglanyşyk.** Molekulanyň öňe hereketiniň orta kinetik

energiýasy we gazyň temperaturasy özara baglanyşýar. Muny gyzdyrylan we sowadylan jisimleriň mysalynda düşündirse bolar. Sebäbi, birinjiden gyzan jisimleriň temperaturasy sowuk jisime garanda ýokary, ikinjiden bolsa deňişlilikde, gyzgyn jisimiň molekulalarynyň ugrukdyrylan hereketiniň orta kinetik energiýasy sowuk jisimiň molekulalarynyň orta kinetik energiýasyna garaňda uludyr. Gyzgyn we sowuk jisimler özara galtaşdyrylanda, ýylylyk gyzgyn jisimden sowuk jisime geçip başlaýar we birnäçe wagtdan soň olaryň temperaturalary deňleşýär. Şeýlelikde, jisimleriň arasynda ýylylyk deňleşmesi başlanýar. Yokarda getirilen formuladan alarys  $P = \frac{2}{3}n \langle W_k \rangle = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \langle W_k \rangle$ . Deňligiň iki tarapyňy hem göwrüme  $V$  köpeldip alarys:

$$PV = \frac{2}{3}V \frac{N}{V} \langle W_k \rangle = \frac{2}{3}N \langle W_k \rangle.$$

Deňligiň çep we sag taraplaryny berlen göwürümdäki molekulalaryň umumy sanyna bölüp,  $\frac{PV}{N} = \frac{2}{3} \langle W_k \rangle$  aňlatmany alarys.

Deňligiň sag tarapyňy  $\theta$  (teta) bilen belgiläp alarys,  $\frac{PV}{N} = \frac{2}{3} \langle W_k \rangle = \theta$ . Bu ýerde,  $\theta$  (teta)-temperatura, ýöne ol energiýanyň birliklerinde ölçenilýär. Ony absolýut temperaturanyň birliklerinde ölçär ýaly etmek mümkin. Onuň üýtgemesi absolýut temperaturanyň üýtgemesine göni proporsionaldyr:  $\theta \sim T$ . Alnan proporsionallyga,  $k$  proporsionallyk koeffisiýentini girizip aşakdaky ýaly deňlik alarys  $\theta = kT$ .

$k$  - proporsionallyk koeffisiýentiniň fiziki manysy bardyr. Ony anyklamak üçin temperaturanyň iki bahasyna, ýagny 0 K we 100 K bahalaryna seredeliň:

$$\begin{cases} P_0 V_0 = N \theta = k T_0 N \\ PV = N \theta = k T N \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{P_0 V_0}{T_0 N} = k \\ \frac{PV}{NT} = k \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{P_0 V_0}{N} = k T_0 \\ \frac{PV}{N} = k T \end{cases} \Rightarrow$$

$$\frac{PV}{N} - \frac{P_0V_0}{N} = kT - kT_0, \quad \text{ýa-da} \quad \frac{PV - P_0V_0}{N} = k(T - T_0).$$

Alnan deňlemeden proporsionallyk koeffisiýenti

$$k = \frac{PV - P_0V_0}{N(T - T_0)}.$$

Gazy häsiýetlendirýän ululyklaryň adaty (normal) şertdäki bahalaryny:  $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ,  $V = V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ , şeýle hem, islendik gaz hemişelik göwrümde  $0^\circ\text{C}$ -dan  $100^\circ\text{C}$  çenli gyzdyrlandaky basyşynyň bahasyny ( $P = 1,38 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ) we  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$  ululyklaryň san bahalaryny formula göýüp alarys:

$$k = \frac{(1,38 - 1,013) \cdot 10^5 \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} (100 - 0)} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}.$$

Alnan sana Bolsmanyň hemişeligi diýilýär.

Onda, ýokardaky ýazylan aňlatmany umumy görnüşde aşakdaky ýaly ýazarys,  $\frac{PV}{N} = \frac{2}{3} \langle W_k \rangle = kT$ .

Diýmek, molekulanyň öňe hereketiniň orta kinetik energiýasyny aşakdaky ýaly aňladyp bileris:

$$\frac{2}{3} \langle W_k \rangle = kT \quad \text{ýa-da} \quad \langle W_k \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Şeýlelikde, biz molekulanyň öňe hereketindäki onuň orta kinetik energiýasy we temperaturasy arasyndaky özara baglanyşygy tapdyk. Ol baglanyşykdan aşakdaky ýaly netije çykarmak mümkin: gaz molekulalarynyň bitertip ýylylyk hereketiniň orta kinetik energiýasy absolýut temperaturanyň ululygyna göni proporsionaldyr.

Gazy häsiýetlendirýän ýokardaky formulalardan, gazyň basyşy we konsentrasiýasy, şeýle hem absolýut temperaturasy arasyndaky baglanyşygy alyp bileris:  $\frac{PV}{N} = kT$  ýa-da  $PV = NkT$ . Bu formuladan  $P = \frac{N}{V} kT$  ýa-da  $P = nkT$ , bu ýerde  $n = \frac{N}{V}$  – gaz molekulalarynyň konsentrasiýasy. Alnan  $p = nkT$  aňlatma Klauzius-Bolsmanyň deňlemesi hem diýilýär.

Klauzius-Bolsmanyň deňlemesinden görnüşi ýaly birmeňzeş basyşda we temperaturada hemme gazlaryň molekulalarynyň konsentrasiýasy birmeňzeşdir. Klauzius-Bolsmanyň formulasyndan peýdalanyň dürli gazlaryň molekulalarynyň goşulyşmagyndan alnan garyndynyň basyşyny kesgitlemek hem mümkin. Ýapyk gapdaky molekulalaryň garyndysynyň hereketi durgunlaşan ýagdaýynda onuň molekulalarynyň hemmesinin temperaturasy deňleşer, ýagny birmeňzeş bolar, onda

$$n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_n.$$

Garyndynyň konsentrasiýasyny aňladýan bu formulanyň çepini we sagyny  $KT$ -e köpeldip alarys:

$$nkT = n_1kT + n_2kT + n_3kT + \dots + n_nkT.$$

Bu ýerde  $p = nkT$ -garyndydaky gaz molekulalarynyň umumy basyşy. Şeýle-de  $p_1 = n_1kT$ ,  $p_2 = n_2kT$ , ...,  $p_n = n_nkT$ - her gazyň molekulalarynyň aýry-aýrylykdaky basyşlary. Şeýlelikde, gaz garyndysyndaky molekulalaryň arasynda himiki täsirleşme bolmadyk ýagdaýynda gaz molekulalarynyň parsial basyşlarynyň jemini alarys: ýa- da

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad \text{ýa-da} \quad P = \sum_{i=1}^n P_i.$$

Muňa Daltonyň kanunynyň formulasy diýilýär.

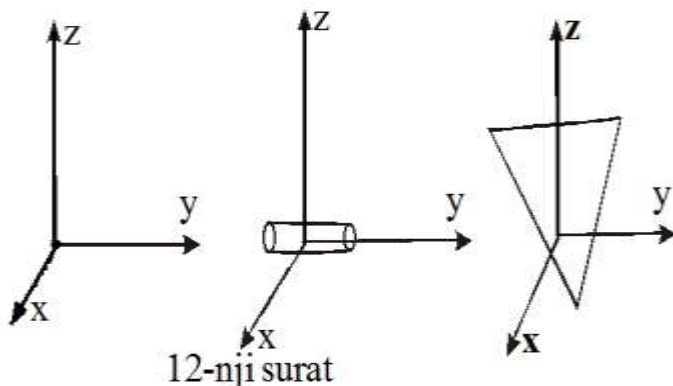
### **Molekulalaryň erkinlik derejesiniň sany.**

Molekulalaryň toplumyna material nokatlaryň ulgamy hökmünde seretmek mümkin. Material nokadyň öňe, aýlaw we yrgyldyly hereketi ýerine ýetirişleri ýaly molekulalar toplumy hem şol hereketleri ýerine ýetirmäge ukyplydyrlar. Jisimiň giňişlikdäki hereketine gözegçilik etmek üçin onuň saýlanyp alnan hasaplaýyş ulgamyna görä ýerleşiş ornuny kesgitlemek zerur. Onuň üçin jisimiň giňişlikdäki erkinlik derejesi diýlen düşünje girizilýär.

Ol  $i$  harpy bilen belgilenýär we jisimiň giňişlige görä näçe sany baglanyşyksyz koordinatalarynyň barlygyny häsiýetlendirýär. Oňa jisimiň ýa-da molekulanyň erkinlik derejesiniň sany diýilýär.

Tebigatda bir, iki, üç we köp atomly molekulalar bar.

Bir atomly molekulary material nokat hökmünde kabul etsek, onda beýle molekularyň giňişlikdäki orny üç koordinatanyň üsti bilen kesgitlenip bilner. Onuň erkinlik



derejesi  $i=3$ -e deň. Şeýle molekulary elementleriň hataryna argony, geliýni we başga käbir elementleri goşmak bolar.

Iki atomly molekula wodorod, azot we beýleki käbir elementleriň molekulary degişlidir, olar üçin  $i=5$ . Üç atomly molekularyň erkinlik derejesiniň sany  $i=6$  deňdir. 12-nji suratda üç, baş we alty erkinlik derejeli molekular görkezilen.

$i=3$  bolan molekularyň üç sany öňe hereketiniň erkinlik derejesi bardyr.  $i=5$  bolan molekularyň üç sany öňe we iki sany,  $x$  okunyň daşynda, aýlawy ýerine ýetirip bilýän erkinlik derejesi bardyr.  $i=6$  bolan molekular üç sany öňe, üç sany aýlaw hereketini ýerine ýetirip bilýän erkinlik derejelere eýedir.

**Molekularyň erkinlik derejesi boýunça energiýalarynyň deňölçegli paýlanmagynyň kanuny.** Erkinlik derejesi  $i=3$  bolan molekularyň her bir erkinlik derejesine, olaryň öňe hereketiniň  $\frac{1}{2}kT$  energiýasy degişlidir, onda  $W_{k\text{ öňe}} = \frac{i}{2} kT = \frac{3}{2} kT$ . Iki atomly molekula üçin bolsa:

$W_{k\text{ öňe}} = \frac{i}{2} kT = \frac{5}{2} kT$  energiýa degişlidir. Üç atomly molekula üçin bolsa:  $W_{k\text{ öňe}} = \frac{i}{2} kT = \frac{6}{2} kT$  energiýa degişlidir..

Şu ýerde atomlaryň erkinlik derejesine bagly bolan hereketiniň, esasan hyýaly gazlara degişlidigini ýatlamaklyk maksada laýyk, çünki molekulanyň atomlary özara biri-biri bilen berk baglanyşyga eýe bolup bilýän däldir. Hakyky şertlerde tebigatda bar gazlar üçin öňe, aýlaw hereketlerinden daşary, atomlaryň yrgyldyly hereketi hem ýerine ýetip bilýändiklerini hasaba almak zerurdyr. Şonuň üçin yrgyldyly hereketiň erkinlik derejesi diýlen düşüňjani girizmek maksada laýykdyr.

## **Içki energiýa. Iş, ýylylyk mukdary, ýylylyk**

### **Gazyň göwrümi üýtgedilende ýerine ýetirilýän iş:**

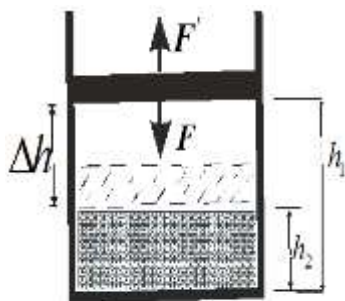
**a) Icki energiýa.** Molekulalar elmydama hereketdedirler. Olaryň bitertip ýylylyk hereketlerinde özlerine degişli tizlikleri we kinetik energiýalary bar. Mundan daşary hem molekulalaryň biri-birine görä daş ýa-da ýakyn ýerleşişleri bilen baglanyşykly bolan potensial energiýasyda bardyr. Molekulalaryň potensial we kinetik energiýalarynyň jemi jisimiň içki energiýasyny düzýär. Içki energiýa  $U$  harpy bilen belgilenýär. Onuň artymyny bolsa  $\Delta U$  bilen belgileýärler. Jisimiň içki energiýasy ol jisimiň ýagdaýyna baglydyr. Jisim bir agregat haldan beýleki bir agregat hala geçende jisimiň agregat halynyň üýtgemegini häsiýetlendirýän onuň içki energiýasy hem üýtgeýär.

**b) Iş.** Hereket wagtynda ýüze cykýan sürtülme güýjüni ýeňip geçmek üçin şol jisimiň özi iş edende, ýa-da ol jisimiň hereketine garşy daşky güýçler iş eden wagtynda jisimiň ýagdaýyny üýtgedip bolar. Diýmek, jisimiň ýagdaýynyň üýtgemegi jisimiň içki energiýasynyň üýtgemesine getirýär.

Içki energiýanyň beýle üýtgemesine bolsa öz gezeginde güýjüň işi sebäp bolýar.

c) **Ýylylyk.** Içki ýa-da daşky güýçler iş ýerine ýetirmedik ýagdaýynda hem jisimiň içki energiýasyny üýtgetse bolar. Mysal üçin, yylylyk gyzgyn jisimden sowuk jisime öz-özünden iş edilmezden geçer. Beýle geçiş, jisimiň ýylylyk geçirijiliginiň üsti bilen amala aşyrylýar. Diýmek, ýylylyk geçirijiligi bolan ýagdaýynda jisimiň içki energiýasy üýtgeýär. Jisimiň ýylylyk geçirijiligi gyzgyn we sowuk jisimleriň özara biri-birine galtaşmasy netijesinde, ýa-da gyzan jisimiň şöhlenenmesi esasynda amala aşyrylyp hem biliner. Mysal üçin, gaz gyzdyrgyjynyň üstünde gyzdyrylyp goýulan içi suwly çäýnek gyzdyrylmak dowam etmese kem-kemden sowaýar. Otagdaky howanyň, şeýle hem onuň içindäki zatlaryň gyzdyryjy abzallardan goýberilýän ýa-da içinde ot ýanyp duran peçden goýberilýän şöhlenenme ýylylygynyň hasabyna temperaturalarynyň ýokarlanmagynyň bolýanlygy hem muňa mysal bolup biler.

13-nji suratda görkezilen silindriň porşeniniň aşagynda gaz molekulalary bar diýeliň. Başda porşeniň beýikligi  $h_1$  bolsun. Porşene käbir  $F$  güýç täsir edýär we ol güýç zerarly porşen käbir  $\Delta h$  -aralyga süýşýär, birinji ýagdaýdan ikinji ýagdaýa, ýagny  $h_2 = h_1 - \Delta h$  aralyga süýşüpdir diýeliň. Porşeniň



13-nji surat

şüýşmesiniň üýtgemegi  $\Delta h = h_1 - h_2$  bolsun. Porşen gaz molekulalaryny gysyp ugrandan porşeniň hereketine garşy ugrukdyrylan we porşene goýulan güýjüň ululygyna deň bolan güýç bilen molekulalar porşene täsir edýärler. Onda, Nýutonyň üçünji kanuny esasynda alarys,  $F' = -F$ .

Porşeni süýşirmek üçin

goýulan daşky güýjüň işi we porşeniň süýşürilmegine garşy molekulalar tarapyndan ýokaryk gönükdirilen içki güýjüň işi özara deňdir,  $A^1=A$ .

Şeýle hem  $A^1=F^1\Delta h$  we  $A=F\Delta h$  göz önünde tutup alarys,  $A^1=F^1 h=-F\Delta h$  ýa-da  $F^1\Delta h=-F\Delta h$ . Güýçleri porşeniň esasynyň meýdanyna bolan basyşy bilen çalşyp alarys:  $P^1S\Delta h=-PS\Delta h$ . Umumy görnüşde,  $\Delta h=h_1-h_2$  göz önünde tutup alarys:  $PS(h_1-h_2)=\Delta A=A$  ýa-da  $P(Sh_1-Sh_2)=A$ . Bu ýerde  $Sh_1=V_1$  we  $Sh_2=V_2$  bilen belgiläp alarys,  $P(V_1-V_2)=A$  ýa-da  $A=P(V_1-V_2)=P\Delta V$ , onda  $A^1=A=-P\Delta V$ . Eger-de  $\Delta V=V_1-V_2<0$  - bolsa, onda daşky güýjüň işi položitel we  $\Delta V=V_1-V_2>0$  bolsa, onda daşky güýjüň işi otrisatel hasap edilýär.

**Ýylylyk mukdary.** Jisim ýylylyk geçirijilik netijesinde energiýany kabul edip we yzyna berip bilýär. Şu ýagdaýda, energiýanyň mukdar ölçegi hökmünde fizikada ýylylyk mukdary diýilen ululyk girizilýär we ol  $Q$  -harpy bilen belgilenýär.

Jisime berilýän ýylylyk mukdary ýa-da jisimiň kömegi bilen ýerine ýetirilýän mehaniki iş şol jisimiň içki energiýasynyň üýtgemegine getirýän bolsa, onda olaryň ikisi hem özara deňgüýçlidirler. Diýmek, jisime ýylylyk berilmegi, ýa-da onuň kömegi bilen ýerine ýetirilýän iş - ikisem jisimiň içki energiýasynyň üýtgetmesine getirýär. Munuň hakykatdan hem şeýledigini tejribe üsti bilen inlis alymy Joul subut edipdir we oňa ýylylygyň mehaniki deňgüýçliligi diýip at beripdir. Ony  $A$  - harpy bilen belgiläp aşakdaky bahany alypdyr:

$$A = 4180 \frac{J}{kcal}.$$

Daşky güýç 4180 J iş edende, ol güýjüň bu işi berlen jisimden 1  $kcal$  ýylylyk bölüp cykarar ýa-da tersine, jisimden 1  $kcal$  ýylylygy bölüp aýyrmak üçin daşky güýç 4180 J işi ýerine ýetirer. Meselem: deşik deşýän gural, deşik deşen mahalynda gural hem gyzyýar, deşik deşilýän nusga-da gyzyýar ýa-da sowadyjynyň işçi jisimi onuň içindäki önümlerden we howadan ýylylygy sowadyjydan daşaryk çykaryp daşky



gurşawa beren mahalynda sowadyjynyň içindäki önümler we sowadyjynyň howasy sowaýar.

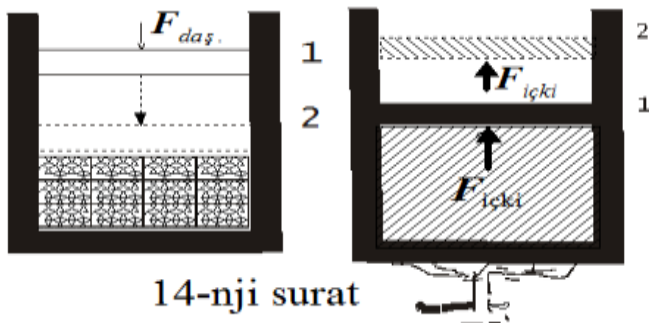
**Ýylylyk sygymy** – temperaturasyny 1K üýtgetmek üçin jisime berilýän ýa-da ondan alynýan ýylylyk mukdaryny aňladýar. Jisumden ýylylygyň berilmeginde ýa-da aýrylmagynda onuň temperaturasy üýtgeýär. Bu hadysany has aýdyňlaşdyrmak üçin maddanyň molýar we jisimiň udel ýylylyk sygymlary düşüňjeleri girizilýär we ulanylýar. Maddanyň molýar ýylylyk sygymy baş  $C$  harpy bilen belgilenilýär. Ol icki energiýanyň, ýa-da ýylylyk mukdarynyň, temperaturanyň üýtgame ululygyna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:  $C = \frac{dU}{dT}$  ýa-da  $C = \frac{\delta Q}{dT}$ . Massa birligine bolan gatnaşygy bilen ölçenýän maddanyň molýar ýylylyk sygymyna jisimiň udel ýylylyk sygymy diýilýär we ol kiçi  $c$ -harpy bilen belgilenilýär we  $c = \frac{C}{m} = \frac{dU}{mdT} = \frac{\delta Q}{mdT}$  formula bilen kesgitlenilýär. Ölçeg birlikleri:  $[C] = 1 \frac{J}{mol.K}$ ;  $[c] = 1 \frac{J}{kg.K}$ .

**Termodinamikanyň birinji başlangyjy.** Yokarda, jisimiň içki energiýasyny üýtgetmegiň iki usulyna seredip geçdik:

1) jisimiň içki energiýasynyň üýtgemegi daşky güýjüň eden işine deň bolan ýagdaýynda, ýagny  $dU_1 = -\delta A$ ;

2) jisimiň içki energiýasynyň üýtgemegi jisime berlen, ýa-da ondan alnan ýylylyk mukdaryna deň bolan ýagdaýynda, ýagny  $dU_2 = \delta Q$ .

Umumy ýagdaýda, jisimiň içki energiýasynyň üýtgemegi içki energiýalaryň üýtgemeleriniň jemine deňdir,  $dU_1 + dU_2 = \delta Q - \delta A$ . Şu formuladan ýylylyk çalyşyş netijesinde jisime daşardan berlen ýylylyk mukdaryny tapalyň,  $\delta Q = dU + \delta A$ . Alnan aňlatma termodinamikanyň birinji başlangyjynyň formulasydyr. Onuň okalyşy: jisime daşardan berilýän ýylylyk mukdary jisimiň içki energiýasyny artdyrmaga we daşky ýa-da içki güýçleriň täsirini ýeňip geçmek üçin ýerine ýetirilýän işe sarp bolýar.



14-nji surat

Mysal üçin, 14-nji suratda görkezilen silindrde, birinji ýagdaýda duran porşeniň aşagynda käbir m massaly gaz bar diýeliň. Ol gazyň molekulalaryny gyzdyryp  $\delta Q$  ýylylyk mukdaryny sarp edenimizde porşen birinji ýagdaýyndan göwrüminiň kiçi ýagdaýyna geçýär diýeliň. Gaza berlen ýylylyk mukdarynyň hasabyna onuň temperaturasy artýar. Diýmek, onuň içki energiýasy ulalýar. Gaz, porşeni süýşürmek bilen ony ikinji ýagdaýa geçirip, käbir işi ýerine ýetirýär. Netijede, berlen ýylylyk mukdary  $Q$  gazyň içki energiýasyny ýokarlandyrmak we porşeni birinji ýagdaýdan ikinji ýagdaýa süýşürmek üçin daşky güýçleriň garşylygyny ýeňip geçmek üçin iş edýär. Şeýlelikde, termodinamikanyň birinji başlangyjy doly ýerine ýetirilýär.

**Prosesler. 1.Hemişelik göwrümdäki (izohor  $V=\text{const}$ ) hadysa.** Bu hadysada ýerine ýetirilýän iş  $\delta A = P dV = P(V_1 - V_2)$  formula bilen kesgitlenilýär. Eger  $V_1 = V_2$  bolsa, onda hemişelik göwrümde geçýän hadysada  $\delta A = 0$  ýagny, iş edilmeyär.

Hemişelik göwrümde geçýän hadysada gazyň işi nola deň. Onda termodinamikanyň birinji başlangyjy esasynda alarys:  $\delta Q = dU + dA = dU + 0 = dU$ , ýagny  $\delta Q = dU$ .

Eger,  $Q > 0$  – bolsa gaz gyzýar, çünki onuň içki energiýasy artýar.  $Q < 0$  – bolsa gaz sowýar, çünki onuň içki energiýasy kemelýär.

Hemişelik göwrümdäki hadysada gaza berilýän ýylylyk mukdary onuň diňe içki energiýasyny üýtgetmäge, ýagny artdyrmaklyga ýa-da kemeltmeklige sarp bolýar. Şonuň üçin temperatura ýokarlanyp gaz gyzýar, ýa-da temperatura peselip gaz sowawar. Hemişelik göwrümdäki hadysada gaz sowadylanda gazdan daşaryk berilýän ýylylyk mukdary gazyň içki energiýasynyň kemelmesiniň hasabyna bolup geçýär.

**2. Hemişelik temperaturadaky (izoterma  $T=\text{const}$ ) hadysa.** Bu hadysada gazyň içki energiýasy  $dU = C_v dT = C_v(T_2 - T_1)$  formula bilen kesgitlenýär. Eger,  $T_1 = T_2$  – bolsa, onda üýtgemeyän temperaturaly hadysa geçende gazyň içki energiýasy üýtgemeyär, ýagny hemişelik temperaturadaky hadysada gazyň içki energiýasynyň üýtgemesi ýok, ýagny onuň üýtgemesi nola deň. Onda gaza berilýän ýylylyk mukdarynyň nirä harç bolýandygyny mukdar taýdan hasaplamak üçin termodinamikanyň birinji başlangyjynyň formulasyna ýüzleneliň:

$$\delta Q = dU + \delta A = 0 + \delta A = \delta A. \text{ Onda, } \delta Q = \delta A.$$

Eger  $Q > 0$  bolsa, onda üýtgemeyän temperaturada geçýän hadysada gazyň işi položitel, ýagny hemişelik temperaturadaky gaza berilýän ýylylyk mukdary ol gazyň  $\delta A$  işi ýerine ýetirmegine sarp bolýar.

Eger  $Q < 0$  -bolsa, onda hemişelik temperaturadaky hadysada gazyň işi otrisatel, ýagny  $\delta A < 0$  bolmagyna garamazdan gaz özündäki bar bolan ýylylygy daşky gurşawa berýär.

**3. Hemişelik basyşdaky (izobar  $P=\text{const}$ ) hadysa.** Hemişelik basyşda geçýän hadysada gaza berilýän ýylylygy mukdar taýdan hasaplamak üçin termodinamikanyň birinji başlangyjyna ýüzleneliň,  $\delta Q = dU + \delta A$ . Hemişelik basyşda geçýän hadysada gaza daşndan berilýän ýylylyk mukdary ol gazyň içki energiýasyny artdyrmaga we daşky güýçleriň gaz

molekulalaryna täsirini ýeňip geçmek üçin iş etmäge sarp bolýar.

Eger,  $Q > 0$  bolsa, onda  $A > 0$  we  $U > 0$ . Gaz (ulgam) gyžýar. Eger,  $Q < 0$  bolsa, onda  $A > 0$  we  $U < 0$ , gaz (ulgam) sowayar.

**Adiabatik hadysa.** Sowadyjy abzallarda gazlar bilen baglanyşykly adiabatik hadysasy giňden ulanylyar, ýagny şol hadysa sezewar edilýän jisim daşky gurşawdan ýylylyk alanogam, daşky gurşawa ýylylyk berenogam. Sebäbi, bu hadysa örän çalt geçenden soň jisimleriň arasynda ýylylyk alyş-çalşy bolup geçip ýetişmeýär, ýagny  $\delta Q = 0$ . Şeýlelikde, adiabatik hadysa üçin termodinamikanyň birinji başlangyjyny ulanmak bilen aşakdaky deňligi alarys,  $dU + \delta A = 0$  ýa-da  $\delta A = -dU$ .

Alnan deňlikden görnüşi ýaly jisimiň (gazyň) adiabatik giňelmegindäki ýerine ýetirilýän iş şol hadysany ýerine ýetirýän jisimiň içki energiýasynyň kiçelmeginiň hasabyna amal edilýär. Eger-de jisim (gaz) adiabatik ýerine ýetirilýän işiň hasabyna gysylýan bolsa, onda daşky güýjüň işi jisimiň (gazyň) içki energiýasyny artdyrmaga dolulygyna sarp edilýär ekeni. Adiabatik hadysada iş

$$A = - \frac{m}{\mu} C_v \int_{T_1}^{T_2} dT \quad m C T = \frac{m}{\mu} C_v (T_1 - T_2).$$

**Ýylylyk sygymynyň hadysanyň görnüşine baglylygy.** Hemişelik göwrümdäki udel ýylylyk sygymy:

$$C_v = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_v = \frac{dU}{dT}.$$

Hemişelik basyşdaky ýylylyk sygymy  $C_p = \left( \frac{\delta Q}{dT} \right)_p$ .

Onda termodinamikanyň birinji başlangyjyndan alarys:

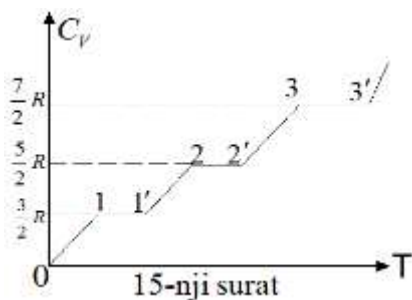
$$\delta Q = dU + \delta A \quad \text{ýa-da} \quad C_p dT = C_v dT + P dV.$$

Mendeleyew-Klapeýronyň deňlemesinden  $P dV = R dT$ . Bu aňlatmany termodinamikanyň birinji başlangyjynyň formulasyna goýup alarys:  $C_p dT = C_v dT + P dV = C_v dT + R dT$ . Deňligiň iki tarapyňy hem  $dT$  gysgaldyp alarys,  $C_p = C_v + R$ .

Alnan aňlatma Maýeriň formulasy diýilýär. Formulanyň okalyşy: hemişelik basyşda saklanýan gazyň ýylylyk sygymy hemişelik göwrümde saklanýan gazyň ýylylyk sygymynyň üstüne uniwersal gaz hemişeliginiň goşulmaklygyna deňdir. Beýle diýildigi hemişelik basyşda gazy gysmak üçin ýerine ýetirilýän iş hemişelik göwrümde gazy saklamak üçin ýerine ýetirilýän işden gazyň uniwersal hemişeligine uludyr diýiligidir. Suwuk we gaty jisimlerini hemişelik göwrümdäki we hemişelik basyşdaky udel ýylylyk sygymlyry biri-birinden az tapawutlanýar.

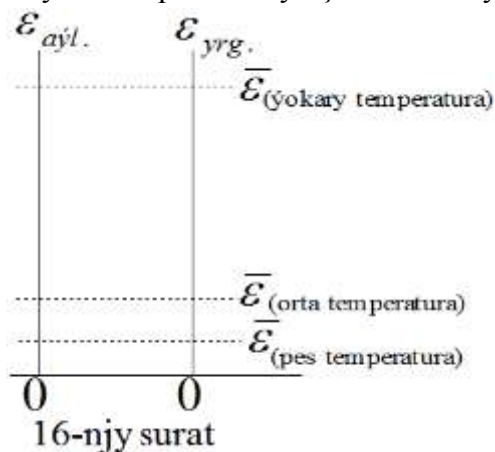
**Hyýaly gazlaryň ýylylyk sygymy üçin nusgawy molekulýar kinetik nazaryýet we onuň çäkliligi.** Hemişelik göwrümde ýylylyk sygymy  $C_v = \frac{i}{2}R$  aňlatma bilen kesgitlenilýär. Şu aňlatmadan görnüşi ýaly hemişelik göwrümdäki hyýaly gazlaryň ýylylyk sygymy hemişelik ululyk bolup ol gaz halynyň ululyklaryna, hususan-da temperatura bagly dal ýaly bolup galýar. Dogrudan hem bu bagly dällik temperaturanyň käbir çäğine çenli ýerine ýetirilse-de ol cäkden temperatura ýokarlansa baglanyşyksyzlyk baglanyşklylyga geçýär. Munuň şeýledigine 15-nji suratda getirilen ýylylyk sygymynyň temperatura baglylyk grafigi hem şaýatlyk edýär.

1-1', 2-2' we 3-3' temperatura çäklerinde hemişelik göwrümdäki ýylylyk sygymy  $C_v$  üýtgeşsiz, hemişelik galýar. Görkezilen temperatura aralyklarynda ýylylyk sygymy  $C_v$



hemişelik bolup, dürli erkinlik derejeleri bilen aňladylýar. Şol erkinlik derejeleriniň sanyna degişli hereketi gaz molekulasy ýerine ýetirýär. 1-1'-temperatura cägi (50 K töweregi); 2-2'-temperatura cägi (293

$C_v = \frac{3}{2}R$  ýagny molekula özünü üç erkinlik derejesi bar ulgam ýaly öňe hereketi ýerine ýetirýär.  $2 \cdot 2^1$  temperatura aralygynda  $C_v = \frac{5}{2}R$ , ýagny temperaturanyň öňkä garanda ýokary çäklerinde molekula üç öňe hereketinden daşary iki aýlaw erkinlik derejesine hem eýedir. Has ýokary temperaturalarda ýylylyk sygymy  $C_v = \frac{7}{2}$ , ýagny has ýokary temperaturalarda molekula ýokarda sanan erkinlik derejesiniň üstüne yrgyldyly hereketi hem ýerine ýetirýär diýiligidir. Görkezilen temperatura aralyklarynda ýylylyk sygymy temperatura baglylykda birsydyrgyn ýokarlanýar. Ýylylyk sygymy şeýle üýtgände aýlaw we yrgyldyly herekete molekulalaryň hemmesiniň bir wagtda ýetip bilmeýändigini bilen düşündirilýär. Pes temperaturalarda az sanly molekula aýlawly hereketi ýerine ýetirýär. Temperaturanyň artmagy bilen aýlaw hereketini ýerine ýetirýän molekulalaryň umumy sany artýar. Soňra, temperatura kesgitli ululyga ýetende molekulalaryň uçdan-tutma hemmesi aýlaw hereketini ýerine ýerirýär. Temperaturanyň şondan soňky artmasynda yrgyldyly



herekete başlaýan  
molekulalar köpelip  
temperaturanyň  
kesgitli  
ýokarlanmasynda  
molekulalaryň uçdan  
tutma hemmesi  
yrgyldyly hereketi  
ýerine ýetirip  
başlaýar. Munuň  
näme üçin şeýle  
bolýandygyny  
ýylylyk sygymynyň

**Energiýanyň deňölçegli bölünşiniň ulanylyş çägi we molekulalaryň aýlaw we yrgyldyly energiýalarynyň kwantlanmasy hakynda düşünje.** Temperaturanyň ýokarlanmagy bilen gazlarda ýylylyk s y g y m y ñ ýokarlanýanlygynyň sebäbini kwant n a z a r y ý e t i düşündirýär . Onuň s e b ä b i molekulalaryň aýlaw we yrgyldyly h e r e k e t i n i ñ energiýasy islendik däl-de kesgitli baha eýe bolup bilýänligidir. Ady agzalan hereketler bilen baglanyşykly energiýalar diňe böküşli üýtgemek häsiýetine eýedir. Öňe hereket üçin şeýle çäklendirmäniň ýokdugyny, çäklendirmäniň diňe energiýa degişlidigini belläliň.

Temperaturanyň ýokarlanmagy molekularyň orta energiýasynyň bahasynyň ulalmagyna, şeýle-de gaz molekularynyň tutuşlygyna diýen ýaly aýlaw hereketine goşulşyp gitmegine sebäp bolýar. Şondan soň  $C_v$  baglanyşygy hasiyetlendirýän 15-nji suratdaky grafikde 2-2<sup>1</sup> kese çyzyk başlanýar. Temperaturanyň soňraky ýokarlanmalary

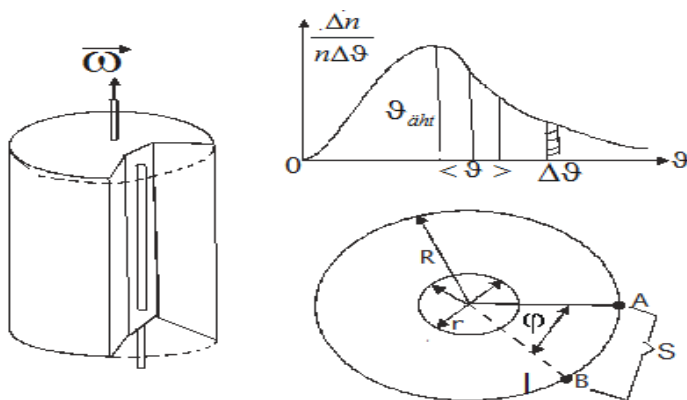
molekulalaryň yrgyldyly herekete goşulşyp gitmekliklerine getirýär. Şol pursat 15-nji suratdaky grafikde  $2^1$ -3 aralyga gabat gelyär Ýeterlik ýokary temperaturada molekulalaryň hemmesi yrgyldyly herekete goşulýşýar. Molekulalaryň beýle haly 15-nji suratdaky grafikde  $3\cdot 3^1$  kese cyzyk bilen häsiýetlendirilýär. Şonda gazyň ýylylyk sygymy  $\frac{7}{2}R$  deň bolýar. Netijede, gazyň ýylylyk sygymynyň tejribeden gyşarmasyna gözegçilik edilýär. Diymek,  $i > 6$  bolanda ýokary temperaturada öňe hereketiň orta kinetik energiýasy  $\langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{2}kT$  bolsada yrgyldyly hereketiniň energiýasynyň  $\frac{1}{2}kT$  energiýadan kiçi bolmagy ýylylyk sygymynyň nusgawy mehanikanyň kanunlaryna boýun egmän, kwant mehanikasynyň kanunlaryna boýun egýänligi sebäplidir. Ýokary temperaturada molekulalaryň aýlaw we yrgyldyly hereketiniň energiýasy böküşli häsiýet eýe. Şonda olaryň orta kinetik energiýasy,

$$\langle \varepsilon \rangle = kT \quad \text{deň.}$$

**Molekulalaryň ýylylyk hereketiniň tizligi we energiýasy boýunça bölünişiniň Makswel kanuny. Ýylylyk hereketiniň tizligi we energiýasy boýunça hyýaly gaz molekulalarynyň paýlansynyň Makswel kanuny** - Gaz molekulalarynyň tizliklerini kesgitlemek boýunça tejribeler bar. 17-nji suratda görkezilen tejribeleriň birini nemes fizigi Ştern 1920-nji ýylda geçiripdir. Ol tejribe gecirmek üçin inçejik platina simini esli uzynlykdaky insiz yşy bolan silindriň içinde ýerleşdiripdir. Yşly silindriň daşyndan ýene-de başga bir silindr oturdypdyr. Platina siminiň daşyna kümüş çäypdyrlar. Soňra ony silindriň içinde oturdyp onuň üstünden käbir ululykly tok goýberip ony gyzdrypdyrlar. Kümüşüň gyzmagy netijesinde kümüş bugarýar. Kümüşüň atomlary birinji silindrdäki yşdan geçip ikinji silindriň iç ýüzüne çöküpdirler.

Şeýlelikde, yşdan uçup çykýan molekulalar ikinji silindriň iç ýüzünde birinji silindrdäki yşa meňzeş zolak





17-njy surat

döredipdir. Soňra daşyna kümüş çäýylan platina simini hereketsiz goýup iki silindri hem şol bir wagtda, şol bir ýygylkda aýlapdyrlar. Silindrler aýlanan wagtynda, ikinji silindriň iç ýüzüne çökýän kümüşüň atomlary başdaky zolakdan käbi  $r$  aralykda ýerleşen täze öçügsi zolak emele getiripdirler. Zolagyň süýşme aralygyny  $l=R-r$  bilen kesgitlenipdir. Kümüşüň atomynyň tizligini bolsa

$$\vartheta = \frac{\ell}{\Delta t} = \frac{\ell}{\frac{\varphi}{2\pi r}} = \frac{\ell 2\pi r}{\varphi} = \frac{2\pi r \ell}{\varphi}$$

formula bilen hasaplapdyrlar.

Ikinji silindriň iç ýüzünde, silindrler aýlanan mahalynda, öçügsi zolagy atomlaryň emele getirýänliginiň sebäbini kümüşüň atomlarynyň tizlikleriniň dürli-dürlidigi bilen düşündirýärler. Uly tizlikli we oňa ýakyn tizlikli kümüş atomlary öçügsi zolak emele getiripdirler. Tizlikleri pes kümüş atomlary tizlikleri kiçeldigiçe öçügsi zolakdan daşda çöküpdirler. Netijede, platina simi gyzyyp kümüş atomlary gyzmakdan bugaranlarynda dürli ululykly tizlige eýe bolýarlar diýip aýtmak mümkin.

17-nji suratda getirilen grafikden görnüşi ýaly iki okly koordinat ulgamynyň kese okynda molekulalaryň alyp biljek  $\vartheta$  tizlikleriniň ululygy, dik okynda bolsa tizlikleri  $\vartheta$ -den  $\vartheta+\Delta\vartheta$

aralygynda üýtgeýän molekulalaryň görälikli sany  $\frac{\Delta n}{n\Delta\vartheta}$  ýerleşdirilýär. Şol grafikde beýleki tizliklere garaňda çalt gabat gelýän tizlik bar. Oňa molekulanyň alyp biljek iň ähtimal tizligi diýilýär we  $\vartheta_{\bar{a}}$  bilen belgilenýär.

Gaz molekulalarynyň tizligini kesgitlemek boýunça nazary gözlegleri iňlis fizigi Makswell 1860 ýylda geçiripdir we aşakdaky formulany öňe sürüpdir:

$$\frac{\Delta n}{n\Delta\vartheta} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{\bar{a}}}\right)^2 e^{-\left(\frac{\vartheta}{\vartheta_{\bar{a}}}\right)^2} \cdot \frac{1}{\vartheta_{\bar{a}}}.$$

Bu formula gaz molekulalarynyň ýylylyk hereketiniň tizlikleriniň paýlansy boýunça Makswelliň kanunynyň aňlatmasydyr. Bu formulada:  $n$  – gazyň berlen massasyndaky molekulalaryň umumy sany.  $\Delta n$ - tizlikleri  $\vartheta$ -den  $\vartheta+\Delta\vartheta$  çäkke ýerleşen molekulalaryň sany.  $\vartheta_{\bar{a}}$  – molekulalaryň ähtimal tizligi.

Gazyň kesgitli temperaturasynda, onuň molekulalarynyň iň ähtimal tizlikleriniň gatnaşygynyň massalarynyň ters gatnaşygyndan alnan kwadrat köke deňligi tejribe üsti bilen anyklanylypdyr, yagny

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \sqrt{\frac{m_1}{m_2}} \quad \text{ýa-da} \quad \frac{m_1\vartheta_1^2}{2} = \frac{m_2\vartheta_2^2}{2}.$$

Molekulalaryň orta kinetik energiýasy özara deňdir we ol gaz molekulalarynyň tebigatyna bagly däl-de, molekulalaryň temperaturasyna baglydyr.

Gaz molekulalarynyň iň ähtimal tizliginiň ululygyny tapmak üçin ýokarda ýazan Makswelliň gaz molekulalarynyň ýylylyk hereketiniň tizligi boýunça bölünişiniň kanunynyň formulasyny tizlik argumente görä differensirläp taparys, ýagny

$$\frac{d}{d\vartheta} \left( \vartheta^2 e^{-\frac{m\vartheta^2}{2kT}} \right) = 2\vartheta \left( 1 - \frac{m\vartheta^2}{2kT} \right) e^{-\frac{m\vartheta^2}{2kT}} = 0.$$

Alnan aňlatmanyň  $\vartheta=0$  we  $\vartheta=\infty$  bahalarynda Makswelliň deňlemesi deňlemäniň bahasynyň minimumy, ýagny ýaýyň içindäki tapawut nola deň bolan pursatynda

molekulalaryň iň ähtimal tizliginiň ululygyny tapmaga ýardam eder, onda  $\vartheta_{\text{ä}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$ .

Molekulalaryň orta tizligi (orta arifmetik tizlik)  $\langle \vartheta \rangle$  aşakdaky ýaly kesgitlenilýär:

$\langle \vartheta \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} \vartheta dN(\vartheta) = \int_0^{\infty} \vartheta f(\vartheta) d\vartheta$ .  $f(\vartheta) = \frac{dN(\vartheta)}{N d\vartheta}$  göz önünde tutup we  $\int_0^{\infty} \vartheta f(\vartheta) d\vartheta$  aňlatmany integrirläp gutarnykly alarys:  $\langle \vartheta \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \mu}}$ .

Orta kwadrat tizlik  $\langle \vartheta_{kw} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{\mu}}$  aňlatma bilen kesgitlenilýär.

Molekulalaryň tizlikleri boýunça paýlanyş aňlatmasyndan peýdalanyň gaz molekulalarynyň kinetik energiýalarynyň bahalary boýunça paýlanyşy kesgitlemek mümkin, ýagny  $dN(\vartheta) = Nf(\vartheta)d\vartheta$  göz önünde tutup,

$dN(\varepsilon) = Nf(\varepsilon)d\varepsilon$  diýip ýazarys. Bu ýerde  $\varepsilon = \frac{m\vartheta^2}{2}$  we  $d\vartheta = (2m\varepsilon)^{-\frac{1}{2}} d\varepsilon$  bolýanlygyny hasaba alsak  $dN(\varepsilon) = Nf(\varepsilon)\varepsilon = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} (kT)(kT)^{-\frac{1}{2}} \varepsilon^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} d\varepsilon$  bolar. Bu ýerden molekulalaryň ýylylyk hereketiniň energiýasy boýunça paýlanyşynyň funksiýasyny alyp bileris:

$$f(\varepsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-\frac{3}{2}} \varepsilon^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}}.$$

Hyýaly gaz molekulalarynyň orta kinetik energiýasynyň kesgitlenişi aşakdaky ýalydyr, ýagny

$$\langle \varepsilon \rangle = \int_0^{\infty} \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} \varepsilon^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} d\varepsilon = \frac{3}{2} kT.$$

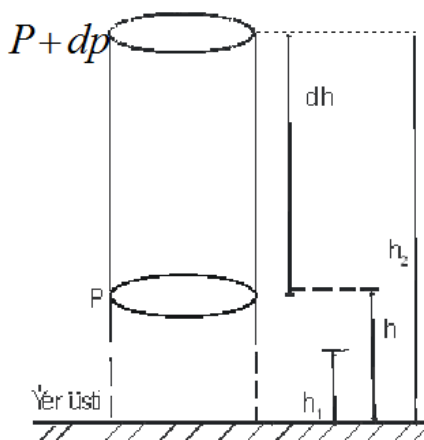
Formuladan we şol baglanyşygy häsiýetlendirýän grafikdan görnüşi ýaly gaz molekulalarynyň orta kinetik energiýasy termodinamik temperatura proporsionaldyr. Termodinamik temperaturanyň absolýut nol bahasynda ( $T=0$ ) hyýaly gaz molekulalarynyň orta kinetik energiýasy hem

degişlilikde nola deňdir:  $\langle \varepsilon \rangle = 0$ . Şol absolýut nol temperaturada gaz molekulalarynyň öňe hereketiniň togtaýanlygy sebäpli gaz molekulalarynyň basyşy nola deň bolmalydyr. Ýöne, bu fiziki nukdaý nazardan seredeniňde mumkin däl. Absolyut nol temperaturany alyp bolyan abzal döretmek mumkin däl. Absolyut nol ( $T=0K$ ) ýetip bolmajak temperaturadyr. Bu barada kwant taglymaty ýeterlik doly maglumat berýär.

**Ownuk deňagramlylyk düzgüni.** Iki jisimiň biri-birine görä temperaturalarynyň tapawutly bolmagy olarda ýylylyk deňagramlylyklarynyň ýoklugyna şaýatlyk edýär. Ýylylyk deňagramlylygynyň molekulýar-kinetik düşündirilişi temperaturanyň molekulýar-kinetik düşündirilişi bilen içgin baglanyşykly bolup çykýar. Şu aýdylanlaryň temperaturanyň absolýut nola ýakyn bolan bahalaryndan tapawutly bolan ýokary bahalarynda jisimleriň ýylylyk deňagramlylygynyň şeýle bir tükeniksiz haýal geçýän haly bolup, şol halda ol jisimleriň energiýalary molekulalaryň hereketiniň orta bir erkinlik derejesine proporsional bolan energiýa  $\langle \frac{1}{2} m \bar{v}^2 \rangle = \frac{1}{2} kT$  deňdir. Diýmek, tizlige we energiýa degişli molekulalaryň paýlanyşy Maksweliniň kanuny we ondan gelip çykýan netijeler diňe deňagramlylyk halynda saklanýan gazlar üçin dogrudyr.

**Barometrik formula.** Ýer şaryny gursap alan howa ummanyna atmosfera diýilýär. Atmosfera basyşyny italýan fizigi Toriçelliniň VIII asyrdan ölçeýşi başaryndygyny mehanikada ýatladydyk we  $P = \rho gh$  formulany ýazyp ýer üstüne atmosferanyň basyş edýänligini hem ýañzydyp, ol basyşyň ýokaryk galdygyňça azalmagyna howa gatlagynyň dyklylygynyň kiçelmesiniň, temperaturanyň üýtgemesiniň sebäp bolýandygyny ýatladydyk. Şeýle hem atmosfera basyşyny ölçeýmek üçin simaply ýa-da metaldan ýasalan barometrleriň barlygyny belläpdik.

Umuman, howany gaz hökmünde göz önüne getirsek onuň gatlaklarynda molekulalaryň deňölçepli bölünmegi üçin hiç hili daşky güýçler täsir etmeli däl. Ýöne iş ýüzünde howanyň molekulalary Ýeriň dartýş güýjüniň meýdanynda ýerleşýär. Ondan daşary hem molekulalar ýylylyk hereketini ýerine ýetirmäge ukyplydyr. Şol hereket hem howa gatlaklarynyň emele gelmegini, dartýş güýji bilen goşulyşyp onuň konsentrasiýasynyň ýer üstünden ýerleşiş daşlygyna görä üýtgemegini ýüze çykarýar. Şu aýdylanlaryň hemmesini fiziki düşündirilişden matematiki formula bilen aňladylyşa geçmegi nemes alymy Bolsman başarypdyr.



18-nji surat

Umumylaşdyrylan barometrik formulany getirip çykarmak üçin  $dh$  beýikligi bolan howa gatlagyna seredeliň. Beýiklik  $h$ -dan  $h+dh$  çenli üýtgände basyş  $P$ -den  $P+dP$  çenli üýtgesin.  $P$  we  $(P+dP)$  basyşlaryň  $h$  we  $h+dh$  beýiklikde üýtgemeginiň tapawudy 18-nji suratda görkezilen bir birlik meýdan esasy  $dh$  beýiklikli silindriň

göwrümündäki gazyň agramyna deňdir, ýagny  $(\Delta S \cdot \Delta h) = 1 \cdot \Delta h = \Delta h$  bolanda:  $P - (P + dP) = P_g = mg = \rho g V = \rho g dh$ . Bu formulada  $\rho$  gazyň  $h$  beýiklikdäki dykyzlygy.

Halka açylanda  $h$  beýiklikdäki basyşlar gysgalyp basyşyň artymy  $dP$  galýar, ýagny  $dP = -\rho g dh$ .

Atmosferanyň düzümine girýän gazlaryň häsiýetleriniň hyýaly gaz molekulalarynyň häsiýetinden tapawutlanmaýanlygyny göz önünde tutup, Mendeleyew-

Klapeýronyň formulasyny dykzlygyň  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}$  aňlatmasyna girizip we ony  $dP$ - formulada goýup alarys:

$$dP = - \frac{P\mu g}{RT} dh; \text{ ýa-da } \frac{dP}{P} = - \frac{\mu g}{RT} dh.$$

$T = \text{const}$  bolanda soňky formulany integrirläp alarys, ýagny  $\ln P = - \frac{\mu gh}{RT} + \ln c$  ýa-da  $\ln P - \ln c = - \frac{\mu gh}{RT}$ .

Logarifmirlemegiň düzgüninden peýdalanyp ýokarky aňlatmadan alarys:

$$P = ce^{-\frac{\mu gh}{RT}}.$$

Eger-de  $h=0$  bolsa, onda ol formulada  $c = P_0$  atmosferanyň deňiz derejesindäki basyşyna deňdir. Şeýlelikde,

$$P = P_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}.$$

Alnan aňlatma barometrik formula diýilýär, çünki şol formula barometr bilen ölçenilýän  $P_0$  basyş girýär. Ol formuladan görnüşi ýaly gazyň agramynyň artmagy, atmosfera howasynyň temperaturasynyň kiçelmegi bilen gazyň basyşy beýiklige baglylykda kemelýär.

**Daşky potensial meýdanda bölejikleriň paýlanyşy üçin Bolsman kanuny.** Gazlaryň kinetik nazaryýetiniň esasy kanunyndan belli bolşy ýaly gazlaryň konsentrasiýasy we basyşy biri-birine proporsionaldyr, ýagny  $P_0$  basyşda konsentrasiýa  $n_0$  we  $P$  basyşda konsentrasiýa  $n$ . Onda  $P_0 = n_0 kT$  we  $P = nkT$ . Basyşlaryň  $P_0$  we  $P$  bahalaryny barometrik formula goýup alarys:

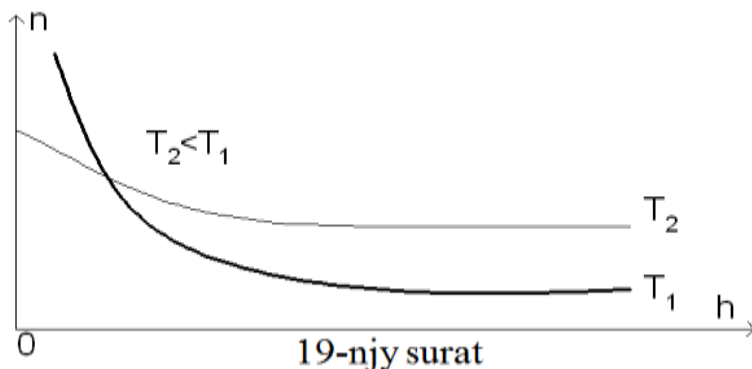
$$nkT = n_0 kT e^{-\frac{\mu g}{RT}(h-h_0)} = n_0 kT e^{-\frac{mg}{kT}(h-h_0)}.$$

Soňky formuladan:

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh - mgh_0}{kT}} \quad \text{ýa-da} \quad n = n_0 e^{-\frac{\Delta W_p}{kT}}.$$

Bu formula Bolsmanyň paýlanyşygynyň hususy görnüşi diýilýär. Ol gaz molekularynyň beýiklige baglylykdaky konsentrasiýasynyň gazyň molekularynyň potensial energiýasyna baglydygyny görkezýär.

19-njy suratdan görnüşi ýaly Ýeriň üstünde howa molekulalarynyň konsentrasiýasy  $n$  uly, beýikligiň artmagy bilen bolsa kiçelýär. Ýeriň üstünden 12 km beýiklikden



ýokarky gatlaklardaky basyşy hasaplamak üçin ýeriň merkezinden  $h$  aralykdan erkin gaçmanyň tizlemesini  $g_r = \frac{gR_{\text{ýer}}}{(R_{\text{ýer}} + h)}$ , hasaba almaly.

Makswelliň we Bolsmanyň paýlanyş formulasyny bir kanuna birikdirip alarys:  $dn_{\vartheta,W} \sim e^{-\frac{W_p + W_k}{kT}} \vartheta^2 d\vartheta$ . Absolýut temperatura  $T = 0$  bolanda molekulalaryň hemmesiniň ýylylyk hereketi togtar we molekulalar ýer üstüne çöker.

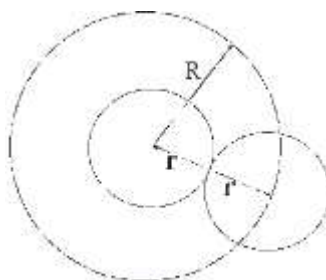
Bolsmanyň paýlanyş formulasyny ulanmak esasynda eksperiment usulynda Awogadronyň sanyny kesgitlemek mümkin, ýagny  $N_A = \frac{RT}{mg(h-h_0)} \ln \frac{n_0}{n}$ .

Şu formula girýän ululyklaryň köpüsi tejribe üsti bilen tapylýar. Şeýle tejribe 1906 ýylda fransuz fizigi Perren tarapyndan geçirilipdir. Onuň ol işleri üçin oňa Nobel baýragy hem berlipdir. Onuň tejribesinde gurşawyň şepbeşikligi we temperaturasy, şeýle hem emulsiýa dänejikleriniň ölçegi üýtgedilipdir. Islendik üýtgewde Awogadro sanynyň ululygy  $6,8 \cdot 10^{26}$  atom/kmol deň bolupdyr. Has takyk usulda geçirilen

tejribelerde bolsa ol sanyň  $N_A = 6,023 \cdot 10^{26}$  atom/kmol ululyga deňligi anyklanyldy. Awogadro sanyny bilip kilogram molekulanyň massasyny  $m = \mu/N_A$  formula bilen kesgitlemek mümkin.

**Molekulalaryň özara orta urgy sany we erkin ylgawynyň uzynlygy.** Goý, bize gapda saklanýan gaz molekulalary berlen bolsyn.

Seredilen molekuladan beýleki molekulalaryň hemmesi hereketsiz dynçlykda saklanýandyr diýip alalyň. Gözegçilik edýän molekulamyz ýylylyk hereketini ýerine ýetirende hereketsiz molekulalar bilen çaknyşýar. Her çaknyşygy urgy diýip hasap edeliň. Urgy pursatynda hereketli we hereketsiz molekulalar urgy netijesinde biri-birine ýakynlaşýarlar.



20-nji surat

Şol ýakynlaşma urgusy netijesinde olaryň merkezleriniň arasy iň kiçi aralyga golaýlaşyp bilse, şol iň kiçi golaýlaşyş aralygyna effektiv diametr diýlip at berýärler.  $\sigma = \pi d^2$  ululyga bolsa molekulanyň effektiv kese-keseği diýip at berilýär. Şeýle hem şol molekula 20-nji suratda görkezilen  $R$  radiusly silindriň içinde agyrlýk merkezi ýerleşen beýleki dynçlykdaky molekulalar bilen urgy edýär.

Bir birlik wagt dowamynda, berlen molekula  $\langle \vartheta_{göra} \rangle \cdot 1 = \langle \vartheta_{göra} \rangle$  ýoly geçer, bu ýerde  $\langle \vartheta_{göra} \rangle$  - molekulanyň görälikli tizliginiň orta bahasy.

Geçilen ýol bilen baglanyşykly silindriň göwrümini

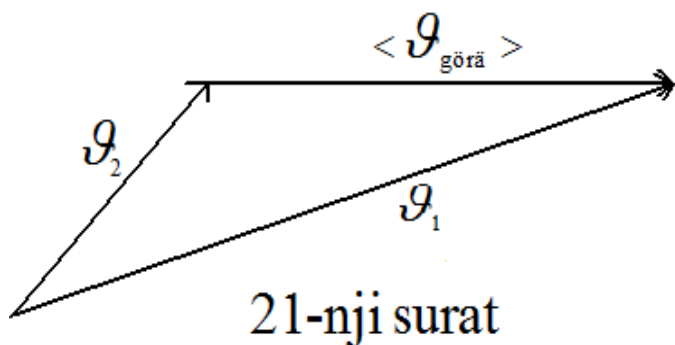
$$V = \langle \vartheta_{göra} \rangle \pi d^2 = \langle \vartheta_{göra} \rangle \sigma.$$

Ýokarda agzalan silindriň içine ýerleşýän molekulalarymyzyň  $z$  sanyny:  $z = n_0 \pi d^2 \langle \vartheta_{göra} \rangle = n_0 \sigma \langle \vartheta_{göra} \rangle$ , aňlatma bilen kesgitlemek mümkin. Munda  $n_0$  – göwrüm birligindäki molekulalaryň sany. Şol molekulalar bilen



hereketdäki molekula çaknyşýar diýsek  $z$  ululygymyz wagt birliginde hereketli molekulamyzyň hereketsiz molekulalar bilen eden urgysynyň orta sanyny aňladar,  $\langle z \rangle = n_0 \pi d^2 \langle \vartheta_{\text{görä}} \rangle$ .

Görälikli tizlik diýlende silindriň göwrümünde ýerleşen molekulalar we seredýän molekulamyz hemmesi hereketde bolýandyr diýlip düşünmeli. Şeýle hereketli molekulalaryň özara urgylary olaryň tizlikleri bilen häsiýetlendirilýär. Urga çenli molekulalaryň, deňşililikdäki tizlikleri  $\vartheta_1$  we  $\vartheta_2$  we ol tizlikleriň urgy arasyndaky burç  $\varphi$  bolsun, onda 21-nji suratdan görnüşi ýaly tizlikleriň san bahasy görälikli  $\langle \vartheta_{\text{görä}} \rangle = \vartheta_1 - \vartheta_2$  aňlatma bilen kesgitlener. Şol suratdaky



üçburçlykdan kosinuslary teoremasyny esasynda alarys:

$$\langle \vartheta_{\text{görä}}^2 \rangle = \vartheta_1^2 + \vartheta_2^2 - 2\vartheta_1\vartheta_2\cos\varphi.$$

Birnäçe ululygyň jeminiň orta bahasy şol ululyklaryň orta bahalarynyň jemine deňdir, onda

$$\langle \vartheta_{\text{görä}}^2 \rangle = \langle \vartheta_{\text{görä}}^2 \rangle + \langle \vartheta_{\text{görä}}^2 \rangle - 2\langle \vartheta_1\vartheta_2\cos\varphi \rangle.$$

Şu pikiri molekulalaryň tizlikleri bilen baglanyşdyrsak onda, hemme molekulalaryň absolyut tizlikleriniň kwadratynyň orta bahasynyň bire deň boljaklygy gelip çykýar,  $\vartheta_1^2 = \vartheta_2^2 = \vartheta^2$ . Molekulalar elmydama bitertip, bulam-bujar hereketde bolýandyklary üçin olar biri-biri bilen urgy edýärler. Urgy edýän molekulalaryň urgydan soňky tizlikleriniň ugry dürli bolup bilýänligi üçin  $\varphi$  burçy 0-dan  $180^\circ$  -a çenli aralykda

üýtgäp bilýär. Şol burçuň orta ululygy  $\langle \cos \varphi \rangle = 0$ . Onda  $\langle \vartheta_{\text{göra}}^2 \rangle = 2\vartheta^2$  ýa-da  $\langle \vartheta_{\text{göra}} \rangle = \sqrt{2} \langle \vartheta \rangle$ . Diýmek, molekulalaryň görälikli tizliginiň orta bahasy degişli absolýut tizlikleriň orta bahasyndan  $\sqrt{2}$  gezek uly ekeni. Wagt birligindäki urgy ululygynyň sany  $\langle z \rangle = \sqrt{2} n_0 \pi d^2 \langle \vartheta \rangle$  aňlatma deň bolar.

Eger-de molekulalaryň radiuslaryny  $r = 10^{-10}$  m;  $n_0 = 3 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$  (Loşmittiň sany);  $\langle \vartheta \rangle = 500 \text{ m/s}$  diýip alsak, onda hereketdäki molekulanyň sezewar bolýan urgularynyň umumy sany  $z = 3 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$ . Bu alnan urgy sanyndan görnüşi ýaly molekula bir sekundyň dowamynda 3 milliard urgy edip ýetişýär. Yzygiderli iki urgynyň wagt aralygynda molekulalar urgy etmän käbir aralygy geçip bilýär. Ol aralyga, has dogrusy molekulalaryň biri-birine urulman geçip bilýän  $\ell$  ýolunyň uzynlygyna onuň erkin ylgaw uzynlygy diýlip at berilýär we  $\lambda$  harpy bilen belgilenýär. Onuň orta uzynlygyny  $\langle \lambda \rangle$  bilen belgiläp alarys:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle \vartheta \rangle}{z} = \frac{\langle \vartheta \rangle}{\sqrt{2} n_0 \pi d^2 \langle \vartheta \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} n_0 \pi d^2}.$$

Ýokarky alnan formuladan görnüşi ýaly molekulalaryň erkin ýolunyň orta uzaklygy göwrüm birligindäki molekulanyň sanyna  $n_0$  ters proporsional. P, n we  $\lambda$  arasyndaky baglanşyk  $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_{02}}{n_{01}} = \frac{P_2}{P_1}$  bu ýerden  $\langle \lambda \rangle \sim \frac{1}{P}$ . Molekulanyň erkin ýolunyň orta uzynlygy hemişelik temperaturada ( $T = \text{const}$ ) gazyň basyşyna ters proporsionaldyr.

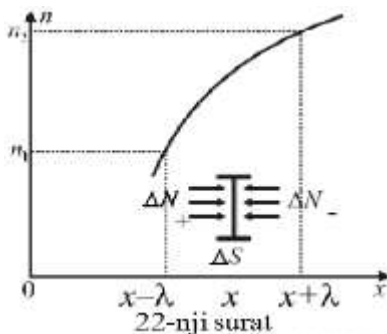
**Releksasiya wagty.** Suwuklyk, gaz toplumynyň ýada ulgamyň dowamly deňagramly, "oturumly" bolmagy üçin gerek bolan wagt, aralagyna releksasiya wagty diýilýär we  $\tau = \tau_0 e^{\frac{U}{kT}}$  formula bilen kesgitlenilýär. Bu ýerde:  $k$  – Bolsmanyň hemişeligi,  $T$  – absolýut temperatura,  $U$  – berlen madda mahsus bolan ululyk bolup, jisimiň termodinamiki halyna we suwuklyk bölejikleriniň wagtlaýyn deňagramlylyk halyndan goňşy hala geçendäki energiýasyna bagly.

## Geçiş hadysalary

**Termodinamik deňagramsyz ulgamlarda geçiş hadysalary.** Termodinamikada işçi jisim diýen düşünje girizilýär. İşçi jisim hökmünde gaz, ýa-da gaz garyndylary, ýa-da bolmasa suwuklyklar göz önüne getirilýär. Meselem: içinden ýandyrylýan diwigatellerde işçi jisim hökmünde howanyň we benziniň garyşan molekulalaryny, sowadyjy abzallarda freon gazynyň molekulalaryny we ş. m. göz önünde tutulýar.

Berlen işçi jisimde termodinamik deňagramlylyk bozulanda amala aşýan hadysa geçiş hadysasy diýilýär. Şeýle hadysalar fiziki kinetikada giňden öwrenilýär. Olaryň hatarynda diffuziya, ýylylyk geçirijilik we içki sürtülme durýar. Sanap geçeň hadysalarymyzyň içki mehanizmi molekulalaryň özara garyşmagyna getirýän bitertip ýylylyk hereketidir. Diffuziýada bir jisimiň molekulalarynyň arasyna başga bir jisimiň molekulalary aralaşýar, ýagny madda geçişi, icki sürtülmede - hereket mukdarynyň, ýagny impulsyň geçirilişi, ýylylyk geçirijilikde bolsa-ýylylyk mukdarynyň bir jisimden beýlekisine berlişi bolup geçýär.

**Diffuziýanyň, ýylylyk geçirijiligiň we içki sürtülmäniň tejribe kanunlary. Ol hadysalaryň molekulýar kinetik nazaryýeti.** Diffuziya hadysasyny öwrenmek üçin konsentrasiýasy  $n$  bolan gaz garyndysyna



seredeliň. Berlen wagıt pursatynda şol garyndynyň dürli nokatlarynda onuň konsentrasiýasy bir meňzeş däl-de giňişligiň  $x$  koordinatasyna baglylykda üýtgeýär diýeliň.

Koordinatasyny  $x$  b o l a n nokadynda

g a r y n d y n y ñ konsentrasiyasy  $n$ , goňşy  $\Delta x$  aralykda ýerleşen nokatda şol garyndynyň konsentrasiýasy  $n + \Delta n$  bolsun. Şu ýerde getirilen  $\Delta n$  konsentrasiýanyň artymy  $n$ -den sagynda-köp (polozitel), cepinde -az (otrisatel) bolup biler, çünki molekulalar ýylylyk hereketiniň netijesinde garyndynyň köp ýerinden az ýerine ugrukdyrlan bitertip hereketi ýerine ýetirerler.

Şeýlelikde molekulalaryň  $\Delta N$  akymy 22-nji suratda görkezilen  $\Delta S$  meydançadan  $x$  okunyň položitel ugruna  $\Delta t$  wagtda gecmekligi,  $\Delta N_+ = \frac{1}{6} n_1 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t$  aňlatma bilen, kesgitlener. Bu aňlatmadaky  $n_1$  synag meydançasyndan çepden  
saga  
geçýän molekulalaryň k o n s e n t r a s i y a s y. H a s

a p l a m a k l y g y sadalaşdyrmak üçin molekulalar synag meýdançasynda erkin ylgawynyň orta  $\lambda$  uzynlygyna deň bolan aralykda özara urgy edip ýetişýärlar hasap edeliň. Şol aralykda molekulalaryň konsentrasiyasy hemişelik galýar, ýagny  $x$ - $\lambda$  tekizlikde  $n_1$  we  $x + \lambda$  tekizlikde  $n_2$ .

Garyndynyň molekulalarynyň sagdan çepde ugrukdyrylan akymy  $\Delta N$  22-nji suratda görkezilen  $\Delta S$  synag meydançasyndan  $x$  okunyň otrisatel ugruna şol  $\Delta t$  wagtda, gecmekligi  $\Delta N_- = \frac{1}{6} n_2 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t$ , aňlatma bilen kesgitlener. Bu aňlatmadaky  $n_2$  synag meydançasyndan sagdan çepde geçýän molekulalaryň konsentrasiýasy.

$x$  okunyň položitel ugruna synag meýdançasyndan geçýän jemleyji diffuziýa akymy ýokarda beýan edilen çepden saga we sagdan çepde akymalaryň tapawudyna deňdir, ýagny

$$\Delta N = \Delta N_+ - \Delta N_-.$$

Wagt birliginde, meýdan birliginden geçýän molekulanyň akymyny  $j$  harpy bilen belgilesek, onuň ululygy:

$$j = \frac{\Delta N}{\Delta S \Delta t} = \frac{1}{6} (n_1 - n_2) \langle \vartheta \rangle = - \frac{1}{3} \langle \vartheta \rangle \lambda \frac{n_2 - n_1}{2\lambda} = - \frac{1}{3} \langle \vartheta \rangle \lambda \frac{\Delta n}{\Delta x}$$

aňlatma bilen kesgitlenip bilner. Bu aňlatmadaky  $\Delta n / \Delta x$  gatnaşyga  $x$  okuna parallel bolan konsentrasiýanyň gradiýenti diýilýär we  $x$  okunyň ugrundaky giňişlikde konsentrasiýanyň

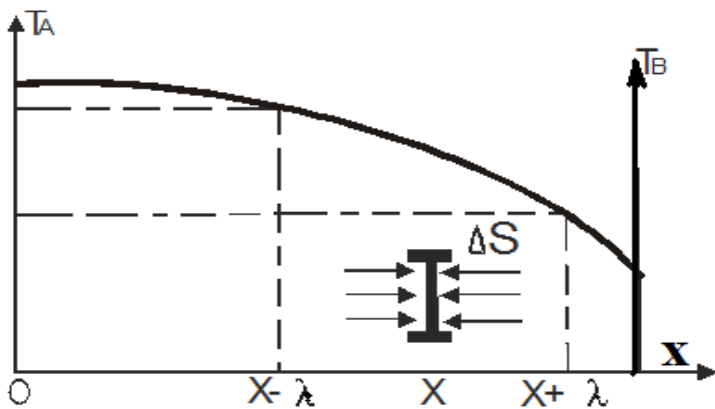
üýtgeýiş çaltlygyny häsiýetlendirýär. Eger-de  $\frac{1}{3}\langle \vartheta \rangle \lambda$  köpeltmek hasylyny  $D$  harpy bilen belgilesek, onda diffuziýa kanunynyň formulasyny umumy görnüşde aşakdaky ýaly ýazarys:

$$j = -D \frac{\Delta n}{\Delta x}.$$

Alnan formulanyň okalyşy: bir birlik meýdandan bir birlik wagtda diffuziýa esasynda geçýän garyndynyň molekulalarynyň akymy konsentrasiýanyň gradiýentine proporsionaldyr. Minus alamaty molekulalaryň akymynyň we konsentrasiýanyň gradiýentiniň gapma-garşy ugrukdyrlandygyny aňladýar, ýagny akym molekulalaryň konsentrasiýasynyň azalan tarapyna ugrukdyrlandyr. Diffuziýa koeffisiýenti  $D = -\frac{1}{3}\langle \vartheta \rangle \lambda$ . Eger-de,  $\frac{\Delta n}{\Delta x} = 1$  bolsa, onda  $j = D$ , ýagny diffuziýa koeffisiýenti bir birlik meýdandan bir birlik wagtda, konsentrasiýanyň gradiýenti bire deň bolandaky molekulalaryň akymynyň ululygyna sanma-san deňdir.

**Ýylylyk gecirijilik hadysasy.** Ýylylyk gecirijilik käbir ýylylyk mukdarynyň  $\Delta Q$  gyzgyn gatlakdan sowuk gatлага geçmegini häsiýetlendirýär. Bu hadysanyň amala aşmagy üçin molekulalaryň ýylylyk hereketini ýerine ýetirmegi ýeterlik. Şol pursatda jisimiň gaty gyzan ýerinden gozganan molekulalar az gyzan goňşy molekulalar bilen çakyşyp, özlerindäki energiýalarynyň bir bölegini olara berýärler.

23-nji suratda görkezilişi ýaly ýokary temperaturada gyzan, temperaturasy  $T_A$  we temperaturasy pes  $T_B$  bolan iki sany diwar berlen bolsun. Temperaturanyň üýtgeýşi diňe bir tarapa, ýagny beýik temperaturaly diwardan pes temperaturaly diwara  $x$  okunyň ugruna gönükdirilýär diýip alalyň. Käbir  $\Delta t$  wagtda çepden saga gözegçilik edilýän  $\Delta S$  meydançamyzdan,



$\Delta N_+$  sany molekula geçýär, ýagny  $\Delta N_+ = \frac{1}{6} n_1 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t$ . Molekulalaryň orta energiýasy  $\langle \varepsilon \rangle$  energiýanyň  $\varepsilon$  bahasyna diňe soňky gezek biri-biri bilen urgy edenlerinde synag meýgançamyzdan ( $\Delta s$ ) molekulalaryň erkin ylgawynyň uzynlygyna  $\lambda$  barabar bolan aralykda deň bolýar diýeliň. Şeýle hem  $x$ - $\lambda$  aralykda temperaturanyň ululygy  $T_1$  we  $x+\lambda$  aralykda  $T_2$  bolsun. Seredýän gazymyzyň molekulalary bir atomly bolsun, onda bir atomly molekulanyň öňe hereketiniň orta kinetik energiýasy çep tarapda  $\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{3}{2} kT_1$  we sag tarapda  $\langle \varepsilon_2 \rangle = \frac{3}{2} kT_2$ . Degişlilikde, çepden saga geçýän molekulalaryň sany ýokarda kesgitlenen. Onda, meňzeşlikde sagdan çep  $\Delta S$  meydanaçadan  $\Delta t$  wagtda geçýän molekulalaryň sany aşakdaky ýaly kesgitlener:

$$\Delta N_- = \frac{1}{6} n_2 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t.$$

Şeýlelikde, energiýanyň  $\Delta S$  meýdançadan  $x$  okunyň polozitel tarapyna geçýän doly akymy garşylykly iki akymyň tapawudyna deň, ýagny,

$$\Delta Q = \langle \varepsilon_1 \rangle \Delta N_+ - \langle \varepsilon_2 \rangle \Delta N_- = \frac{1}{6} n \langle \vartheta \rangle (T_1 - T_2) k \Delta S \Delta t.$$

Meýdan birliginden wagt birliginde geçýän ýylylyk akymy Furýeniň formulasy bilen kesgitlenýär:

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t} = \frac{1}{3} n \langle \vartheta \rangle \lambda \frac{T_1 - T_2}{2\lambda} \cdot \frac{3}{2} k = \frac{1}{3} \langle \vartheta \rangle \lambda \frac{3}{2} k n \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\eta \frac{\Delta T}{\Delta x}.$$

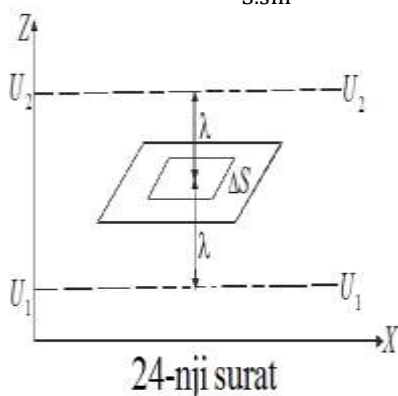
Oňa udel akym hem diýilýär. Onuň ululygy temperaturanyň  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$  gradiýentine proporsional. Formuladaky minus alamaty ýylylyk akymynyň temperaturanyň beýgelyň tarapyna ugrukdyrylandygyny görkezýär. Ýylylyk temperaturanyň azalýan ugruna gönükdirilendir. Eger-de  $\frac{\Delta T}{\Delta x} = 1$  bolsa, onda  $q = \eta$ , ýagny bir birlik wagt dowamynda bir birlik galtaşýan meýdançalardan geçýän ýylylyk mukdary ýylylyk geçirijilik koeffisiýentine deňdir. Bu aýdylanlar ýylylyk geçirijilik koeffisiýentiniň fiziki manysyny aňladýar.

**Içki sürtülme.** Içki sürtülme gazlarda we suwuklyklarda, olar akan pursatynda ýüze çykýar. Şol pursatda olaryň dürli ýerlerinde akym tizligi dürli, ýagny birmeňzeş däl. Bu bolsa şeýle akymyň deňagramsyzlygyny ýüze çykaryp, ondaky geçýän hadysalar akymyň tizligini suwuklygyň, ýa-da gazyň hemme ýerinde deňleşdirjek bolup ymtylýar. Muňa içki sürtülme ýa-da şepbeşiklik diýilýär. Içki sürtülme hadysasynda molekulalarda ýylylyk hereketiniň barlygy üçin suwuklygyň (gazyň) çalt akýan ýerlerinden haýal akýan ýerlerine impulsyň berlişi bolup geçýär. Suwuklyk ýa-da gaz bir ugra akýar diýip göz önüne getireliň. Akymyň tizlik wektory akymyň ugryna görä hemişelik ululyk. Onuň ululygy diňe tizlige perpendikulýar ugurda üýtgeýär.

Içki sürtülme güýji tizligiň gradiýentine proporsionaldyr, ýagny  $f = \eta \frac{\Delta U}{\Delta Z} \Delta s$ . Sürtülme güýjiniň formulasyndaka  $\eta$  harpa içki sürtülme koeffisiýenti diýilýär. Ol suwuklygyň (gazyň) tebigatyna bagly. Şol koeffisiýentiň ulalmaklygy gazy hyýaly gazdan tapawutlandyrýar. Içki sürtülmä şepbeşiklik hem diýilýär. Şepbeşikligiň gazda we

suwuklykda ýokarlanmagy şol suwuklykda (gazda) içki sürtülme güýjüniň ulalýandygyny görkezýär. Ölçege birligi:

$$[\eta] = 1 \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{sm}} = 1 \text{ Puaz}.$$



Akymyň bir ýerinden beýleki ýerine impulsyň berliş çaltlygyny şepbeşiklik koeffisiýenti häsiýetlendirýär. Munuň şeýledigini subut etmek üçin  $U$  durli tizlikli gatlaklara parallel bolan, 24-nji suratda görkezilen  $\Delta S$  meýdançany göz önüne getireliň.  $U_1$  tizlikli

gatlak ol meýdançanyň aşagynda,  $U_2$  tizlikli gatlak bolsa ol meýdançanyň ýokarsynda, deňşililikde, molekulanyň erkin ylgawynyň orta uzynlyk ýoluna deň bolan  $\lambda$  aralykda ol meýdançalar ýerleşen bolsunlar. Şeýle bolanda birinji gatlagyň ýokarsynda ýerleşen  $\Delta S$  meýdança ugrukdyrylan molekulalar, şol meýdança çenli bolan  $\lambda$  aralygy biri-birine urulman geçerler. Edil şonuň ýaly  $\Delta S$  meýdançanyň ýokarsynda ýerleşen gatlakdan şol meýdança ugrukdyrylan molekulalar hem şol  $\lambda$  aralygy biri-birine urulmazdan geçerler. Onda  $\Delta S$  bir birlik meýdançadan bir birlik wagtda aşakdan ýokaryk geçýän molekulalaryň sany  $\Delta n_1 = \frac{1}{6} n_0 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t$ , ýokardan aşak geçýän molekulalaryň sany bolsa  $\Delta n_2 = \frac{1}{6} n_0 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t$  aňlatmalar bilen kesgitlenilýär.  $\Delta n_1$  we  $\Delta n_2$  sany molekulalaryň, deňşililikdäki, geçirýän impulsalarynyň ululyklary:

$$\Delta K_1 = \Delta n_1 m u_1 = \frac{1}{6} n_0 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t m u_1$$

$$\Delta K_2 = \Delta n_2 m u_2 = \frac{1}{6} n_0 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t m u_2$$



aňlatmalar bilen kesgitlenip bilner. Aşakdan ýokaryk we ýokardan aşak geçirilen garşylykly impulsalaryň tapawudy:

$$\Delta K = \Delta K_2 - \Delta K_1 = \frac{1}{6} n_0 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t (m u_2 - m u_1)$$

aňlatma bilen kesgitlener.

$U_1$  we  $U_2$  tizlikleriň tapawudynyň  $\frac{\Delta U}{\Delta Z}$  tizligiň gradiýentine deňdigini we ol iki gatlagyň aralyklarynyň  $2\lambda$  deňligini, ýagny  $m U_2 - m U_1 = \frac{\Delta U}{\Delta Z} 2\lambda$ , göz önünde tutup alarys,  $\Delta K = -\frac{1}{6} n_0 \langle \vartheta \rangle \Delta S \Delta t \frac{\Delta U}{\Delta Z} 2\lambda$ .

Şeýle hem  $\Delta V=1$  we  $\rho=n_0 m$  bolany ucin

$$\Delta K = -\frac{1}{3} \rho \lambda \langle \vartheta \rangle \frac{\Delta U}{\Delta Z} \Delta S \Delta t.$$

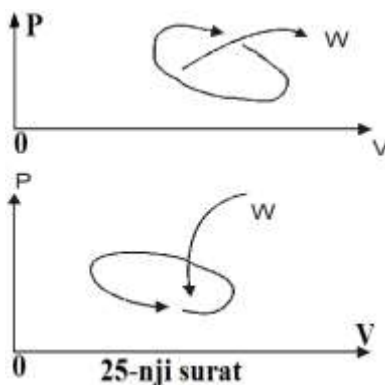
Pes akymly gatlagyň çalt akymly  $\Delta S=1\text{m}^2$  meýdanly gatлага  $\Delta t=1\text{s}$  wagıt biriginde edýän täsir güýjüniň ululygy:  $f = -\frac{\Delta K}{\Delta S \Delta t} = \frac{1}{3} \rho \lambda \langle \vartheta \rangle \frac{\Delta U}{\Delta Z} = \eta \frac{\Delta U}{\Delta Z}$  aňlatma bilen kesgitlenilýär.

Netijede,  $\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda \langle \vartheta \rangle$  şepbeşiklik koeffisiýentini hasaplamaga degişli formulany alarys. Şol formula girýän suwuklygyň (gazyň) dykyzlygy  $\rho$  şol suwuklygyň (gazyň) basyşyna göni proporsional, molekulanyň erkin ylgawynyň orta uzynlygynyň ýoly suwuklygyň (gazyň) basyşyna ters proporsional, diňe suwuklyk (gaz) molekulalarynyň orta tizligi şol suwuklygyň (gazyň) basyşyna bagly däl. Ýöne, dykyzlygyň göni, orta ylgaw ýolunyň suwuklygyň (gazyň) basyşyna ters proporsionaldygy üçin şol ikisiniň köpeldilmek hasyly  $\rho \lambda$  basyşa bagly däl. Şeýlelikde, şepbeşiklik koeffisiýenti şol suwuklygyň (gazyň) basyşyna bagly däl, çünki basyş kiçelse impulsy gatlaklaryň birinden beýlekisine geçirýän molekulalaryň umumy sany azalýar, oňa derek ol molekulalaryň erkin ylgawynyň orta uzynlyk ýoly ulalýar. Şol sebäplere görä dürli tarapa täsir edip bir gatladan beýleki gatлага geçirilýän impulsyň ululygy hemişelik galýar.

**Öwrülišikli we öwrülišiksiz hadysalar.** Tebigatda geçýän ýylylyk hadysalarynyň hemmesi özleriniň

deňagramlylyk ýagdaýyna ymtylýar we şol halda uzak pursat saklanýar. Hadysa tükeniksiz haýal geçýän bolsa, şeýle hadysa hem deňagramly hadysa hökmünde seredilip bilner. Tebigatda bolup geçýän ähli hakyky hadysalar deňagramsyz hadysalardyr.

Ulgamy düzýän bölejikler hemişe bitertip hereket edýän bolsalar-da ulgamyň makroskopik ululyklary kesgitli baha eýe bolup, uzak möhlet hemişelik saklanyp bilse, ulgamyň şeýle halyna **t e r m o d i n a m i k** deňagramlylyk haly diýilýär. Käbir ýagdaýlarda



ulgamyň öwrülišiksiz haly duýardan juda ujypsyz bolan pursatynda hem hadysany öwrülišikli diýip kabul etmek mumkin.

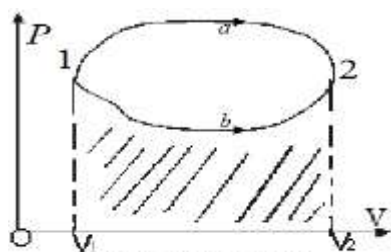
Hadysanyň öwrülišikli bolmagy üçin şol hadysa amala aşyp, özüniň başky halyna gaýdyp gelende onuň daşyny gurşap alan gurşawda üýtgeşiklik, ýagny özgerişler bolmaly dälär.

### **Aylawly hadysalar (sikiller)**

Hadysanyň amal edilmegi üçin işçi jisim başky halyndan çykyp, aralyk hallary geçenden soň täzeden özüniň başky 25-nji suratda görkezilen halyna gaýdyp gelýän bolsa, şeýle hadysa aylawly hadysa diýilýär. Şeýle aylaw 25-nji suratda görkezilişi ýaly ýapyk egri görnüşlidir.

26-nji suratda görkezilen aylawly hadysada işçi jisim 1-nji halyndan 2-nji halyna durli egriler bilen gecip bilýär. Sagat peýkamynyň ugruna ýa-da tersine geçip, soňra özüniň başky 1-nji halyna gelip biler. Geçiş pursatynda ulgamyň

ýerine ýetirýän işiniň ululygy  $S_{1a2V_2V_{11}}$  we  $S_{1b2V_2V_{11}}$  meýdanlara san taýdan deň. Bu meýdanlaryň ululygy, grafikden görnüşi ýaly, biri-birine deň däl. Diýmek iş doly differensial bolmaz.

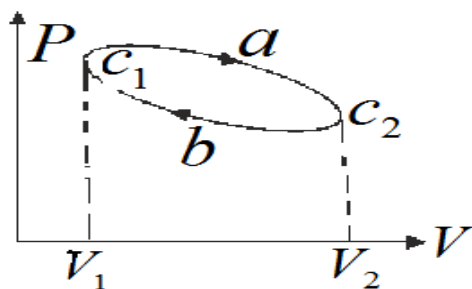


26-njy surat

Hadysa sagat peýkamynyň ugruna amal edilse, onda 25-nji suratda görkezilişi ýaly işçi jisimiň ýylylyk energiýasy mehaniki energiya öwrülýär.

Hadysa 25-nji suratda görkezilişi ýaly sagat peýkamynyň tersine amal edilse, onda işçi jisim daşky işiň amal edilmegi netijesinde, ýagny mehaniki energiýanyň harçlanmagy bilen ýylylyk energiýasyny özüne kabul edip alýar. Mehaniki energiýa ýylylyk energiýasyna öwrülýär.

**Ýylylyk dwigatelleri we sowadyjy maşynlar.** Goý, bize 27-nji suratda görkezilen aýlaw hadysasyny ýerine



27-nji surat

ýetirýän käbir m massaly hyýaly gaz berlen bolsun. Ol gaz ýapyk aýlawly  $C_1aC_2bC_1$  hadysa gatnaşýar. Ol gazıň  $C_1$  halynda icki energiýasy  $U_1$  we  $C_2$  halynda  $U_2$  bolsun. Şol gazıň  $C_1$  haldaky

gowrümü  $V_1$  we  $C_2$  halyndakysy  $V_2$  bolsun. Gaz  $C_1$ -den  $a$ -nyň üsti bilen  $C_2$  halyna geçende onuň göwrümi ulalýar. Yzyna  $C_2$ -den  $b$  aralyk boýunça  $C_1$  halyna gaýdyp gelende onuň göwrümi  $V_2$ -den  $V_1$ -e çenli kiçelýär.  $C_1aC_2$  hallar aralygynda gaz  $Q_1 > 0$  ýylylyk mukdaryny özüne kabul etse,  $C_2bC_1$  hallar aralygynda bolsa  $Q_2 > 0$  ýylylygy özündan daşky

gurşawa berýär. Onda termodinamikanyň birinji başlangyjy esasynda:  $Q_1=U_2 - U_1+A_1$ ,  $-Q_2=U_1 - U_2+A_2$  deňlemleri alarys. Şu iki deňligiň çepini çepi, sagyny sagy bilen goşup alarys:

$$A=A_1 + A_2= Q_1-Q_2.$$

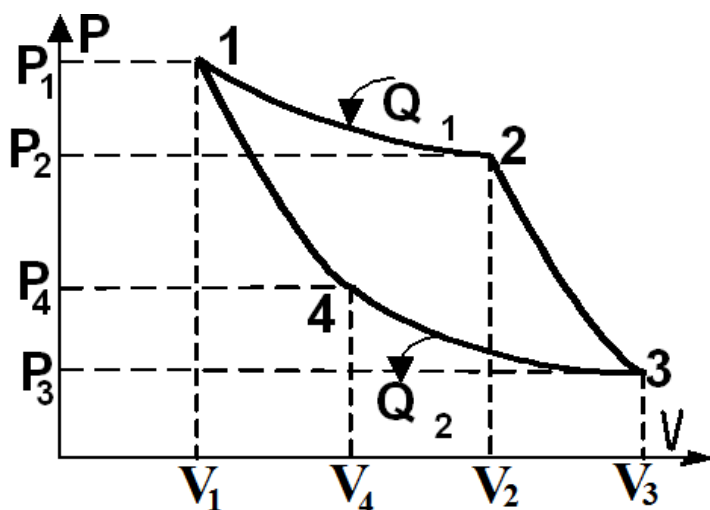
Alnan bu aňlatmadan görnüşi ýaly aýlawly hadysa netijesinde işçi jisimiň alan  $Q_1$  ýylylyk mukdary, yzyna gaýdyp berýän  $-Q_2$  ýylylyk mukdaryndan uly ekeni. Şol ýylylyklaryň tapawudynyň  $Q_1-Q_2$  hasabyna işçi jisim iş ýerine ýetirýär. Şeýle hadysany ýylylyk dwigatelleri amal edýär. Eger-de hadysa tersine geçip işçi jisimiň kabul edip alýan ýylylygy  $-Q_2$  deň bolup, daşky gurşawa berýän  $Q_1$  ýylylygy  $-Q_2$  ýylylykdan uly, ýagny  $Q_1=-Q_2+A$  ýerine ýetirilýän bolsa beýle aýlawda işleýän maşyna sowadyjy maşynlar diýilýändigini ýatlatmaklyk zerur. Bu maşynlar daşky güýçleriň hasabyna iş amal edip, işçi jisimiň kömegi bilen sowuk jisimden käbir  $Q_2$  ýylylygy işçi jisime aldyryp, ol ýylylygy temperaturasy ýokary jisime berdirýär. Netijede, içki ýylylygy alynýan jisim sowayar.

### Karnonyň aýlawy

**Karnonyň aýlawy we onuň hyýaly gaz üçin peýdaly täsir koeffisiýenti (PTK).** Karnonyň aýlawy öwrümlü hadysa bolup iki izotermadan we iki adiabatadan durýar. Şu aýlawyň amal edilmegi üçin, gazyň izotermik giňelen pursatynda oňa degişli ýylylyk mukdaryny bermek üçin gyzdryjy we şol gaz gysylanda ondan käbir ýylylyk mukdaryny kabul edip alary ýaly sowadyjy gerek. Aýlawyň amala aşyrylyşyny häsiýetlendirýän PV diagramma 28-nji suratda görkezilen. Şol aýlawyň amala aşyrylmagyna hyýaly gazyň 1Kmol mukdary berlipdir diýeliň. Gazyň başlangyç halyndaky ululyklary  $P_1, V_1, T_1$ , bolsun we şol aýlaw 1-lik san bilen bellenen nokatdan başlanyp dört bölekden düzülip, bir aýlawy emele getirsin:

1. Ilkinji amal edilýän hadysada gazy 1-nji haldan 2-nji hala geçirmek üçin, şol gazy (işçi jisimi) gyzdryjy bilen galtaşdyrylan pursatynda, temperaturasyny üýtgetmezden

( $T=\text{const}$ ), gyzdyryjydan käbir  $Q_1$  ýylylyk mukdaryny alar ýaly şert döredilýär diýeliň. Gaz izotermik giňelmäge sezewar edilýär, ýagny onuň göwrümi  $V_1$ -den  $V_2$  çenli ulalýar, basyşy



28-nji surat

$P_1$ -den  $P_2$  çenli kiçelýär.

2. Işçi jisime (gaza) gyzdyryjynyň degip durmazlygyny amal edeliň. 2-nji nokatdan ululyklary  $P_2$ ,  $V_2$  we  $T_2$  bolan şol işçi jisimi, ýylylykdan goraglanan ýagdaýynda, adiabatik giňeltmek esasynda 3-nji nokatdaky halyna geçireliň. Gaz adiabatik giňelende onuň içki energiýasy azalyp, temperaturasy  $T_2$  çenli aşak düşýär, ýagny  $T_2 < T_1$  hala geçýär.

3. Işçi jisim 3-nji nokatdaky halyna geçende ony sowadyjy bilen galtaşdyrallyň. Şol pursatda onuň ululyklary  $P_2$ ,  $V_3$  we  $T_3$ . Şondan soň işçi jisimi 3-4 aralykda hemişelik  $T_2$  temperaturada gysalýň. Izotermik gysylan gazdan sowadyjy  $Q_2$  ýylylygy özüne kabul edýär.

4. Işçi jisimiň 4-nji nokatdaky halyny kesgitleýän ululyklary  $P_4$ ,  $V_4$  we  $T_4$  bolanda ony sowadyjynyň degip

durmasyndan aýrallyň. Soňra ýylylyk goraglanan ýagdaýynda işçi jisimi adiabatik gysylyşa sezewar edeliň. Adiabatik gysylan işçi jisim 4-nji nokatdan başky 1-nji nokatdaky halyna geler. Onuň şol hadysada içki energiýasy ýokarlanar we temperaturasy  $T_2$ -den  $T_1$  geçär, ýagny  $T_1 > T_2$ .

Şeýlelikde, işçi jisim doly bir aýlawy amal edýär, ýagny 28-nji suratda görkezilen halkalaýyn 1-2-3-4-1 hadysa bolup geçär. Netijede, gyzdyryjy  $Q_1$  ýylylyk mukdaryny işçi jisime berer, sowadyjy bolsa işçi jisimden  $Q_2$  ýylylyk mukdaryny kabul edip alar, ýagny  $Q_2 < Q_1$ . Ol ýylylyklaryň tapawudy işçi jisimiň peýdaly ýerine ýetirip bilen işiniň ululygyny kesgitleýär, ýagny  $A = Q_1 - Q_2$ . Ýöne, adiabatik hadysalarda ýerine ýetirilýän işler içki energiýanyň kiçelmegi, soňra ulalamagy bilen biri-biriniň öwezini doldurýar.

Izotermik hadysada ( $T_1 = \text{const}$ ) gyzdyryjydan işçi jisim  $Q_1$  ýylylygy alanda göwrümi  $V_1$ -den  $V_2$  çenli ulalmagy üçin ol ýylylyk mukdaryny göwrümiň üýtgemesi bilen aňlatmak mümkin, ýagny  $Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$ .

Işçi jisim gysylanda bolsa 3-4 aralykda onuň göwrümini  $V_3$ -den  $V_4$  çenli ulaltmak üçin  $Q_2$  ýylylyga deň bolan işiň edilmegi zerur bolýar. Hemişelik temperaturada ( $T_2 = \text{const}$ ) göwrümi  $V_3$ -den  $V_4$  çenli ulaldylanda sowadyjynyň alan ýylylyk mukdaryny  $Q_2 = RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$  formula bilen kesgitlemek mümkin.

Peýdaly işiň gyzdyryjynyň işçi jisime beren  $Q_1$  ýylylyk mukdaryna bolan gatnaşygy Karnonyň aýlawyny ýerine ýetirýän ýylylyk maşynynyň peýdaly täsir koeffisiýentini kesgitleýär:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Ýokarda  $Q_1$  we  $Q_2$  ýylylyklary hasaplamak üçin ýazylan formulalary, ýylylygyň we işiň özara özgermelerini

öwrenen Karnonyň we onuň aýlawynyň ýylylyk maşyny üçin PTK-synyň formulasyna goýup alarys:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}.$$

Işçi jisim (gaz) 2-den 3-e çenli adiabatik giňelende  $(\frac{V_2}{V_3})^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1}$  gatnaşyk we 4-den 1-e çenli adiabatik gysylanda bolsa  $(\frac{V_1}{V_4})^{\gamma-1} = \frac{T_2}{T_1}$  gatnaşyk dogrudyr. Bu gatnaşyklaryň esasynda  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$  deňlik gelip çykýar. Onda ýylylyk maşynynyň peýdaly täsir koeffisiýentini absolýut temperaturalaryň tapawudynyň  $T_1 - T_2$ -niň,  $T_1$  bolan gatnaşygy bilen aňladyp alarys,  $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ . Okalyşy: hyýaly ýylylyk maşynynyň Karnonyň aýlawyna degişli PTK-si ýylylyklaryň tapawudynyň  $Q_1 - Q_2$  -niň gyzdyryjynyň berýän ýylylygynyň ululygyna bolan gatnaşygyna deňdir. Başgaça:  $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ . Okalyşy: hyýaly ýylylyk maşynynyň Karnonyň aýlawyna degişli PTK-si absolýut temperaturalaryň tapawudynyň  $T_1 - T_2$ -niň gyzdyryjynyň absolýut temperaturasynyň ululygyna bolan gatnaşygyna deň, ýagny PTK gyzdyryjynyň berýän we sowadyjynyň alýan ýylylygyna, ýa-da olaryň absolýut temperaturalaryna bagly.

### **Termodinamikanyň ikinji başlangyjy.**

Termodinamikaniň birinji başlangyjyndan bilişimiz ýaly islendik ýylylyk hadysasynyň amal edilmegi üçin ulgamyň (jisimiň) doly energiýasy üýtgeşsiz galmaly. Aýdalyň ýylylyk energiýasynyň mehaniki energiýa dolulygyna öwürilmegini termodinamikanyň birinji başlangyjy inkär edenok, ýöne beýle doly öwürüliş mümkin däl. Şeýle öwürüşigiň bolmak, ýagny

amala aşmak mümkinçiligini termodinamikanyň ikinji başlangyjy has hem çäklendirýär.

Özbaşdaklyk berlen jisimler ulgamy elmydama ýylylyk deňagramlylygyna ymtylýar. Ol jisimler biri-birine görä dynçlykda bolup, deň temperatura we basyşa eýedir. Ýylylyk deňagramlylyk halyndaky jisimler ulgamy öz-özünden şol haldan çykyp we daşdan täsir etmezden ol ulgamda islendik hadysa öz-özünden geçip bilmez. Ýylylyk deňagramlylygynda bolan jisimleriniň kömegi bilen hiç hili iş edip bolmaz, çünki iş mehaniki hereketiň ýerine ýetirilmegi, energiýanyň jisimleriniň kinetik energiýasyna öwürilmegi bilen baglanyşykly. Şeýle tassyklamanyň, ýagny ýylylyk deňagramlylygynda bolan jisimleriniň energiýasynyň hasabyna iş edip bolmaz diýilmeginiň özi termodinamikanyň ikinji başlangyjydyr. Bu başlangyjy, asly manylary şol bir zat bolsa-da, dünýä belli alymlar özleriçe dürli-dürli teswirläpdirler:

1. Klauzius (Anglýa): ýylylyk sowuk jisimden ýyly jisime öz-özünden geçip bilmez;

2. Tomson (Kelwin): haýsydyr bir jisimiň ýylylygyny diňe şol jisimi sowadýmasaň daşdan hiç hili täsir etmezden işe öwürmek mümkin däl.

**Karnonyň aýlawynyň PTK-niň işçi jisimiň (gazyň) tebigatyna bagly dälligi.** Öň belleýsimiz ýaly Karnonyň aýlawynyň PTK-ni ýylylyklaryň ýa-da absolýut temperaturalaryň gatnaşygy bilen aňladyp bolýar, ýagny

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad \text{we} \quad \eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Bu deňlikleriň çepi şol bir zat, onda olaryň sagyny özara deňleşdirip alarys:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{ýa-da} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}.$$

Alnan soňky aňlatmadan görnüşi ýaly Karnonyň aýlawynyň amal edilmeginde sowadyja berlen  $Q_2$  ýylylyk mukdarynyň gyzdyryjydan işçi jisimiň alan  $Q_1$  ýylylyk mukdaryna bolan gatnaşygy degişli absolýut temperaturalaryň



gatnaşygyna deňdir. Şu gatnaşyk islendik fiziki we himiki häsiýeti bolan jisim üçin dogrudyr. Şonuň üçin ol gatnaşyk termometrik jisimiň häsiýetine we termometriň işleýiş aýratynlygyna bagly bolmadyk temperaturanyň termodinamiki absolýut şkalasyny gurmaklyga mümkinçilik berýär.

**Entropiýa.** Absolýut temperaturalaryň we ýylylyklaryň gatnaşyklaryndan ybarat bolan

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \text{ deňlikden alarys: } \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

Şu soňky deňlikdäki  $Q_2$  ýylylygyň işçi jisimden sowadyja berilýändigini göz önünde tutsak ol ýylylyk otrisateldir, ýagny  $-Q_2$ . Onda  $\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$ .

Bu deňlemeden görnüşi ýaly aýlawly hadysalarda işçi jisimiň alan ýa-da beren ýylylyk mukdary absolýut temperatura barabardyr. Olaryň gatnaşyklarynyň jemi bolsa nola deňdir. Ýylylygyň absolýut temperatura bolan gatnaşygyna  $\frac{Q}{T}$  - getirilen ýylylyk mukdary diýilýär. Ol gatnaşyga şeýle ady ilkinji bolup nemes alymy Lorens beripdir.

Islendik aýlawly hadysa üçin getirilen ýylylyk mukdarynyň jemini,  $\sum \frac{\Delta Q}{T} = 0$ , görnüşde yazyp bileris. Ýatladylýan aýlawyň juda ujypsyz aralygy üçin getirilen ýylylyk mukdaryny aýlaw integralyň üsti bilen aňladyp,

$$\oint \frac{dQ_{aýl.}}{T} = 0,$$

alarys. Her bir aýlawly hadysada termodinamiki ululyklaryň hemmesi özleriniň başky bahasyny gaýdyp alýarlar, ýagny olaryň üýtgemesi nola deňdir. Integralyň aşagyndaky getirilen ýylylyk mukdarynyň nola deň bolanlygy sebäpli ol integral: birinjiden, ulgamyň halyny kesgitlep bilýär; ikinjiden ulgamyň haýsy ýol bilen şol hala gelenine bagly däldigi üçin bolsa käbir funksiýanyň doly differensialy bolup hyzmat edýär.

$\frac{dQ_{\text{aýl.}}}{T}$  – gatnaşyga entropiýa diýilýär we  $S$  harpy bilen belgilenýär:  $dS = \frac{dQ_{\text{aýl.}}}{T}$ . Entropiýanyň birligi  $[S] = 1 \frac{J}{K}$ . Ulgamyň 1-nji halyndan 2-nji hala geçmeginde entropiýanyň üýtgemegini  $\Delta S = S_2 - S_1$  bilen belgiläp alarys:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \oint \frac{dQ_{\text{aýl.}}}{T}.$$

Bilişimiz ýaly içki energiýanyň  $\oint du = 0$ , şeýlede entropiýanyň  $\oint ds = 0$  integrallary nola deňdirler. Onda, içki energiýanyň ulgamyň halynyň funksiýasy bolşy ýaly, entropiýa hem ulgamyň halynyň funksiýasydyr. Ikisiniň hem ýapyk konturda üýtgemeleri nola deňdir. Diýmek, entropiýa hem içki energiýa ýaly, ulgamyň üç ululygynyň  $P$ ,  $V$ ,  $T$  funksiýasydyr:  $\Delta S = f_1(P, V)$ ,  $\Delta S = f_1(T, V)$ ,  $\Delta S = f_1(T, P)$ .

Entropiýanyň üýtgame tapawudyndan, aýlaw hadysalarda entropiýanyň üýtgemesiniň we hadysanyň aýlawlydygyny ýa dældigini ýa-da bolmasa şol hadysanyň öz-özünden geçip biljekligini, şeýle hem geçip bilmejekligini kesgitlemek mümkin:

aýlawly hadysada entropiýanyň üýtgemesi  $\Delta S = 0$ ;

aýlawly hadysada entropiýanyň üýtgemesi  $\Delta S > 0$ .

Tebigatda bolup geçýän hemme ýylylyk hadysalary entropiýanyň ulalyş (artyş) ugruna bolup geçýärler. Entropiýa düşünjesini ulanmak bilen termodinamikanyň ikinji başlangyjyny ýönekeý teswirläp bolar, ýagny  $\Delta S \geq 0$ . Bu deňlikden we deňsizlikden gelip çykýan netije: ýapyk ulgamyň entropiýasy azalyp bilmez.

Şeýlekde:  $\Delta S = 0$ -hadysa aýlawlaýyn bolup, jisim başky halyndan çykyp, soňra şol halyna başga ýollar bilan hem gelip biler;

$\Delta S > 0$ -hadysa aýlawсыз bolup diňe bir tarapa öz-özünden geçip biler;

$\Delta S < 0$ -hadysa öz-özünden geçip bilmez, onuň amal edilmegi üçin daşardan ol ulgama energiýanyň gerek mukdary berilmelidir.

**Hyýaly gazyň entropiýasy.** Termodinamikanyň birinji başlangyjynyň we entropiýanyň kesgitlemesini ulanmak bilen entropiýanyň üýtgemesini beýan etse bolar. Eger-de entropiýanyň üýtgemesini  $\Delta S = S_2 - S_1$  diýip alsak, onda  $dS = \frac{dQ_{ayl.}}{T}$  we  $dQ = dU + PdV$  bolýanlygyny göz önünde tutup alarys:

$$dS = \frac{dU + PdV}{T}.$$

Şeýle hem  $dU = C_V m dT$  we  $P = mRT/V$  bolýanlygy üçin

$$dS = C_V m \frac{dT}{T} + mR \frac{dV}{V}.$$

Integrala geçeliň  $\int_{S_1}^{S_2} dS = C_V m \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + mR \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$ . Aňlatmany integrirläp hyýaly gazyň entropiýasynyň üýtgemesine degişli formulany alarys, ýagny,

$$\Delta S = S_2 - S_1 = C_V m \ln \frac{T_2}{T_1} + mR \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Logarifmalaryň aşagyndaky gatnaşyklar entropiýanyň üýtgemesindeki goşulyjylaryň alamatyny kesgitleýär. Adiabatik hadysa üçin, ulgam ýapyk bolsa  $dQ_{ayl.} = 0$ , onda  $S_2 - S_1 > 0$  ýa-da  $S_2 > S_1$ . Ýapyk adiabatik (üzňeleşdirelen) ulgamdaky öwrülişiksiz hadysada entropiýa artýar ekeni. Öwrülişikli hadysada bolsa  $S_2 - S_1 = 0$  ýa-da  $S_2 = S_1$ . Ýagny, hadysanyň entropiýasy üýtgemeýär. Soňky, hadysa basgaça izotermik hadysa hem diýilýär. Izotermik hadysada temperaturalaryň deň ( $T_2 = T_1$ ) bolýanlygy üçin hyýaly gazyň entropiýasynyň üýtgemesi üçin  $\Delta S = mR \ln \frac{V_2}{V_1}$  aňlatmany alarys. Izohorik hadysada göwrümleriň deňligi üçin ( $V_1 = V_2$ ) hyýaly gazyň bu hadysadaky entropiýasynyň üýtgemesi üçin  $\Delta S = C_V m \ln \frac{T_2}{T_1}$  aňlatmany alarys.

**Termodinamikanyň ikinji başlangyjynyň statistik düşündirilişi.** Nemes fiziki Bolsman entropiýanyň statistik

düşündirilişiniň barlygyny subut edipdir, çünki özbaşdak, üzňeleşen islendik ulgamda bolup geçýän hadysa ahtimallygy az haldan ahtimallygy köp hala ymtylýar. Käbir üzňeleşdirilen ulgamda, aýdalyň adam bedeninde entropiýanyň azalmagy bolup durýar. Ol azalyş hemişe iýmitiň üsti bilen ýetirilib durulýar.

Üzňeleşdirilen ulgamyň entropiýasy we ahtimallyk haly biri-birine meňzeşlikde özlerini alyp barýar: olaryň ikisi hem ýa ulalyp, ýa-da bolmasa üýtgewsiz galyp biler. Olaryň arasynda kesgitli baglanyşyk bolup, ol baglanyşygyň:

$$S = k \ln \omega$$

ýaly görnüşi bar.

Bu ýerde k-Bolsmanyň hemişeligi,  $\omega$ -ulgamyň halynyň termodinamik ähtimallygy, ýa-da şol hala onuň gelmegi üçin gerek bolan usullaryň sany.

Entropiýanyň ulalmagy şol ulgamyň uly ähtimallygy bolan hala geçmegini aňladýar ýa-da tersine. Gazlarda iň uly termodinamik ähtimallyk olaryň deňölçegli paýlanyşygynda alynýar. Adatça, entropiýanyň özi gyzyklanma döredenokda entropiýanyň üýtgamesine uly orun degişli. Ähtimallygy  $\omega_1$  bilen ölçenýän 1-nji haldan 2-nji hala geçendäki ähtimallygy  $\omega_2$  bilen kesgitlenýän ulgamyň entropiýasy  $S_1$ -den  $S_2$  çenli üýtgände entropiýanyň üýtgame formulasyndan alarys:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln \frac{S_2}{S_1}.$$

Öwrülikşiksiz hadysalaryň özbaşdak geçýänligi üçin olaryň iň soňky eýe bolýan halynda ähtimallygy iň uludyr, ýagny ähtimallygy maksimumdyr. Diffuziýa hadysasy esasynda iki gazyň molekularynyň doly biri-birine aralaşmasy we dürli temperaturaly iki jisimiň iň soňunda temperaturalarynyň deňleşmegi we ş.m. muňa mysal bolup bilýär. Umuman entropiýa termodinamiki ulgamyň halynyň ähtimallyk ölçegini häsiýetlendirýändigini belläliň. Şeýle hem bulam-bujarlygyň we öwrülikşiksizligiň ölçegi deregine entropiýany ulanmak mümkin. Iň ýokary termodinamik

ähtimallyk gazlaryň deňölçegli paýlanyşygy bolanda, olaryň deňagramlylygy halynda alynýar.

### **Hakyky gazlar**

**Hyýaly gaz kanunlaryndan yza çekiliş.** Biz hyýaly gazyň durkyna seredipdik. Hyýaly gazlar üçin  $\frac{PV_m}{RT}$  gatnaşyk, ýagny gazlaryň gysylyş delili adyny alan bu gatnaşyk elmydama  $\frac{PV_m}{RT}=1$  bire deň. Hakyky gazlar üçin ol gatnaşyk bire deň däl. Hakyky gazlaryň hemmesi temperatura baglanyşyksyzlykda, hyýaly gazlara seredende, az gysylýarlar.

Hakyky gazlaryň molekulalarynyň arasynda özara biribirine bolan tasir bardyr. Hyýaly gazlarda ol tasir ýok. Hakyky gazlaryň molekulalarynyň arasynda özara täsiriň barlygyny tassyklamak üçin tejribe üsti bilen geçirilen mysala ýüzleneliň. Azot gazynyň 1 molunyň 273 K temperaturadaky basyşy  $P_1=1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , göwrümi  $V_1=22,4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  we basyşyň göwrümine köpeldilmek hasyly  $P_1 V_1=2269 \text{ N.m}$ . Soňra, şol 273 K temperaturada azot gazyna edilýän basyş ulaldylyp  $P_2=1013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  derejä ýetirilse, onuň göwrümi kiçelip  $V_2=0,46 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  ýetýär. Şu soňky ýagdaýda azot gazynyň 1 molunyň 273 K temperaturadaky basyşynyň göwrümine köpeldilmek hasyly  $P_2 V_2=4660 \text{ N.m}$  bolýar. Şeýlelikde,  $P_2$ -niň  $V_2$  köpeldilmeginden ( $P_2 V_2$ ) alnan netije,  $P_1$ -iň,  $V_1$  köpeldilmeginden ( $P_1 V_1$ ) alnan netijeden düýpgöter tapawutly. Sebabini nahili düşündirmeli?

Bize belli bolşy ýaly, eger-de azot gazy hyýaly gaz bolan bolsady, onda ýokarda seredilen köpeltmek hasyllary  $P_1 V_1 = P_2 V_2$  özara deň bolardy, çünki hyýaly gazyň molekulalarynyň ölçegleriniň ýokdugy sebäpli azot gazyny isledigimizçe gysyp bolardy. Öz ölçegi bolmadygyň öz hususy göwrümi hem bolup bilmez. Ýöne, azaot hyýaly gaz däl!

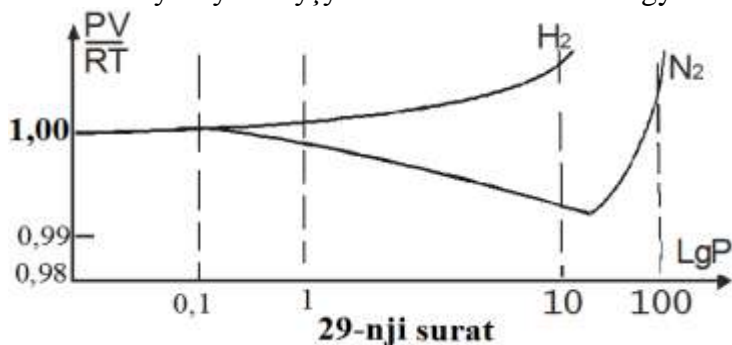
Azot hakyky gaz bolany üçin  $P_1 V_1 \neq P_2 V_2$ . Hakyky gazyň molekulalary hem edil hyýaly gazyň molekulalary ýaly

çaknyşyp özara täsir edişýärler, ýöne hakyky gazyň molekulalary gysylmakdan biri-birine ýakynlaşanlarynda olaryň özara täsiriniň ululygy artyp ýokary baha ýetýär. Bu bolsa hakyky gazyň molekulalarynyň hususy göwrümini, şeýle hem özara täsir netijesinde ýüze cykýan goşmaça içki iterini (içki basyşy) hasaba almaklygyň zerurdygyny görkezýär.

**Hakyky gazlar.** Hyýaly gaz halynyň deňlemesini ulanyp azot we wodorod gazlary üçin gazlaryň basyşyny häsiýetlendirýän gatnaşygyň  $\frac{PV_m}{RT}$  we sezewar edilen basyşyň onluk logorifmasy arasynda tejribe esasynda gurnalan baglanyşgyny grafikde görkezeliň.

Grafikden görnüşi ýaly takmynan  $\sim 10 \text{ atm.} = 10^6 \text{ N/m}^2$  basyşa çenli ýatladýan gatnaşygymyz iş ýüzünde hemişelik galýar. Ýüz we mün atmosfera basyşynda ol gatnaşygyň üýtgeýänligini görýäris. Azot we kislorod gazlary üçin 100 atm basyşa çenli şol bir hemişelik temperaturada ( $T = \text{const}$ ) PV köpeldilmek hasylynyň kem-kemden kiçelýändigini, soňra bolsa birden ulalýandygyny, hatda wodorodyň molekulalarynyň özlerini alyp baryşlary hyýaly gazyň molekulalarynyň özlerini alyp baryşlaryna ýakyn ýaly bolsa hem şeýle bolýandygyny 29-nji suratdaky grafikden görýäris.

Bu hadysany basyşyň kem-kemden artmagy bilen



basyşa sezewar edilen molekulalaryň arasynda özara dartýş güýjüniň ulalýandygy bilen düşündirýärler. Şol basyş çäginde

molekulalaryň özara dartýş güýji olaryň gabyň diwaryna bolan urulyş depginini we gazyň basyşyny hyýaly gazlara seredeniňde kiçeldýär.

Temperaturalary kondensasiýa nokadyndan has ýokary pursatlarynda köp gazlaryň häsiýetleriniň hyýaly gazlaryň molekulalarynyň häsiýetlerine ýakynlygyny tejribeler görkezýär. Çünki şol pursatlarda molekulalaryň özara aralyklarynyň öz ölçeglerine seredeniňde biri-birinden daş aralykda ýerleşýändiglerini, şonuň üçin öz aralaryndaky täsir ýok diýip alarlykdygyny, şeýle hem molekulalaryň özleriniň hususy göwrümleri gazyň göwrüminden deňeşdirersiz kiçidigini hem ýatdan çykarmalyň. Kondensasiýa nokadynyň töwereklerinde (uly basyşlarda we juda pes temperaturalarda) tebigy gazlaryň häsiýetleri hyýaly gazlaryňkydan deňeşdirersiz tapawutlanýar. Şeýle gazlar hakyky gazlardyr.

**Molekulalaryň özara täsir güýji we potensial energiýasy.** Gaz molekulalaryna elektrik zarýadlaryny özünde jemleýän, çylşyrymly gurluşy bolan çylşyrymly ulgam hökmünde seretmegimiz gerek. Onuň esasy massasynyň we zarýadynyň molekulany düzýän atom ýadrolarynda jemlenendigini bilýäris. Şol ýadrolaryň golaýynda töwerekleýin halkada ýokary ýygýlykda otrisetel zarýadlanan bölejikler (elektronlar) aýlanýarlar. Adatda molekuladaky polozitel we otrisetel zarýadlaryň umumy jemi biri-birine deň bolandyklary üçin molekula elektrik taýdan neýtraldyr.

Iki molekula biri-birine ýakynlaşanda olaryň aralygy  $r$  molekulanyň  $d$  diamtrinden uly ( $r \gg d$ ) bolsa, onda olaryň arasynda ýüze cykyp biljek özara täsir güýjüni hasaba almasa hem boljaklygyny tejribeler anyklaýar. Ýöne olaryň aralyklary iki ýa-da üç molekulanyň diametrine deň bolan pursatynda welin ýadronyň zarýadlarynyň biri-birine bolan täsir güýjüniň açyk ýüze çykýanlygy mese-mälim duýulýandygyny tejribeler subut edýär. Dürli atly zarýadlaryň çekişýänligi, bir

atylarynyň itekleşýänligi sebäpli täsir edişýän molekulalar deformirlenýärler we şol esasyda molekulada zarýadlaryň paýlanyşy üýtgeýär.

Molekulalaryň soňraky ýakynlaşmagy  $F$  dartys güýjüniň ulalmagyna getirýär. Haçanda molekulalar biri-birine şeýle bir ýakynlaşandan soň, ýagny olaryň elektron gatlaklary özara galtaşandan soňraky ýakynlaşmak mümkinçiligi düýbünden bolmaýar. Elektron gatlaklarynyň arasynda çäksiz ulalyan itekleýiş güýji molekulalaryň soňraky ýakynlaşmasynda ýüze çykýar. Molekulalaryň özara täsir güýjüni häsiýetlendirýän tejribelerden alnan maglumatlar esasynda gurnalnan grafik baglanyşyk 30-njy suratyň a, b grafiklerinde, degişlikde,  $F < 0$  bolanda dartys güýjine,  $F > 0$  bolanda itekleýiş güjine degişlidigini görkezýär. Molekulalarda ýylylyk hereketi bolmadyk ýagdaýynda olaryň ýakynlaşýan pursatynda çyzgyda görkezilen  $r_0$  aralyk molekulalaryň deňleşikli (deňagramly) biri-birine täsir edişmän durup bilýän aralygydyr. Eger-de şol  $r_0$  aralykdan molekulalaryň aralygynyň sähelçe üýtgemesi bolup geçse, aýdaly  $r_0$  - dan  $r_0 + \Delta r$  aralyga üýtgame bolsa özara tasir güýji  $F$  käbir iş edýär. Ol işiň ululygy,  $\Delta A = F \Delta r$ , aňlatma bilen kesgitlenýär. Şeýle özara täsiriň aralyga görä potensial energiýasy hem üýtgeýär we  $\Delta E_p = -\Delta A = -F \Delta r$  aňlatma bilen kesgitlenir.

Eger-de molekulalar biri-birinden daşlaşyp,  $r = \infty$  daşlykda ýerleşseler şol molekulalaryň özara täsiriniň potensial energiýasy nola, ýagny  $E_p(\infty) = 0$  deňdir.  $r > r_0$  bolanda özara täsiriň potensial energiýasy otrisateldir. Eger-de molekulalar daşlaşman, biri-birine ýakynlaşýan bolsalar, ýagny  $r = r_0$  potensial energiýa özüniň iň kiçi (minimum) ululygyna eýe bolar  $E_p(r_0) = E_p^{\min}$ . Deňleşme nokadynda ýakynlaşma çepe süýsse itekleşme güýji ýüze çykyp ol güýjüň işi  $\Delta A = F \Delta r < 0$  otrisateldir. Şondan soň özara täsiriň potensial energiýasy grafikden görnüşi ýaly dikleýin ýokarlanýar.

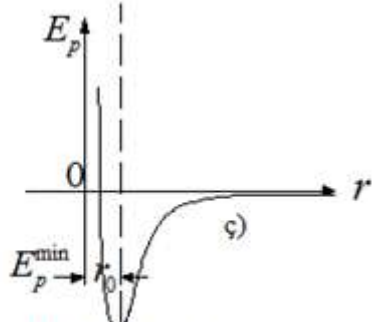
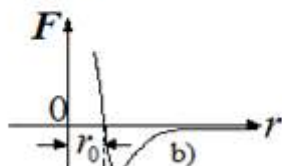
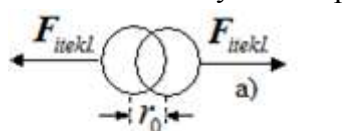


Özara täsiriň potensial energiýasynyň 30-njy suratdaky grafikde  $r_0$  aralyga bagly bolan funksiýasy  $E=E(r)$  "potensial çukury" häsiýetlendirýär. Şol  $r = r_0$ , ýagny  $F=0$  ýa-da  $E= E_{\min} < 0$  bolan ýagdaýynda "potensial çukur" özüniň iň çuň halyna eýe bolýar.

Molekulalar deňagramlylyk ýagdaýynda ( $r = r_0$ ) bolanlarynda potensial energiýa iň az baha eýe bolýar. Soň olary tükeniksizlige çenli daşlaşdyrmak üçin zerur gerek işiň ululygyny "potensial çukuryň" çuňlugy häsiýetlendirýär:

$$|E_p^{\min}| = 0 - E_p^{\min} = - \sum_{r=r_0}^{\infty} F \Delta r.$$

Molekulalaryň bitertip ýylylyk hereketiniň orta kinetik



**30-nji surat**

energýasy  $|E_k|$ .

Molekulalaryň özara

täsiriň iň az potensial

energiýasynyň  $|E_p^{\min}|$

we bitertip ýylylyk

hereketiniň orta kinetik

energiýasynyň  $|E_k|$

ululyklarynyň özara

g a t n a ş y g y n a

molekulalaryň islendik

toplumyny düzýän

birleşmesi we maddanyň

agregat haly baglydyr.

Maddanyň agregat

halyny düzýän

atomlaryň we

molekulalaryň kinetik

we potensial

energiýalarynyň

jemlerine bagly we ol baglanyşyk aşakdaky ýaly kesgitlenýär:

a) E g e r - d e  $\sum_{i=1}^n E_k \ll \sum_{i=1}^n E_p$  bolsa molekulalar biri-birine garyşarlar we biri-birine has yakinlaşarlar. Netijede, madda gaty agregat halyna bolar. Şu halda molekulalaryň

ýylylyk hereketleri olaryň deňagramlylyk halynyň töweregindäki giňişlikde kiçi yrgyldylary ýerine ýetirmegi bilen hasiýetlendiriler.

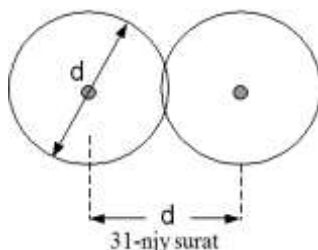
b) Eger-de  $\sum_{i=1}^n E_k \gg \sum_{i=1}^n E_p$  bolsa, onda molekulalar ýokary temperaturada bolar we uly depginde bolan ýylylyk hereketini ýerine ýetirer. Birnäçe bölejikden düzülip,  $r = r_0$  aralyga ýakynlaşyp, olaryň agregat halyna geçmegine päsgel berer. Molekulalaryň özara biri-birine bolan urgulary ol agregat hallaryň pytrap düzüji molekulalaryna dargamagyna getirer we olaryň gaýtadan birikmek ähtimallygyny kiçelder. Madda şu ýagdaýda diňe gaz halyna bolup biler.

c) Eger-de  $\sum_{i=1}^n E_k = \sum_{i=1}^n E_p$  bolanda molekulalar aralyk temperaturalarda bolar. Olaryň giňişlikde orunlaryny biri-birleri bilen çalşyp üznüksiz üýtgetmeklerine, ýöne özara aralyklarynyň  $r_0$  -dan görünip duran artymyna alyp barmadyk ýagdaýynda madda suwuk agregat halyna bolýar.

Şu aýdylanlardan görnüşi ýaly molekulalaryň orta kinetik energiýasynyň  $\sum_{i=1}^n E_k$  ululygyna, ýagny madda özüniň saklanýan temperaturasyna baglylykda gaty, suwuk we gaz halyna bolup biler. Maddanyň bir agregat halından beýleki agregat halyna geçmek temperaturasyny molekulalaryň özara täsiriniň in az potensial energiýasynyň ululygy  $\sum_{i=1}^n E_p$  kesgitleýär.

Maddanyň agregat halyny düşündirmekde diňe temperaturanyň ululygyny kesgitlemek, şeýle-de molekulalar ulgamynyň tutýan göwrümini hem hasaba almak zerur. Molekulalar ulgamynyň umumy tutýan  $V$  göwrümi ýeterlik uly baha eýe bolsa onda molekulalar biri-birinden daş aralykda ýerleşer. Molekulalaryň özara täsir güýji bilen şertlendirilen  $W_p$  energiýasy, ýylylyk hereketiniň  $E_k$  energiýasyndan juda kiçi bolar. Şonuň üçin gaty we suwuk halyndaky maddalaryň töwereginde şol maddanyň molekulalary gaz agregat halyna hem saklanarlar.

**Molekulalaryň effektiw diametri.** Gaz molekulalary ýylylyk hereketinde bolup, biri-birine üznüksiz “urulýarlar”. Urgy pursatynda molekulalaryň merkeziniň iň yakyn aralyga golaýlaşyp bilýän çäğine 31-nji suratda görkezilen molekulalaryň  $d$  effektiw diametri diýilýär. Bu diametr molekulalaryň hereket tizlikleriniň ululyklaryna hem bagly. Tizlik ulalsa effektiw diametr kiçelýär. Şeýle ýagdaý temperatura ulalanda hem gaýtalanýar.  $\sigma = \pi d^2$  ululyga molekulanyň effektiw kesigi diýilýär.



**Wan-der-Waalsyň denlemesi.** Eger-de gabyň içindäki molekulalaryň özlerine degişli hususy göwrümleri jemlenendeki tutup biljek göwrümini “ $b$ ” harpy bilen, gabyň göwrümini  $V$  harpy bilen belgilesek, onda gabyň içiniň boş göwrümi  $V_m - b$  bolar. Şeýle hem içki itergi, ýagny içki basyş diýýanimizi  $P^1 = a/V_m^2$  bilen, gabyň içindäki gaz molekulalaryna edýän daşky basyşy  $P$  bilen belgilesek, gabyň içindäki molekulalara edilýän umumy basyş daşky basyşdan ulý bolar. Onda hakyky gazyň hal deňlemesini

$$(P + \frac{a}{V_m^2})(V_m - b) = RT$$

görnüşde ýazyp bileris. Bu deňleme hakyky gazyň bir moluna degişlidir. Gazyň islendik mukdary ucin:  $\gamma = \frac{m}{\mu}$  we  $V = \gamma V_m = \frac{m}{\mu} V_m$  ýokarky formula girýän ululyklary hasaba almak bilen ol formulany aşakdaky

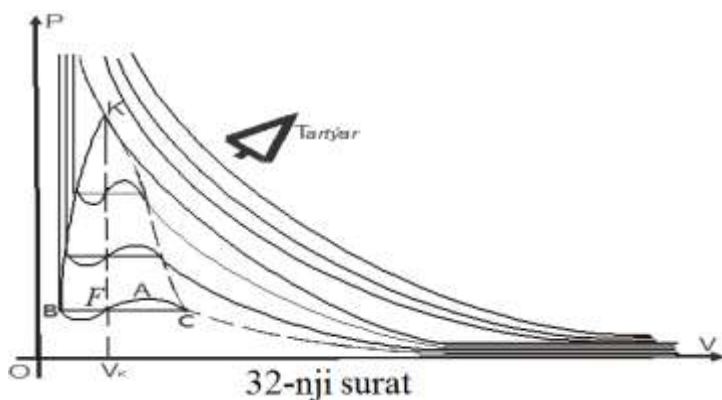
$$(P + \frac{\gamma^2 a}{V^2})(V_m - \gamma b) = \gamma RT$$

görnüşde hem ýazyp bileris. Alnan formula Wan-der-Waalsyň hakyky gazlar üçin gaz halynyň deňlemesi diýlip at berilýär. Onuň deňlemesine girýän  $a$  we  $b$  düzüjiler hemişelik ululyklar bolup, olar her bir gaz üçin tejribe üsti bilen kesgitlenýär. Olar,

molekulalaryň arasyndaky özara täsir güýçleri hasaba alýan düzedişlerdir. Ýöne takyk ululyklar dälirler, sebäbi olaryň san bahasy temperaturanyň üýtgemegi bien üýtgeýär.

**Wan-der-Waalsyň izotermalaryny eksperimentiň netijeleri bilen deňeşdirmek.** Inlis alymy Endrýus 1866- njy ýylda kömürturşy gazynyň ( $\text{CO}_2$ ) molýar göwrüminiň onuň üstünden edilýän basyşyna baglanyşygyny öwrenipdir. Ol, kömürturşy gazyny izoterma gysyş hadysasynda barlapdyr. Tejribe geçirmek üçin, silindriň içine salnan kömürturşy gazyny kem-kemden gysyp gazyň tutýan göwrümini kem-kemden kiçeldip we alan netijelerini PVdiagrammada aňladypdyr. Onuň geçiren tejribeleriniň netijeleri 32-nji suratda getirilen. Izotermalar köplüginin gidiş ýoly temperaturanyň artmagy bilen K nokatdan soň endiganlaşýar.

Her izotermanyň, K nokadyna çenli, özüne degişli BC egrisi bar. K nokatda şol egri ýityýar. K nokada kritik nokat diýilýär we şol nokatda P basyş, göwrümV we T temperatura özleriniň kritik bahasyna eýe. Endrýusyň alan izotermalary



Wan-der-Waalsyň deňlemesi esasynda alnan izotermalardan esasy tapawudy BC aralykda. Nazaryýet esasynda egri cyzyk, eksperiment esasynda bolsa BC göwrüm okuna parallel göni cyzyk alnypdyr. Gysylmaga sezewar edilen hakyky gazlar üçin

nazaryýet bilen tejribäniň ylalaşmazlygyny nähili düşündirmeli? Bu soragyň jogabyny bug we aşa gyzan suwuklyk düşüňjelerini girizmek bilen düşündirmek bolar. C nokatdan sagda hakyky gaz aşa gyzan bug yagdayýndadyr. Eksperiment cyzygy üçin C nokatda basyş doýgun buguň basyşyna deňdir. Nazary egri cyzyk üçin C nokatdan çepe aşa doýgun bug diýilýän aşa durnukly hal başlanýar we A nokada çenli dowam edýär. A nokatdan çepe göwrümiň kiçelmegi bilen aşa doýgun bug kondensiasiýa emele getirýär, ýagny gaz bug şekilli haldan dura-bara suwuk hala geçýär. Bu geçişlik F nokatda, ýagny maddanyň hemmesi suwuklyga öwrülen pursatynda togtayar. F nokatdan B nokada çenli aralykda bolsa aşa gyzan suwuklyk alynýar. Şondan soň ýene-de tejribäniň nazaryýet bilen ylalaşygy başlanýar. Eksperimental we nazary izotermalaryň hil tapawudy: nazary izotermanyň tolkun şekilli CAFB egrisi; eksperimentde koordinata okuna parallel göni cyzyk. Nazary deňleme ähli gazlar üçin umumydyr. Deňlemedäki a we b hemişelikler dürli gazlar üçin dürlüdür. Dürli maddalaryň getirelen ululyklarynyň ikisi birmeňzeş bolsa, onda üçünji ululyk hem birmeňzeşdir diýip hallaryň degişlilik kanunyna esallanyp aýdyp bileris.

**Suwuklyklar. I we II hilli faza geçişleri.** Fizikada birhilli, şeýle hem garyndyly birhili bolmadyk ulgamlar öwrenilýär. Gomogen ulgam birhilli ulgamyň mysalydyr, ýagny şol ulgamyň her bir nokadynda deňleşikli şertlerde  $P$  basyşyň,  $T$  temperaturanyň we  $C$  konsentراسiýanyň ululyklary hemişelikdir.

Ulgam çylşyrymly bolanda ol birnäçe birhilli ýa-da gomogen ulgamlardan düzülýär. Meselem: suw-buz, buz suw-bug we ş. m.

Geterogen ulgamda tapawutly çägi bolan, beýleki böleklerinden tapawutlanyp aýrylyp bilýän birhilli bölegine faza diýilýär. Her fazanyň özüne degişli fiziki häsiýetleri bardyr. Agzy ýapylan gapda suw bar bolsa suwdan bugarma

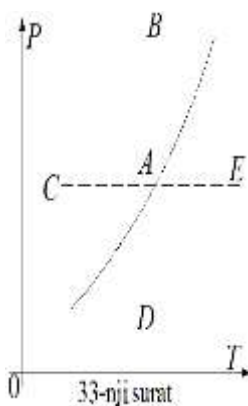
geçmegi bilen ol gapda iki faza bolar. Eger ol gapdaky suwda buz bölējigi bar bolsa onda ol gapda suwuň üç fazasy bar: suwuklyk-gaty-bug. Faza we agregat haly şol bir zat dälđir, çünki şol bir agregat halynda madda dürli fazalarda bolup bilýär. Oňa mysal edip buzy alsa bolar. Onuň gaty halynda baş dürli özgermesi (modifikasiýasy) bar. Madda bir fazadan başga bir fazasyna geçse oňa faza geçişi diýlip aýdylýar.

Deňleşikli şertlerde termodinamiki funksiýalaryň hemmesi ekstremumyň (hemişeligiň) üstünden geçýär, ýagny  $dU=0$  we  $dS=0$ . Içki energiýanyň we entropiýanyň differensialy nola deňdir.

Eger-de ulgam  $r$  sany fazadan we  $n$  sany goşundydan (komponentden) düzülen ýapyk bolsa, onda entropiýanyň, göwrümiň we massanyň tutuş ulgam üçin hemişelik şerti alýnýar, ýagny  $\sum s = \text{const}$ ;  $\sum V = \text{const}$  we  $\sum m_r = \text{const}$ .

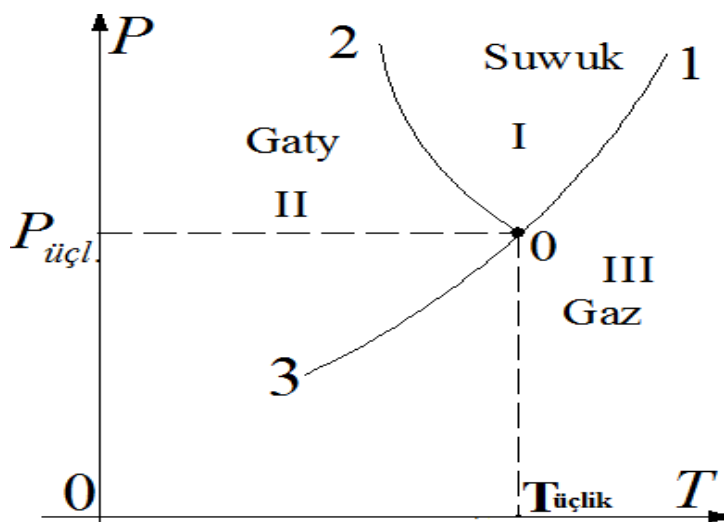
Köp düzümlü we dürli fazaly ulgamlar üçin Gibbsiň düzgüni bar: geterogen ulgamyň üýtgeşsiz saklanmagy üçin  $r$  fazalaryň sany  $n$  komponentleriň sanyndan aýrylyp iki goşulan bolmaly, ýagny  $i = n - r + 2$ . Ulgamyň erkinlik derejesiniň sany. Bu ýerde  $i$  deňagramlylyk halyny üýtgetmezden ulgamyň näçe ululygyny üýtgedip boljaklygyny görkezýär.

33-nji suratda PT diagramma görkezilen. Tutuş çyzykda ýatan A we ol çyzygyň daş töwereginde ýerleşen B, C, D we E nokatlaryň üsti bilen ulgamyň haýsy termodinamiki halyna degişlidigini bilmek mümkin, çünki A nokatdan islendik tarapa ugruksaň ulgamyň basyşy ýa-da absolýut temperaturasy üýtgeýär. Tutuş çyzygyň ugruna gözegçilik etsek, onda ulgamyň iki ululygy ( $P$  we  $T$ ), degişlilikde ulalýar ýa-da kiçelýär.



Ulgam  $A$ -dan  $B$  geçse izotermik temperaturada şol ulgamyň basyşy ulalýar. Doýan bugy izotermik hadysada gyssaň ol bug suwuklyga geçer. Diýmek, şol tutuş çyzykdan ýokarda ýerleşen nokatlaryň hemmesi maddanyň suwuklyk halyna degişli.

$A$  haldan  $D$  halyna geçmeklik izotermik hadysada basyşyň peselmeginde amal edilýär. Doýan bugyň izotermik giňelmeginde suwuklygyň bugarmagyna, ýagny doýgun bugyň doýmadyk buga, gaz halyna geçmegine getirýär.  $D$  nokat maddanyň gaz halyna degişli. Diýmek, tutuş çyzykdan aşakda ýerleşen nokatlaryň hemmesi şol maddanyň gaz halyna degişlidir.  $A$  nokadyň üstünden geçýän tutuş çyzyk maddanyň iki halyny araçäkleşdirýär: suwuklyk we gaz hallaryny.



**34-nji surat**

34-nji suratda  $P$ - $T$  diagrammada maddanyň üç haly görkezilen. I-germaw maddanyň suwuklyk haly. II-germaw maddanyň gaty haly. III- germaw maddanyň gaz haly. 0-2 egri maddanyň gaty we suwuklyk halyny araçäkleşdirýär. 0-1 egri maddanyň suwuklyk we gaz halyny araçäkleşdirýär.

0-3 egri bolsa maddanyň gaty we gaz halyny araçäkleşdirýär.

Maddanyň faza deňagramlylygynda  $PT$  diagrammadan başgada basyşyň we temperaturanyň baglanyşygyny differensial deňleme, Klapéýron-Klauziusyň deňlemesi görnüşinde hem aňladýarlar:  $dp/dT=q/T\Delta V$ . Bu ýerde  $q$ -faza geçişň ýylylygy;  $\Delta V$ -faza geçişinde maddanyň göwrüminiň üýtgemesi. 0-1 egri üçin göwrümiň üýtgemesi maddanyň gaty halyndaky göwrüminden  $V_{gaz}$  suwuklyk halyndaky göwrüminiň  $V_s$  tapawudyna deňdir:

$$0-1 \text{ egri üçin, degişlilikde } V_{0-1}=V_{gaz} - V_s.$$

$$0-2 \text{ egri üçin, degişlilikde } V_{0-2}=V_s - V_{gaty}.$$

$$0-3 \text{ egri üçin, degişlilikde } V_{0-3}=V_{gaz} - V_{gaty}.$$

Klapéýron-Klauziusyň deňlemesi şu ýokardaky 0–1, 0–2 we 0–3 egrileriň deňagramlykly faza egrisiniň ýapgytlygyny her temperatura geçişine degişlilikde kesgitleýär. Köp maddalar ucin  $V_{gaz} > V_s > V_{gaty}$  bolany sebapli yatladýlan egrilerimiziň ýapgytlygy položitel, ýagny uly basyşa uly temperatura degişli. Käbir jisimler üçin, çonunň käbir görnüşleri, suw, wismut, geliý we germaniý üçin eremek egrisiniň ýapgytlygy otrisatel, çünki  $\Delta V=V_{gaz} - V_{gaty}$ , onda  $\frac{dP}{dT} < 0$ . Şeýle kadalar üçin basyş artanda absolýut temperatura peselýär. Mysal: buzunň temperaturasyny üýtgetmezden uly basyşa sezewar etmek bilen üçlik nokadyndan yokarda ony eredip suwuklyga öwürmek mümkin.

Klapéýron-Klauziusyň deňlemesinden görnüş i ýaly maddanyň faza geçişinde ýapyk ýylylygyň ýuwudulmagy ýada bölünip çykmagy we udel göwrümiň üýtgemegi mümkin. Beýle geçişe I - hilli faza geçiş i diýilýär.

Faza geçişinde göwrüm üýtgemeyän, ýylylygy ýuwutmaýan we bölüp çykarmaýan geçişe II - tertipli faza geçiş i diýilýär. Şu ikinji tertipli faza geçişde entropiýa we Gibbisiň termodinamiki potensialy üznüksiz üýtgeýär. Ol geçişe degişli mysallar:

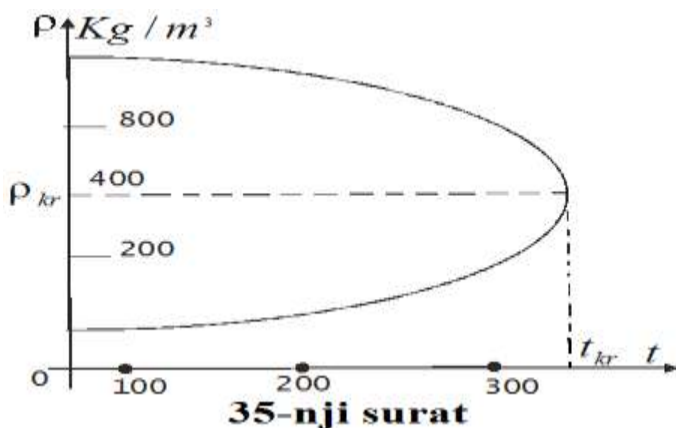


a) Ferromagnit maddanyň paramagnit halyna geçmeginde şol maddanyň gurluşy, ýagny ferromagnit hasiýeti düýbünden üýtgeýär.

b) Absolýut nol temperaturanyň töwereginde madda aşageçirijilik hala geçende ol maddanyň garşylygy nola çenli peselýär.

w) Aşa akyjylyk geliý gazyna mahsus bolan häsiýet.

**Kritiki hal.** 35-nji suratda doýgun bugyň we suwuklygyň (suwuň) dykyzlygy we basyşy arasyndaky baglanyşyk görkezilen. Ol grafikde buguň we suwuklygyň dykyzlyklary şol bir nokatda kesişýärler. Ol temperatura we dykyzlyga, degişlilikde, kritiki temperatura we kritiki dykyzlyk diýilýär. Şol ululyklarda suwuklygyň we buguň



temperaturalarynyň çägi ýitýär we maddanyň tutuş görümi bir hili bulançak görnüşe geçýär.  $P_k$ ,  $T_k$  we  $V_k$  ululyklara kritiki ululyklar diýilýär.

**Hakyky gazlaryň içki energiýasy.** Hyýaly gazlardan tapawutlylykda hakyky gazlaryň içki energiýasy molekulalaryň kinetik we potensial energiýalarynyň jeminden ybarat.

Molekulanyň potensial energiýasy olaryň aralykdan biri-birine özara tasiriniň energiýasydyr. Ol diňe hakyky gazlara mahsus. Molekulanyň öňe we aýlaw hereketleriniň kinetik energiýasy hyýaly gazlaryň içki energiýasyny kesgitleýär. 1 kmol gaz üçin ol energiýa  $W_k = \frac{i}{2}RT$ . Belli bolşy ýaly hemişelik göwrümde gazyň ýylylyk sygymy,  $C_V = \frac{i}{2} R$  formula bilen kesgitlenýänligi üçin hyýaly gazyň molekulasyň kinetik energiýasy onuň içki energiýasyna deňdir, ýagny  $W_k = U_1 = C_V$ .

Şeýle hem içki basyş  $P_i = \frac{a}{v^2}$  bolany üçin potensial energiýanyň üýtgemesi  $dW_p = du_2$  käbir işiň ýerine ýetirilmeginde amal edilýär, onda  $dA = du = \frac{a}{v^2} dV$ . Işi ýa-da içki energiýany integrirlemek esasynda alarys:  $U_2 = -\frac{a}{v} + c$ .

Integrirlenmekden alnan  $c$  hemişeligi kesgitlemek üçin molekulalaryň aralygy tükeniksizlige çenli artdyrylanda olaryň potensial energiýalary nola deň bolan pursatyna seredilýär. Şol pursat  $c=0$ . Soňky göwürüme degişli potensial energiýanyň ululygy,  $W_p = U_2 = -\frac{a}{v}$  aňlatma bilen kesgitlenýär.

Hakyky gazyň 1 kmol mukdary üçin  $U$  içki energiýa kinetik we potensial energiýalaryň jemine deňdir,

$$U = W_k + W_p = U_1 + U_2 = C_V T - \frac{a}{v}.$$

Şu alnan formuladan görnüşi ýaly hakyky gazlaryň içki energiýasy gazyň temperaturasyňa göni, göwürümine ters proporsionaldyr. Hakyky gazlaryň içki energiýasynyň barlygy Joule-Tomsonyň effektinde ýüze çykýar. Şu effekte sezewar edilen gazyň temperaturasy duýarlyk üýtgeýär. Mysal üçin, howa otag temperaturasynda 200 atm basyşdan 1 atm çenli giňelende  $-40^\circ\text{C}$ -cenli sowayar.

Eger-de gaz giňelende gyzmasa ýa-da sowamasa beýle ýagdaýda Joule-Tomsonyň effekti nola deň. Şeýle hal inwersiýa nokady bilen hasiýetlendirilýär. Inwersiýa nokady

temperaturanyň ululygyny kesgitleýär, ýagny şol temperaturada Joule-Tomsonyň effekti öz alamatyny üýtgedýär.

**Maddanyň suwuk we gaty hallarynyň aýratynlyklary. Suwuklyklar.** Suwuklyklaryň häsiýeti hakynda gürrüň edilende, biz mehanikada gysylmaýan suwuklygyň durkuna (modeline) seredipdik. Şu modele boýun egýän suwuklygyň molekulalary biri-birine şeýle bir ýakyn ýerleşip, ol suwuklygy ondan beýläk gysmak mümkin däl. Şeýle suwuklyga gysylmaýan hyýaly suwuklyk diýipdik. Ýöne, tebigatda beýle suwuklyk ýok. Käbir hasiýetleri boýunça oňa ýakynlaşan suwuklyklar bar. Suwuklygyň göwrümi basyşa baglanyşyksyzdyr. Suwuklyk bölejikleriniň yerleşiş dykzlygy gaty jisimiň molekulalarynyň yerleşiş dykzlygyndan kiçi, ýöne gaz molekulalarynyň dykzlygyndan has uly. Suwuklyklaryň molekulalary biri-birine görä orunlaryny üýtgetmäge ukyplydyr. Beýle diýildigi suwuklygyň akmak häsiýetiniň bar diýiligidir. Suwuklygyň we gazyň hemişelik durkunyň ýoklygy olaryň umumy aýratynlygydyr. Gaz salnan gabynyň göwrümini tutuşlygyna eýelemäge ukyply bolsa, suwuklyk diňe salnan gabynyň görnüşine eýe bolmaklyga ukyplydyr.

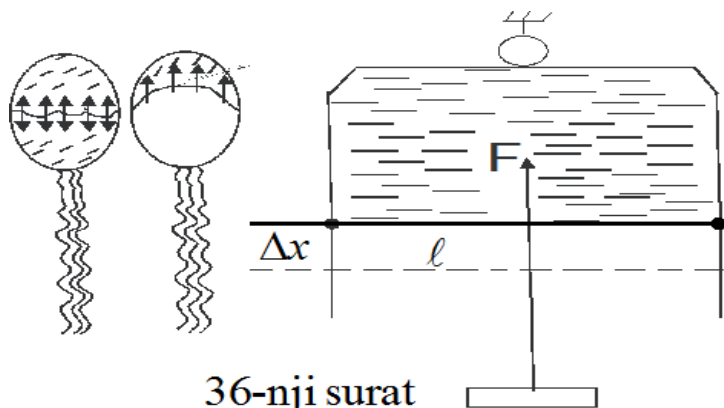
### **Üst dartylmak hadysasy**

#### **Suwuklygyň erkin üsti. Üst dartylmak güýji.**

Suwuklygyň açyk üstünde howanyň molekulalary bar bolsa, onda ol üste erkin üst diýilýär. Şol erkin üstde ýerleşen suwuklyk molekulalary howanyň molekulasy bilen täsir edişýär. Suwuklygyň erkin üstünde ýerleşen molekulalar aşak ýüzünden we ýan gapdallaryndan öz molekulalary, ýagny goňşy molekulalar bilen özara täsir edişýär. Ol özara täsir edişlik içki dartys (itekleýiş) güýçlerini ýüze çykarýar. Eger molekula suwuklygyň içinde ýerleşen bolsa ol güýçler özara biri-birini deňagramlaşdyrýar-kompensirleýär. Ýöne suwuklygyň erkin üstünde ýerleşen molekulalara täsir edýän

içki we daşky özara dartýş (itekleyiş) güýçleri deňagramlaşmaýar-kompensirlenmeýär. Deňleşmeýän güýçler, erkin üstäki ýerleşen molekulalaryň suwuklygyň içinde, aşaky gatlaklara geçmegine sebäp bolýar. Şeýlelikde, suwuklygyň erkin üsti özüniň minimal (iň kiçi) bahasyna eýe bolmaga çalyşýar. Erkin üstüň iň kiçi bahasy üst dartylmak güýji diýilýän güýç bilen baglanyşyklydyr.

Suwuklygyň erkin üsti käbir  $\ell$  uzynlykly kontur bilen çäklenendir. Ol konturyň uzynlygyna suwuklygyň üst dartylmak güýjüniň ululygy göni proporsionaldyr  $F \sim \ell$ . Eger bu baglanyşygy proporsionallyk koeffisiýenti  $\sigma$  (sigma) bilen belläp alsak, onda suwuklykda bar bolan üst dartylmak hadysasyny häsiýetlendirýän deňlemäni alarys:  $F = \sigma \ell$ , ýa-da  $\sigma = \frac{F}{\ell}$ .



36-nji surat

36-nji suratda we ýokardaky formulada  $F$ - suwuklygyň erkin üstüne täsir edýän üst dartylmak güýji,  $\ell$  - suwuklygyň erkin üstüni çäklendirýän konturyň uzynlygy,  $\sigma$ - suwuklygyň üst dartylma koeffisiýenti. Suwuklygyň erkin üstüne täsir edýän üst dartylma güýji elmydama erkin üsti çäklendirýär we  $\ell$ - kontura perpendikulýar ugrukdyrylandyr. Ol güýjüň ululygy suwuklygyň aýyk üstünde iň uly baha eýe bolmak bilen,

suwuklyk çuňluguna aralaşdygyňça kem-kemden kiçelip, molekulalaryň özara täsir radiusynda nola öwrülýär.

Suwuklygyň erkin üstüne täsir edýän  $F$  güýç suwuklyk üstüni kiçeltmäge ymtylýar. Az mukdardaky suwuklyk bölejeginiň şar formasyny alýandygyny onuň üstki molekulalarynyň deňtäsirediji güýçleriniň hemmesiniň suwuklygyň içine, massalar merkezine ugrukdyrylanlygy, egrilik üstüniň döremegi bilen düşündirmek mümkin. Şeýle bolanda ergilik üstüň döremegine we şonuň bilen birlikde ol üste täsir edýän goşmaça güýjüň hem döremegine getirýär. Üst birligine düşýän şol güýjüň ululygyna san taýdan deň bolan fiziki ululyga suwuklyk üstünde döreýän goşmaça basyş diýilýär.  $r$  radiusly şar üsti üçin ol goşmaça basyş  $P = \frac{2\sigma}{r}$ , silindir formaly üst üçin  $P = \frac{\sigma}{r}$  aňlatmar bilen kesgitlenýär. Umumy halda islendik görnüşdäki üstüň ýokarsyndaky basyş Laplasyň formulasy arkaly kesgitlenýär:  $P = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ . Bu ýerde  $r_1$  we  $r_2$  degişlilikde üstüň ergilik radiuslary.

Suwuklygyň üstüne käbir daşky güýç täsir edip, suwuklygyň üst meýdanyny ulaltmaga ýa-da kiçeltmäge ymtylýar diýeliň. Şeýle wagtda daşky güýç ol üstüň potensial energiýasyny ýokarlandyrmak üçin käbir  $\Delta A$  işi eder. Daşky güýjüň ýerine ýetirýän elementar işi, ýagny suwuklygyň erkin üstüniň potensial energiýasynyň artmagy, ol suwuklygyň erkin üstüniň tutýan elementar  $\Delta S$  meýdanyna barabardyr, ýagny

$$\Delta W_p = -\Delta A \sim \Delta S = \ell \Delta x.$$

Proporsionallygy, üst dartuw koeffisiýenti bilen baglanyşdyryp aşakdaky deňligi alarys:

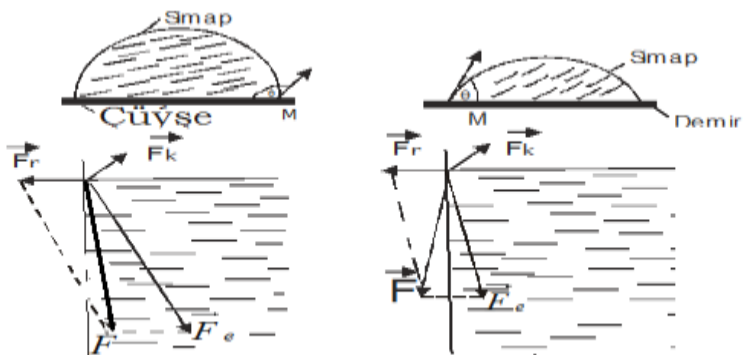
$$\Delta W_p = -\Delta A = \sigma \Delta S, \text{ ýa-da } \sigma = \frac{W_p}{\Delta S}.$$

Alnan deňlemelerden peýdalanyp suwuklygyň üst dartylmak koeffisiýentiniň ölçeg birligini aňladalyň. Halkara ulgamyndaky (HU) onuň birligini  $N/m$  ýa-da  $J/m^2$  aňladarys.

**Öllenmek we öllenmezlik.** Suwuklygyň molekulalarynyň özara we salnan gabynyň molekulalary arasyndaky täsirlerine baglylykda suwuklyk salnan gabynyň diwaryny ýa-da ýatan üstüni ölläp ýa-da öllemän biler. Şeýle hadysa suwuklygyň öllemeçligi ýa-da öllemezligi diýilýär. Ol hadysany öwretmek üçin fizikada suwuklygyň ölleme burçy diýilýän ululyk girizilýär. Ol  $\theta$  (teta) harpy bilen belgilenilýär. Hadysa deňişli birnäçe mysallara seredeliň:

1) 37-nji suratda sagda - suwuklyk salnan gabynyň diwaryny ölleýär. Bu ýagdaýda:  $\theta < \frac{\pi}{2}$ . Mysal üçin, suw çüýşe gabynyň diwaryny ölleýär. Simap demir üste düşende, ony ölleýär;

2) 37-nji suratda çepde - suwuklyk salnan gabynyň diwaryny öllemeýär. Bu ýagdaýda  $\theta > \frac{\pi}{2}$ . Mysal ucin, simap salnan çüýşe gabynyň diwaryny öllemeýär.

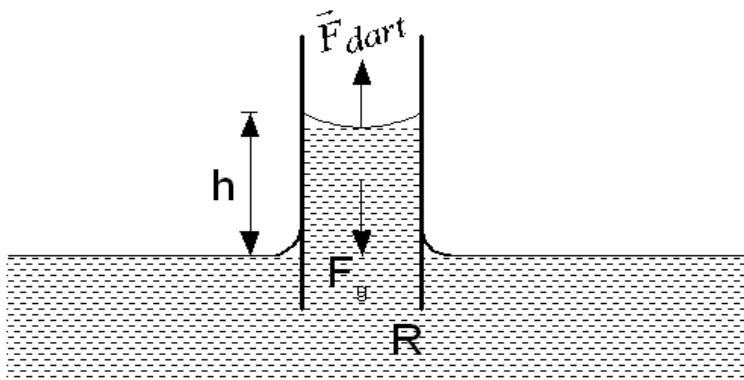


**37-nji surat**

Suwuklyklar tarapyndan gaty jisimleriň öllenmeçligi ýada öllenmezligi kapillýarlyk hadysasyny ýäze cykarýar. Suwuklyk kapillýar turbajygyň diwaryny ölleýän bolsa, onda ol suwuklyk kapillýar turbajyk bilen öz başky derejesinden ýokaryk galar. Eger suwuklyk kapillýar turbajygy öllemeýän bolsa, onda ol suwuklyk kapillýar turbajygyň içinde öz başky

derejesinden aşakda durar.

38-nji suratda kapillýar boýunça, gapdaky suwuklygyň derejesinden ýokary görterilen suwuklyga iki güýç, ýagny görterilen suwuklygyň agramy we kapillýardaky suwuklygyň erkin üstüne üst dartylma güýji, tasir edýär. Ol güýçler deňleşen mahalynda kapillýardaky suwuklygyň ýokary galmasý kesilýär. Suwuklygyň üst dartylma güýji  $F = \sigma l = \sigma 2\pi R$



38-nji surat

formula bilen, suwuklyga täsir edýän agyrlýk güýji  $P = mg = \rho h s g = \rho h R^2 g$  aňlatma bilen kesgitlenýär. Eger güýçler  $F = P$  ululyklary boýunça deň bolsa, onda  $\sigma 2\pi R = \rho h \pi R^2 g$  deňlikden suwuklygyň kapillýar boýunça ýokary galyş beýikligini  $h = \frac{2\sigma}{\rho R g}$  formula bilen hasaplap bileris.

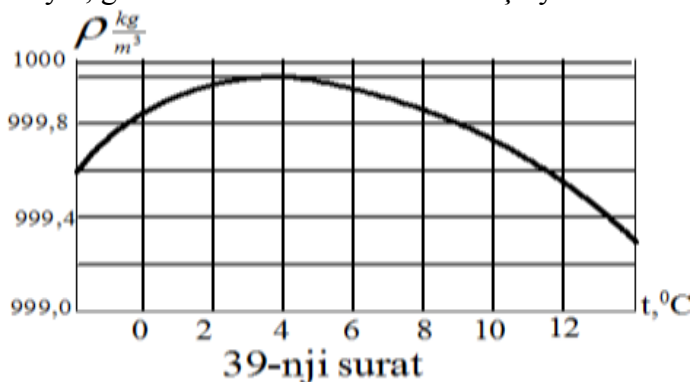
Suwuklygyň kapillýar boýunça ýokary galma beýikligi suwuklygyň üst dartylmak koeffisiýentine göni proporsional, suwuklygyň dykzlygyna  $\rho$ , onuň kapillýardaky egrilik radiusyna  $R$  we erkin gaçmanyň tizlenmesine  $g$  ters proporsionaldyr.

### **Suwuklyklaryň göwrümüne giňelmek häsiýetleri.**

Suwuklyklaryň göwrümüne giňelmek häsiýetleri bar. Ol giňeliş suwuklyklarda gaty jisimlere garanda has ýokarydyr. Suwuklyk  $t$  gradus temperatura çenli gyzdyrylanda onuň

göwrümine giňelmeginiň ululygy,  $V_t = V_0 (1 + \alpha t)$  formula bilen kesgitlenilýär. Bu ýerde  $V_0$  -suwuklygyň gyzdyrylmaga çenli bolan göwrümi,  $V_t$  -suwuklygyň gyzdyrylandan soňky göwrümi,  $t$  - suwuklygyň gyzdyrylyş temperaturasy,  $\alpha$  -suwuklygyň göwrümine giňelmek koeffisiýenti.

Şu ýerde suwuň göwrümine giňelmeginiň beýleki suwuklyklaryň göwrümine giňelişinden düýpgöter tapawutlydygyny belläp geçmek zerur. Sebabi suwy  $0^{\circ}\text{C}$ -den  $4^{\circ}\text{C}$  çenli gyzydranymyzda suwuň göwrümi ulalman, tersine onuň göwrümi kiçelýär.  $4^{\circ}\text{C}$ -den ýokarky temperaturada, ol ýene-de öz göwrümini gyzydrylmakdan ulaldýar. Suwuň şeýle häsiýeti onuň dykzlygynyň üýtgemeginiň üsti bilen düşündirilýär.  $0^{\circ}\text{C}$  temperaturadaky suwyň dykzlygy  $4^{\circ}\text{C}$  temperaturadaky suwuň dykzlygyndan kiçidir, çünki  $0^{\circ}\text{C}$ -den tä  $4^{\circ}\text{C}$  temperatura çenli gyzydrylan suwuň dykzlygy kem-kemden ulalýar, göwrümi bolsa kem-kemden kiçelýär. Munuň



şeyledigine 39-njy suratda getirilen suwuň dykzlygynyň onuň temperaturasyna baglylygynyň grafiki hem güwä geçýär.

### **Gaty jisimleriň häsiýeti**

Madda, gaz we suwuklyk agregat halyndan başga-da gaty agregat halynda hem bolup bilýär. Şu halyndaky gaty jisim kesgitli durka (forma) eýedir. Gaty jisimleriň hemesiniň



gurluşy birmeňzeş dälidir. Olar öz düzlüşleri boýunça kristallik we amorf jisimlere bolünýärler.

Kristallik jisimleriniň atomlary we molekulalary tertipli ýerleşip, kristallik gözenegi emele getirýärler. Molekulalar we olary düzýän atomlar giňişlik kristal gözeneginiň düwünlerinde ýerleşip deňagramlylyk ýagdaýynyň töwereginde yrgyldaýarlar we her bir atoma tasir edýän güýçler biri-birini kompensirleýärler. Düwündäki her atoma potensial energiýanyň minimumy degişli bolany üçin Kristal jisim berk gurluşa eýe bolýar. Kristall gözenek kub, tetragonal, romb, geksagonal, monoklin, trigonal, triklin görnüşde tebigatda gabat gelýär.

Gaty jisimleriniň fiziki häsiýetleri, aýdalyň ýylylykdan giňelmek, ýylylyk geçirijilik, elektrik geçirijilik we başgalar durlu simmetriya tekizligi, simmetriya merkezi, optiki simmetriýa oklary boýunça birmeňzeş dälidirler. Şeýle birmeňzeş bolmadyk häsiýetler kristal jisimleriniň anizotroplygy diýen düşünjani ýüze çykardy. Diýmek, tebigatda izotrop we anizotrop kristal jisimler bardyr.

Tebigatda şeýle bir kristallik jisimler bolup, olary düzüjiler bitertip ugrukdyrylan özara tutuşyp, şepbeşen maýdaja kristaljagazlaryň toplumyndan ybaratdyr. Beýle kristallik maddalara polikristallar diýilýär.

Köpgranly göni durkly ýeke-täk kristala monokristal diýilýär. Olaryň daşky görnüşi bütin gurluş strukturasyny emele getirýär. Dag hrustaly diýilýän juda uly monokristaldyr. Maýdaja kristaljagazlaryň ölçegi himiki birleşmeleriň iri molekulalaryndan kiçiräk. Kristallik jisimleriniň hemmesiniň özüne mahsus bolan belli eremek temperaturasy bardyr.

Tebigatda hemme tarapa birmeňzeş (fiziki) häsiýetli jisimler hem bardyr. Olara amorf jisimler diýilýär. Olaryň kristallik gurluşy, şeýle hem özlerine mahsus bolan belli bir eremek temperaturasy ýokdur. Suwuklyklar ýaly amorf jisimler hem izotrop hasiýetlidir.

Ylmyň ösmegi bilen organiki birleşmelerden düzülen, polimerler diýlip atlandyrylýan amorf madalar bar. Kauçugyň tebigydyr emelisi, wiskoz, sellafan, selliloid, plastmassa ýaly amorf jimler polimerlerdir. Olara aşa sowadylan suwuklyk diýseňem bolar, sebäbi sepbeşiklikleri sepbeşik suwuklyklaryňka meňzeş. Olar gyzdyrylyp başlanda temperaturanyň ýokarlanmagy bilen kem-kemden ýumşaýarlar hem-de ereýärler.

**Gaty jisimleriň ýylylykdan uzynlygyna giňelmegi.** Gaty jisimler gyzdyrylan mahalynda olaryň uzynlyk ölçegi artýar. Bu hadysa gaty jisimleriň ýylylykdan giňelmegi diýilýär. Bu hadysany mukdar taýdan hasiýetlendirmek üçin uzynlygyna giňelmek koeffisiýenti diýilen ululyk girizilýär we  $\beta$  harpy bilen belgilenilýär. Uzynlygyna giňelmek koeffisiýenti aşakdaky ýaly kesgitlenýär:  $\beta = \frac{l_t - l_0}{l_0}$ . Bu ýerde:

$l_0$  - kristallik gaty jisimiň başdaky uzynlygy;

$l_t$  - gaty kristallik jisimiň  $t$  °C gyzdyrylandaky uzynlygy;  
 $\Delta t$  - gaty kristallik jisimiň gyzdyrylyşynyň temperatura tapawudy  $\Delta t = t - t_0$ .

Eger, jisimiň gyzdyrylandaky temperatura tapawudy  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  we başky uzynlygy bir uzynlyk birligine deň bolsa  $l_0 = 1$  bolsa, onda  $\beta = \Delta l = l_t - l_0$ . Şeýlelikde, başky uzynlygy uzynlyk birligine deň bolan kristallik gaty jisim gyzdyrylanda temperaturanyň artymynyň üýtgemesi  $1^\circ\text{C}$  bolýan ýagdaýyndaky onuň uzynlyk artymy san taýdan uzynlygyna giňelmek koeffisiýentine deňdir. Umuman, gaty jisimiň gymmakdan uzynlygyna giňelmegi aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$l_t = l_0 (1 + \beta \Delta t).$$

Gaty jisim gyzdyrylanda onuň uzynlyk ölçegleriniň üýtgemesinden başga-da şol bir wagtda göwrüm ölçegleriniň üýtgemesi hem bolup geçýär. Olaryň göwrüm ölçegleriniň üýtgemesini häsiýetlendirmek üçin göwrümine giňelmek koeffisiýenti diýilen ululyk girizilýär we ol  $\alpha$  harpy bilen

belgilenýär. Gaty jisimiň göwrümine giňelmek koeffisiýenti aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

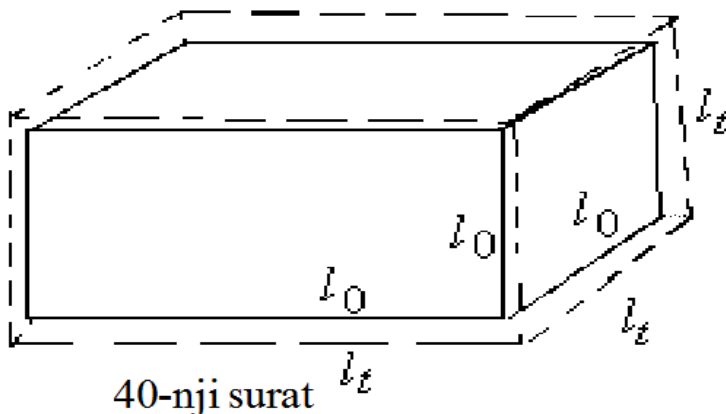
$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 \Delta t}.$$

Bu ýerde:  $V_0$  - gaty jisimiň başdaky göwrümi,  $V_t$  - gaty jisimiň gyzdyrylandan soňky göwrümi,  $\Delta t$  - gaty jisim gyzdyrylandaky temperaturanyň artymy.

Eger-de, gaty jisimiň başdaky göwrümi  $V_0 = 1$  bir birlik göwrüme deň bolup, temperaturanyň artymy  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$  deň bolsa, onda gaty jisimiň göwrüminiň artymy san taýýndan göwrümine giňelmek koeffisiýentine deňdir:  $\alpha = V_t - V_0 = \Delta V$ . Onda, gaty jisimiň göwrüminiň soňky üýtgemesini aşakdaky formula bilen hasaplap bileris:  $V_t = V_0 (1 + \alpha \Delta t)$ .

$\beta$  we  $\alpha$ , ýagny, gaty jisimiň uzynlygyna we göwrümine giňelmeklik koeffisiýentleriniň özara biri-birine bolan baglanyşygy bardyr. Ol baglanyşygy mukdar taýdan kesgitlemek üçin jisimiň 40-njy suratdaky ýagdaýynda görkezilen kub şekilli jisimiň göwrüminiň, onuň uzynlyk ölçeginiň kubuna deňdigini ýatlady, aşakdaky ýaly baglanyşyk formulasyny ýazalyň,  $\ell_t^3 = \ell_0^3 (1 + \alpha \Delta t)^3$ . Umuman,  $\ell_t^3 = V_t$ ,  $\ell_0^3 = V_0$ -bilen belgilesek we soňky göwrümiň bahasyny ýokarky formula goýsak, onda  $1 + \alpha \Delta t = (1 + \beta \Delta t)^3$  deňligi alarys. Deňligiň sag tarapyny Nýutonyň binomy boýunça dargadyp alarys:  $1 + \alpha \Delta t = (1 + \beta \Delta t)^3 = 1 + 3(\beta \Delta t)^2 + 3\beta \Delta t + (\beta \Delta t)^3$ . Gysgalýanlaryny gysgaldyp alarys,  $\alpha \Delta t = 3\beta \Delta t$ , ýa-da  $\alpha = 3\beta$ . Bu alnan aňlatmadan: göwrümine giňelmek koeffisiýenti  $\alpha$  uzynlygyna giňelmek koeffisiýentiniň  $\beta$  üçeldilmegine deňdir.

**Gaty kristal jisimleriniň ýylylyk sygymlary.** Gaty jisimleriniň ýylylykdan uzynlygyna ýa-da göwrümine giňelmegini olaryň  $V = \text{const}$  göwrümindäki ýylylyk (molýar)



sygymalarynyň temperaturanyň uly, orta we pes bahalarynda birmenzeş dăldigini nusgawy we kwant fizikasanyň düzgünlerine boýun egýänligi ýa-da egmeýänligi bilen hasiýetlendirilse düşünmek ýeňil bolýar. Meselem, bir atomly metallaryň ýylylyk sygymy temperaturanyň ýokary bahalarynda  $C_v=3R$ , temperaturanyň kiçi  $kT \ll 1$  bahalarynda:

$C_v = 3kN_A \left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2 e^{-\frac{h\nu}{kT}}$  formula bilen kesgitlenip bilner. Soňky formula hemme atomlar deň ýygylyk bilen yrgyldaýan ýagdaýy üçin nazary taýdan alnan. Şonuň üçin soňky deňleme pes temperaturalarda takyk bolmadyk netijeleri berýär. Aým Debaý pes temperaturalara degişli nazary nätakyklygy düzedip,  $C_v = \frac{12\pi^4}{5} kN_A \left(\frac{kT}{h\nu_m}\right)^3 = \frac{12\pi^4}{5} kN_A \left(\frac{T}{T_D}\right)^3$  görnüşli formula alýar. Ýylylyk sygymy üçin onuň tejribe (kalorimetrik) we nazary usulda alan netijeleri gabat gelipdir.

### Mehaniki garmoniki yrgyldylar

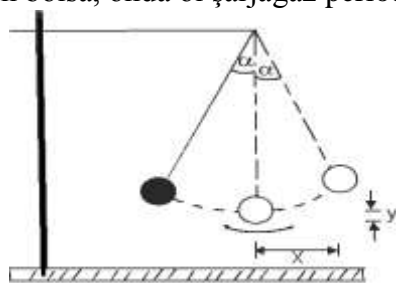
**Mehaniki garmoniki yrgyldylar we olaryň hasiýetnamalary** (süýşmesi, amplitudasy, peridy, ýygylygy, tizligi we tizlenmesi): Biz mehanikada uly (makroskopik), ýagny hereketi Galileý-Nýuton mehanikasynyň kanunlaryna

boýun eýýän jisimleriň öňe we aýlanma hereketlerine seredip geçipdik. Mehaniki yrgyldylar hem edil şol öňe we aýlanmak hereketleri ýaly mehaniki hereketdir. Yrgyldyny matematiki, fiziki we purzinli maýatnikler, sallançaklar, sagatlardaky maýatnikler, baglaryň ýapraklary, şahalary, baldaklary daşky güýjüň täsirinden ýerine ýetirýärler.

**Yrgyldyly hereket ýa-da yrgyldy** - jisimler özlerine mahsus bolan deňagramlyk ýagdaýynyň töwereginde kä eýläk, käte-de beýläk süýşen pursatynda olaryň hereketiniň yzygider, takyk ýa-da takmyn, gaytalanmagdyr. Eger-de yrgyldy kesgitli wagt aralygynda yzygider gaytalansa, onda beýle yrgylda periodiki yrgyldy diýilýär.

Aýdalyň, 41-nji suratda görkezilen şarjagaz sapakdan asylan. Oňa daşky güýç täsir etmedik wagtynda ol özüniň deňagramlylyk ýagdaýynda saklanar. Eger-de ol şara käbir, daşky uly bolmadyk güýç täsir etse, ol herekete geler, tekizlikde yrgyldar. Munuň üçin ony deňagramlylyk ýagdaýynyň üstünden geçýän okdan käbir  $\alpha$  burçuna gyşartmak we soňra oňa özbaşdak hereket etmäge mümkinçilik döretmek ýeterlik. Şar öz deňagramlylyk ýagdaýynyň töwereginde yrgyldar, ýagny yrgyldyly hereketi ýerine ýetirip, saga we çepi ýa-da aňryk we bäräk yzygider gyşarar.

Eger-de sapakdan asylan şarjagazyň hereketi deň wagt aralygynda gaýtalanyp bilýän bolsa, onda ol şarjagaz periodik gaýtalanýan garmoniki yrgyldyly hereketi ýerine ýetirýär. Umuman, garmoniki yrgyldyly hereketi ýerine ýetirmek üçin jisimleriň ýerine ýetirýän yrgyldysy sinus we kosinus kanunlaryna boýun egmelidir.



41-nji surat

Garmoniki yrgyldyny ýerine ýetirýän jisimiň hereketini grafik usulda häsiýetlendirsek, onda onuň hereketiň dowamynda çyzýan traýektorýasy 42-nji suratda görkezilen sinus ýa-da kosinus çyzygyny berýär. Eger-de onuň çyzýan zýy sinus ýa-da kosinus çyzygy bolmasa, ol jisimiň yrgyldysy garmoniki däl yrgyldydyr. Şeýle periodiki däl yrgyldyny onuň periodiki düzüjilerine dargatmaga matematika mümkinçilik berýär. Deň wagt aralygynda gaýtalanýan prosesleri garmoniki yrgyldynyň mysaly hökmünde seretse bolar.

Garmoniki yrgyldyny hasiýetlendirýän esasy ululyklar:

1. SÜÝŞME-jisim yrgyldyly hereketi ýerine ýetirýän şol bir wagt pursatynda özüniň deňagramlylyk ýagdaýyndan kese ugurda käbir “ $x$ ” aralyga süýşmek bilen käbir  $\alpha$  burça gyşarýar. Dik ugurda bolsa käbir “ $y$ ” aralyga süýşüp biler. Ol süýşmeleri degişlilikdäki wagt bilen baglanyşdysak, onda analitik usulda, süýşmäniň wagta bolan baglanyşyk funksiýasyny alarys, ýagny:  $x=f(t)$ ,  $y=f(t)$ . Bu ýerde, “ $x$ ” we “ $y$ ” jisimiň deňagramlylyk ýagdaýyna garanda pursatlaýyn (mgnowen) orun üýtgemesi, ýagny süýşmesidir.

2. Amplituda - yrgyldyly hereketi ýerine ýetirýän jisimiň, özüne degişli deňagramlylyk ýagdaýyndan, iň uly (maksimal) süýşme, ýagny gyşarma aralygyna aýdylýar. Amplituda “ $A$ ” ýa-da “ $a$ ” - harplary bilen belgilenýär. Onuň ölçeg birligi halkara ulgamynda metrdir.

3. Yrgyldynyň fazasy - yrgyldynyň başlangyç fazasy  $\varphi_0$  bilen belgilenýär. Onuň pursat bahasy başlangyç fazany hasaba almak bilen  $\varphi=\varphi_0+\omega t$  formula bilen kesgitlenilýär. Yrgyldynyň fazasy yrgyldynyň süýşmesiniň, ýagny berlen wagt pursatyndaky  $x$  we  $y$  süýşmeleriň, bahasyny kesgitleýär. Başlangyç wagt pursatynda  $t=0$  bolsa, yrgyldynyň pursat  $\varphi$  fazasy  $\varphi=\varphi_0$  ýagny, şol yrgyldynyň başlangyç fazasyna deňdir. Süýşme  $+A$  -dan  $-A$  bahalary alar.

4. Yrgyldynyň periody  $T$  harpy bilen belgilenýär we  $T=\frac{1}{\nu}$  formula bilen kesgitlenýär. Ol doly ýerine ýetirilen

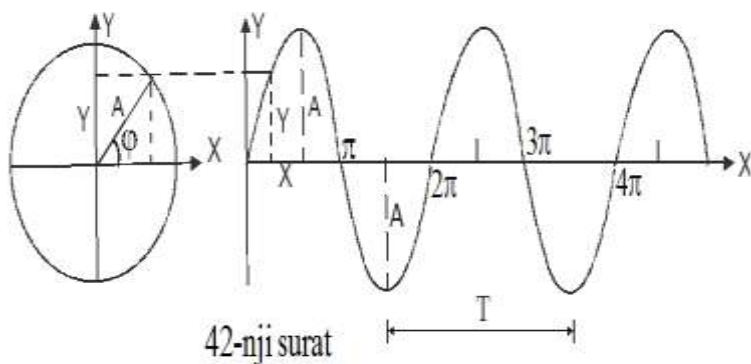
yrgyldynyň wagt dowamlylygyny häsietlendirýär ýa-da başgaça jisimiň yrgyldyly hereketde bir doly yrgyldy etmegi üçin gerek bolan wagty bilen kesgitlenýär.

5. Yrgyldynyň ýygylygy  $\nu$  harpy bilen belgilenýär we  $\nu = \frac{1}{T}$  formula bilen kesgitlenýär. Yrgyldynyň ýygylygy wagt birliginde amal edilýän yrgyldylaryň sanyny häsietlendirýär. Periodyň halkara ulgamyndaky ölçeg birligi 1s; ýygylygyň şol ulgamdaky ölçeg birligi 1 Gers = 1 Gs=1s<sup>-1</sup>.

6. Aýlaw ýygylyk. Ol  $\omega$  harpy bilen belgilenýär we  $\omega = \frac{\varphi}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$  formula bilen kesgitlenýär. Yrgyldynyň bu ýygylygyny yrgyldaýan jisim  $2\pi$  wagt birliginde ýerine ýetirip bilýär. Umuman, wagt birliginde ýerine ýetirilýän doly yrgyldynyň sanyna yrgyldynyň aýlaw ýygylygy diýilýär. Yrgyldyly herekete jikme-jik seredeliň.

Goý, bize 42-nji suratda görkezilen töwerek boýunça aýlanýan jisim berlen bolsun.

Eger, ol jisimiň wagt dowamlylygyndaky aýlaw hereketini grafige geçirsek, görkezilen sinus çyzygyny alarys. Ol sinus çyzygyny cyzmaklyk üçin jisime gerek bolan wagt  $T$ , ýagny yrgyldynyň periody görkezilen. Seredýän jisimiz deňagramlylyk ýagdaýynyň töwereginde deňölçegli



aýlaw hereketi ýerine ýetirýär diýeliň. Deňagramlylyk ýagdaýyndan gysarýan jisimiň aýlaw hereketindäki kese we dik oklara görä süýşmesi, deňişlilikde:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$y = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$$

aňlatmalar bilen kesgitlenip biliner. Bu yerde  $A > 0$ ;  $\omega_0 > 0$ .

7. Yrgyldynyň tizligi  $\vartheta$  harpy bilen belgilenýär,  $\vartheta = \frac{dx}{dt}$ ,  $\vartheta = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0 x$  formula bilen kesgitlenýär.

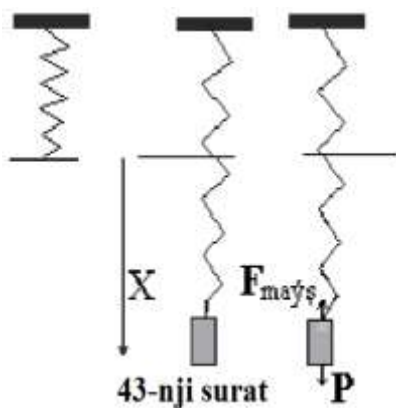
8. Yrgyldynyň tizlenmesi:

$$a = \frac{d\vartheta}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \text{ ýa-da } a = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = -\omega_0^2 x.$$

Alnan deňlemeleriň çep taraplary jisimiň yrgyldysynyň tizlenmesini hasiýetlendirýär. Onda olaryň sag taraplaryny deňleşdirip alarys:  $\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 x$ , ýa-da  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$ . Bu yrgyldynyň ikinji derejeli differensial deňlemesidir.

Şu seredip geçen fiziki ululyklarymyzyň hemmesi bilelikde jisimiň ýerine ýetirýän garmoniki yrgyldysyny doly hasiýetlendirip bilýär.

Indi, yrgyldynyň ýüze çykyş sebäplerine seredeliň. Goý, bize 43-nji suratda görkezilen puržinden asylan käbir jisim berlen bolsun. Jisime daşky güýç täsir etmedik



ýagdaýynda ol özüniň deňagramlylyk halyna saklanar, çünki täsir edýän  $F_{\text{maýş}}$  maýyşgaklyk we  $P$  agyrlık güýçleri özara deňagramlaşýarlar.

Eger-de ol jisimi deňagramlylyk ýagdaýyndan çykaryp käbir aralyga süýşürsek, ýagny süýndirsek we soňra goýbersek dik

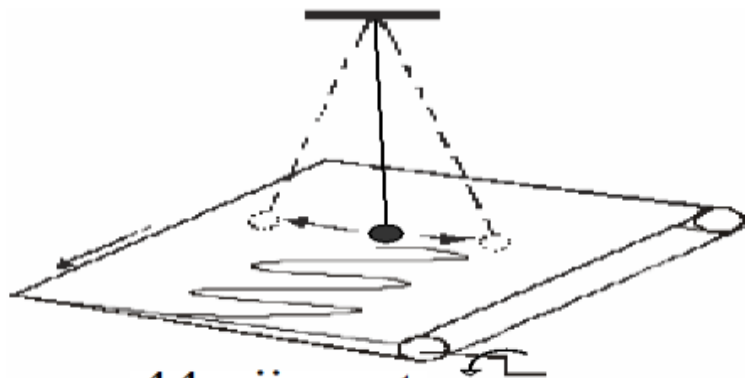


ugurda yrgyldyly hereket eder.  $F_{\text{maýyş}}$  maýyşgaklyk güýjüniň ululygy Gukun kanuny boýunça:  $F_{\text{maýyş}} = -kx$  formula bilen kesgitlenýär, bu ýerde  $F_{\text{maýyş}}$  - maýyşgak güýjüniň ululygy,  $x$  - yrgyldyny ýerine ýetirýän jisimiň absolýut süýşme aralygy,  $k$  – proporsionallyk koeffisiýenti (puržiniň gatylygy).

Nýutonyň ikinji kanunyna esaslansak:  $P = F_{\text{maýyş}}$ . ýa-da  $ma = -kx$ . Bu ýerde tizlenme:  $a = \frac{d^2x}{dt^2}$ , onda  $m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$  ýa-da  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$ . Bu ýerde:  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$  ýa-da  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$  - puržinli maýatnigiň aýlaw ýygylygy. Ýokarky aňlatma puržinli maýatnigiň differensial deňlemesi diýilýär.

Seredýän mysalymyzda, jisimiň yrgyldysy ony deňagramlylyk ýagdaýyna gaýtaryp bilýän güýjüň hasabyna ýerine ýetiriler. Güýjüň ululygy jisimiň süýşmesine göni proporsional, ugry bolsa süýşmä ters ugrukdyrylandyr. Yrgyldyny maýyşgaklyk güýji amal edýär. Seredilen mysalda puržiniň özünde ýüze cykýan maýyşgaklyk güýji jisimi deňagramlylyk ýagdaýyna gaýtaryjy güýjüň ornuny tutar.

**Matematiki maýatnik.** Matematiki maýatnik diýip, agramsyz, süýnmeýän sapakdan asylan we deňagramlylyk



44-nji surat

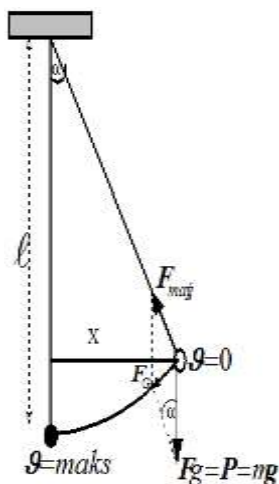
ýagdaýynyň töwereginde yrgyldy edýän material nokada aýdylýar. Matematiki maýatnige deňagramlylyk ýagdaýynda

iki güýç täsir edýär: aşak ugurkdyrylan agyrlýk güýji  $F_g$  we sapagyň ugruna gönükdirilen maýyşgaklyk güýji  $F_{\text{maýyş}}$ . Jisim asuda duran pursatynda ol iki güýç özara deňagramlaşýar.

44-nji suratda görkezilen matematiki maýatnigiň aşagyndaky tekiz üsti şaryň hereketiniň traýektoriyasynyň şekili galar ýaly deň ölçegli süýşürsek süýşýän üstde sinus cyzygyny alarys.

Eger-de matematiki maýatnigi deňagramlylyk ýagdaýyndan käbir  $\alpha$  burça gyşardyp, soňra oňa hereket etmäge mümkinçilik bersek, onda ol garmonik yrgyldyny ýerine ýetirer. 45-nji suratda görkezilen matematik maýatnigiň kiçi burçlara gyşardylyan ýagdaýyna seredeliň. Maýatnik garmonik yrgyldyny agyrlýk güýjüniň täsiri esasynda ýerine ýetirýär.

Maýatnigiň islendik gyşarmasy ýagdaýynda, oňa täsir edýän agyrlýk güýjüni iki düzüjä dargatmak mümkin. Düzüjileriň biri ýüpe täsir edýän maýyşgaklyk güýjüniň tersine ugrukdyrylan. Beýlekisi maýatnigi yzyna gaýtaryjy



45-nji surat

güýç. Ol güýç maýatnigiň deňagramlylyk ýagdaýyna tarap gönükdirilendir we  $F_G$  bilen belgilenýär.

Agyrlýk güýji  $F_g = P = mg$  formula bilen kesgitlenýär. Yzyna gaýtaryjy güýjüň ululygy  $\frac{F_G}{F_g} = \sin \alpha$  ýa-da  $F_G = F_g \sin \alpha = m g \sin \alpha$  formula bilen kesgitlenýär. Bu ýerde  $\sin \alpha = \frac{x}{l}$ . Onda,  $\sin \alpha$ -nyň bahasyny gaýtaryjy güýjüň formulasyna goýup alarys:  $F_G = m g \sin \alpha = m g \frac{x}{l}$ .

Maýatnigi deňagramlylyk ýagdaýyna gaýtaryjy güýç

maýatnige tizlenme hem berip biler  $F_G = ma$ . Ýöne, bu

gaýtaryjy güýjüň maýatnige täsir edýän agyrylyk güýjüniň düzüjisidigini ýatdan çykarmaly däliris. Gaýtaryjy güýç maýyşgaklyk we agyrylyk güýçleri ýaly özbaşdak güýç dälidir.

Onda:  $\mathbf{F}_G = m\mathbf{a} = m\frac{d^2x}{dt^2}$  we  $\mathbf{F}_G = -mg\frac{x}{\ell}$  deňlikleri deňleşdirip alarys:  $m\frac{d^2x}{dt^2} = -mg\frac{x}{\ell}$  ýa-da  $\frac{d^2x}{dt^2} + g\frac{x}{\ell} = 0$ . Gutarnykly alarys:  $\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$ . Matematiki maýatnigiň differensial deňlemesi. Ol deňlemeden  $\omega_0^2 = \frac{g}{\ell}$  aňlatmany alarys.

Gaýtaryjy güýjüň ululygy Nýutonyň ikinji kanunynyň formulasy bilen hasaplanyp bilner. Alan deňliklerimiziň çep taraplary ululyklary boýunça deň. Onda olaryň sag taraplaryny deňleşdirip alarys:  $m\mathbf{a} = mg\frac{x}{\ell}$ . Deňligiň iki tarapyny hem maýatnigiň massasyna gysgaldyp, matematik maýatnigiň tizlenmesini hasaplamak üçin zerur bolan formulany alarys:  $\mathbf{a} = g\frac{x}{\ell}$ .

Matematik maýatnigiň tizlenmesiniň formulasyndan onuň alýan tizlenmesi we  $x$  süýşme wektory biri-birine garşy ugurkdyrylýandygyny bellemek zerur. Çünki maýatnigiň tizlenmesi ulaldygyça onuň süýşme wektorynyň moduly kiçelýär. Diýmek, tizlenmäniň ýokarky formulasyna minus alamatyny goyup alarys,  $a = -g\frac{x}{\ell}$ .

Garmonik yrgyldynyň deňlemesini ulanmak bilen, matematik maýatnik üçin alnan yrgyldynyň tizlenmesiniň deňlemesini täzeden ýazalyň:  $a = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$ . Bu formula maýatnigiň garmonik yrgyldysynyň deňlemesinde, ýagny  $x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$  deňlemede goýup alarys:  $a = -\omega_0^2 x$ .

Tizlenmeleriň iki görnüşde aňladylan formulalary özara deňgüýçli (ekwiwalant). Onda, olaryň sag taraplaryny deňleşdirip alarys:  $-\omega_0^2 x = -g\frac{x}{\ell}$ . Deňligiň iki tarapyny hem süýşmäniň ululygyna gysgaldyp, maýatnigiň aýlaw

ýygýlygyny hasaplamaga mümkinçilik berýän formulany alarys:  $\omega_0^2 = \frac{g}{\ell}$ . Soňky deňlemeden  $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$ . Bu aňlatma matematik maýatnigiň aýlaw ýygýlygynyň formulasydyr. Matematik maýatnigiň aýlaw ýygýlygyny onuň yrgyldysynyň periodynyň üsti bilen aňladarys, ýagny  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  onda:  $\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$ . Bu aňlatmadan matematik maýatnigiň yrgyldysynyň periodyny taparys,  $T = 2\pi: \sqrt{\frac{g}{\ell}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$ .

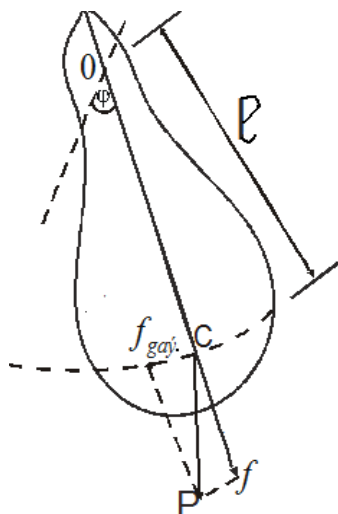
Matematik maýatnigiň yrgyldysynyň periody onuň ýüpüniň uzynlygyndan alnan kwadrat köke göni proporsional, jisimiň erkin gaçmasynyň tizlenmesinden alnan kwadrat köke bolsa ters proporsionaldyr. Matematik maýatnigiň yrgyldysynyň periody onuň massasyna, şeýle hem yrgyldysynyň amplitudasyna bagly däl. Sebäbi yrgyldynyň periody, gaýtaryjy güýç diýen güýjümüziň ululygy bilen kesgitlenýändigine garamazdan, yrgyldyny ýerine ýetirýän jisimiň hususy häsiýetnamasy bolup hyzmat edýär. Ýöne, matematik maýatnigiň yrgyldysynyň amplitudasy onuň fazasy ýaly şol yrgyldynyň ýüze çykmagynyň daşky şertlerine baglydygyny belläp geçmek ýeterlikdir.

### Fiziki mayatnik

Munuň özi agyrlýk merkezi, ýagny inersiýa merkezi bilen gabat gelmeýän nokadyň töwereginde yrgyldyly hereket edýän gaty jisimdir. 46-nji suratda görkezilen  $\ell$ - fiziki maýatnigiň inersiýa merkezi C bilen aýlanma nokadynyň arasyndaky aralyk. Oňa  $\mathbf{f}_{\text{gay}}$  gaýtaryjy güýç,  $\mathbf{P}$  agyrlýk güýji täsir edýär we ol güýçleriň täsirinden kabir  $\varphi$  burça öwrülýär.

Fiziki maýatnik hem g a ý t a r y j y g ü ý j ü ñ momentiniň täsirinden burç tizlenmesine eýe bolýar:  $\mathbf{M} = \beta \mathbf{I}$  we  $M = mg\varphi\ell$ . Onda  $\mathbf{I} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = - mg\varphi\ell$ , ýa-da  $\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mg\ell}{I} \varphi = 0$ .

Gutarnykly alarys:  $\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2\varphi = 0$ . Fiziki maýatnigiň



**46-nji surat**

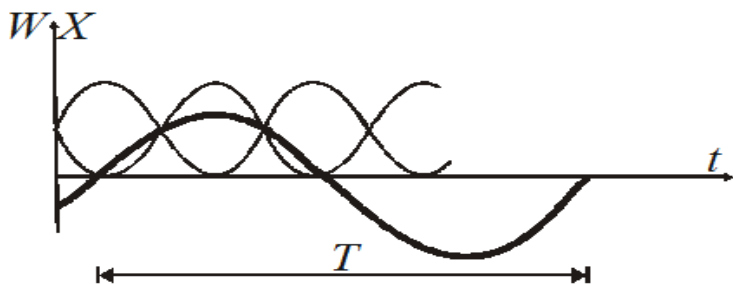
differensial deňlemesi. Fiziki maýatnigiň yrgyldysynyň periody,

$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mg\ell}}$  formula bilen

kesgitlenýär. Bu ýerde  $m$  - fiziki maýatnigiň massasy;  $I$  - fiziki maýatnigiň inersiýa momenti;  $g$  - jisimiň erkin gaçmasynyň tizlenmesi.

**Garmoniki yrgyldy edýän jisimiň energiýasy.** Ol kinetik we potensial energiýalaryň jemine deňdir. Onuň şeýledigine yrgyldynyň energiýasynyň yrgyldynyň bolup geçýän wagt pursatyna bolan baglanşygy

görkezilen 47-nji suratdaky grafik hem güwä geçýär. Kinetik we potensial energiýalaryň haýsydyr biri ulalsa beýlekisi kiçelýär, ýa-da tersine üýtgeýär. Onda yrgyldynyň doly



**47-nji surat**

energiýasyny  $W_k$  we  $W_p$  energiýalaryň jemi görnüşinde ýazarys:  $W = W_k + W_p$ , bu ýerde  $W_p = \frac{kx^2}{2}$  we  $W_k = \frac{m\dot{\varphi}^2}{2}$ .

Potensial we kinetik energiýalaryň bahalaryny yrgyldynyň doly energiýasynyň formulasyna goýup alarys:

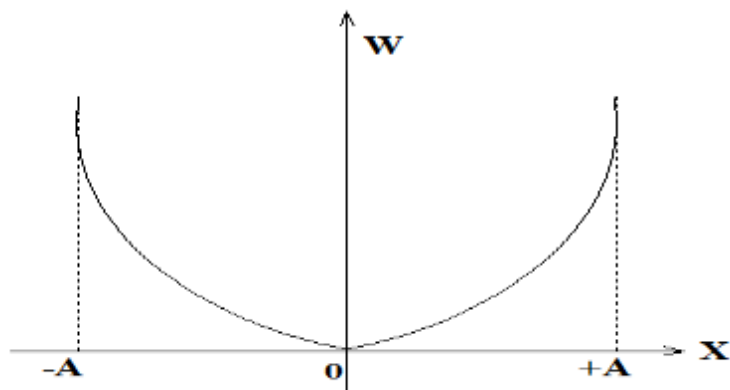
$W = \frac{kx^2}{2} + \frac{m\dot{x}^2}{2} = \frac{kA^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{kA^2\omega_0^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)$ ,  
bu ýerde  $m\omega_0^2 = k$  bolýanlygyny göz önünde tutup alarys:

$$W = \frac{kA^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{kA^2}{2} \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = \\ = \frac{kA^2}{2} [\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)].$$

Belli bolşy ýaly:  $\sin^2(\omega_0 t + \varphi_0) + \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0) = 1$ .

Onda,  $W = \frac{kA^2}{2}$ . Bu alnan aňlatma garmonik yrgyldynyň doly energiýasynyň formulasydyr. Bu ýerde  $A$  - amplituda,  $k$  - proporsionallyk koefisiýenti. Garmonik yrgyldynyň energiýasynyň formulasyndan görnüşi ýaly garmonik yrgyldynyň doly energiýasy onuň amplitudasynyň kwadratyna göni proporsionaldyr.

Garmonik yrgyldyda süýşmäniň amplitudasyna baglylyk grafiline seredip geçeliň. Dik okda yrgyldynyň doly energiýasy, kese okda yrgyldy edýän jisimiň, aýdalyň puržinli maýatnigiň süýşmesini ýerleşdireliň.



48-nji surat

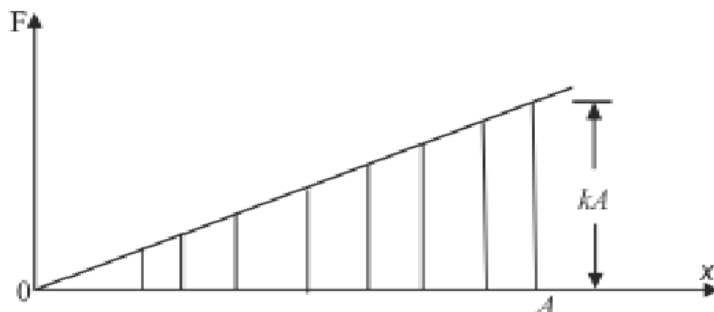
Puržinli maýatnigiň hereketiniň 48-nji suratda görkezilen grafiginden görnüşi ýaly maýatnik deňagramlylyk

ýagdaýynyň töwereginde yrgyldanda, deňagramlylyk ýagdaýyndan daşlaşdygyça onuň  $W_k$ ,  $W_p$  energiýalary üýtgeýär.  $0 < x < A$  pursatlarynda puržinli maýatnigiň doly energiýasy kinetik we potensial energiýalaryň goşulmagyna deňdir.  $x=A$  bolanda yrgyldynyň doly energiýasy onuň potensial energiýasynyň iň uly bahasyna eýedir.

Şol pursatlarda yrgyldy edýän maýatnigiň tizligi nola deň, ýagny  $v=0$ . Şeýle bolýanlygy üçin maýatnigiň kinetik energiýasy hem nola deňdir. Ýöne, puržinli maýatnik özüniň deňagramlylyk ýagdaýyna ugurkdyrylanda onuň tizliginiň kem-kemden ulalýandygyny bellemek gerek. Edil deňagramlylyk ýagdaýyna gelen pursatynda, haçanda  $x=A=0$  bolanda, onuň tizligi iň uly baha eýe bolýar. Şol pursatda tizlik  $v = \omega A = \frac{2\pi A}{T}$  formula bilen kesgitlenilýär. Onuň doly energiýasy şol pursatdaky kinetik energiýasyna deňdir. Onda şol pursat üçin kinetik we potensial energiýalaryň öwrülme we saklanmak kanunlaryna laýyklykda energiýalary deňleşdirip  $\frac{kx^2}{2} = \frac{mv^2}{2}$  deňligi alarys. Tizligiň bahasyny alan deňligimize goýup,  $\frac{m}{2} \left( \frac{2\pi A}{T} \right)^2 = \frac{kA^2}{2}$  aňlatmany alaryş. Soňky deňlemeden  $\frac{m4\pi^2 A^2}{T^2} = kA^2$  deňlik alynýar. Soňra deňligiň iki tarapy hem amplitudanyň kwadratyna ( $A^2$ ) gysgaldyp, yrgyldynyň periodyna degişli formulany alarys:  $\frac{m4\pi^2}{T^2} = k$ , ýa-da  $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$ . Şeýlelikde, sereden mysalymyzdaky puržinli maýatnigiň periody, maýatnigiň massasyndan alnan kwadrat köke göni proporsional we puržiniň gatylyk koeffisiýentinden alnan kwadrat köke bolsa ters proporsionaldyr.

Diýmek, maýatnigiň periody onuň öz häsiýetine bagly ekeni. Puržinli maýatniki deňagramlylyk ýagdaýyndan çykarýan  $F$  güýç we onuň  $x$  süýşmesi arasyndaky (49- njy

surat)baglanşyga seretmek yrgyldyly herekete has çuňňur düşünmäge mümkinçilik berýär.



49-nji surat

Puržinli maýatnigi süýşüriji güýjüň ululygy süýşmä, ýagny  $x$  proporsionallykda üýtgeýär.  $x$  uly bolsa  $F$  uly,  $x$  kiçi bolsa  $F$  kiçi. Diýmek, maýatnigi  $x=A$  aralyga süýşürmek üçin goýlan  $F$  güýç şol  $x=A$  aralykda belli bir iş edýär. Ol işiň ululygy bolsa  $F(x)$  funksiýanyň grafiginiň strihlenen üçburuçlygynyň meýdanyna san taýdan deňdir. Üçburuçlygyň meýdany bolsa  $\frac{kA^2}{2}$ . Diýmek, onuň meýdanynyň ululygyna deň bolan iş puržinli maýatnigiň doly ätiýaçlyk energiýasyny artdyrmaga sarp bolýar, ýagny  $W_k = \frac{kA^2}{2}$ . Puržinli maýatnigiň doly energiýasy amplitudanyň kwadratyna göni proporsional ekeni. Onda, yrgyldynyň amplitudasy yrgyldy edýän jisimi häsiýetlendirýän ululyklaryň esaslarynyň biridir diýip bileris.

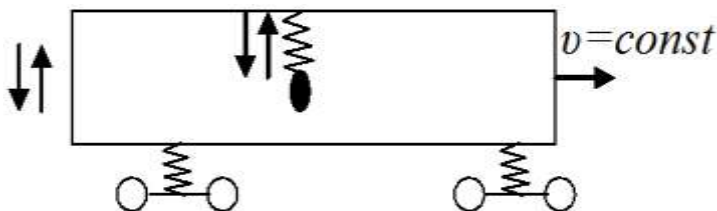
**Bir ugra ugrukdyrylan iki yrgyldynyň goşulyşy.** Puržinli maýatnigiň dik ugurdaky hereketine seretdik, onuň ýerine ýetirýän garmoniki yrgyldysynyň differensial deňlemesini hem getirip çykardyk. Puržinli maýatnigi öňe deňölçeqli  $\vartheta = \text{const}$  tizlik bilen hereket edýän wagonyň potologyndan 50-nji suratda görkezilişi ýaly asalyň. Onda resoryna görä hem dik ugurda yrgyldy edýän wagonyň potologyndan asylan ol puržinli maýatnik şol bir wagtyň



özünde dik ugurda iki yrgyldyly herekete gatnaşýar. Onuň yrgyldylarynyň deňlemesini:

$$y_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

$$y_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$$



50-nji surat

görnüşde aňladyp bileris. Yrgyldylar bir ugurda  $Oy$  okunyň ugrы býunça ugrukdyrylan, olaryň aýlaw ýygylyklary we periodlary deň. Amplitudalary we başlangyç fazalary dürli-dürlidir. 51-nji suratdaky ýaly yrgyldylaryň amplitudalaryny  $y$  okunyň üstünde ýatan,  $O$  nokatdan başlanýan amplitudalaryň wektorlary ýaly göz önüne getireliň. Maýatnigiň  $y$  okunyň ugruna yrgyldylarynyň goşulmasyna esaslanan süýşmesini trigonometrik özgerlmeleri ulanyp, aşakdaky deňlemäni alarys:

$$y = y_1 + y_2 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) =$$

$$= (A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2) \sin \omega t + (A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2) \cos \omega t$$

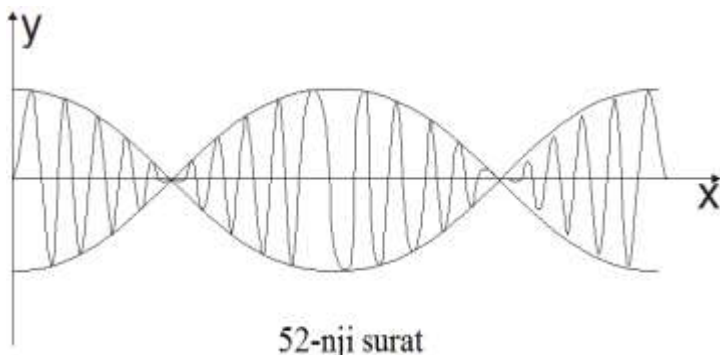
$$= A \cos \varphi \sin \omega t + A \sin \varphi \cos \omega t = A \sin(\omega t + \varphi) \text{ ýa-da}$$

$$y = A \sin(\omega t + \varphi).$$

Alnan aňlatmadan görnüşi ýaly bir ugra ugrukdyrylan, meňzeş periodly yrgyldylaryň goşulmasyndan döreýän yrgyldylaryň periodyna meňzeş şol ugra ugrukdyrylan yrgyldy

alynýar. Muña yrgyldynyň interferensiýasy diýilýär. Jemleýji yrgyldynyň f a z a s y n y  $\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$ , amplitudasy  $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$  formulalar bilen kesgitläp bolýar.

Amplitudalar goşulanda fazalaryň tapawudy  $\varphi_1 - \varphi_2 = 2n\pi$  bolanda amplituda iň uly baha eýe bolýar,  $\varphi_1 - \varphi_2 = (2n + 1)\pi$  bolanda amplituda iň kiçi baha eýe bolýar. Eger bir ugra ugrukdyrylan yrgyldylaryň amplitudalary  $A_1 = A_2$  we fazalary  $\varphi_1 = \varphi_2$  we yrgyldylary az tapawutlanýan bolsa, onda şeýle  $\varphi_1 = \varphi_2$  yrgyldylaryň goşulmasy netijesinde yrgyldylaryň endiremesi alynýar. Endireme hadysasynda jemleýji yrgyldynyň waga bagly bolan süýşmesi 52-nji suratda görkezilen. Analitik görnüşde



yrgyldylaryň jemleýji süýşmesi:

$y = \left| 2 \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right| \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t = A \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$  görnüşde aňladyp bolar. Bu ýerde  $A = \left| 2 \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right|$  bolup, waga baglylykda amplitudanyň absolýut bahasy üýtgeýär. Onuň üýtgeýşi ýokarda ýatladyşymyz ýaly 52-nji suratda görkezilen.

**Özara perpendikulýar yrgyldylaryň goşulyşy.** Deň aýlaw ýygýlykly, periodly iki garmonik yrgyldylaryň Ox we Oy oklaryň ugruna goşulyşyna seredeliň. Olaryň deňlemesi degişlilikde  $x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$ ,  $y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$

deňlemeleriň üsti bilen berilýän bolsun.  $A_1$  we  $\varphi_1$ ,  $A_2$  we  $\varphi_2$  degişiklikde birinji we ikinji yrgyldylaryň amplitudalary we fazalary.

Yrgyldylaryň goşulmagyndan alnan traýektoriýanyň deňlemesini tapmak üçin  $x$  we  $y$  yrgyldylaryň deňlemesindeki wagty ýok etmeli. Onuň üçin ol deňlemeleri aşakdaky ýaly ýazalyň:

$$\frac{x}{A_1} = \cos\omega t \cos\varphi_1 - \sin\omega t \sin\varphi_1,$$

$$\frac{y}{A_2} = \cos\omega t \cos\varphi_2 - \sin\omega t \sin\varphi_2$$

1) Deňlemeleriň ýokarkysyna  $\cos\varphi_2$ , aşakysyna  $\cos\varphi_1$  köpeldip alarys:

$$\left(\frac{x}{A_1} = \cos\omega t \cos\varphi_1 - \sin\omega t \sin\varphi_1\right) \cdot \cos\varphi_2$$

$$\left(\frac{y}{A_2} = \cos\omega t \cos\varphi_2 - \sin\omega t \sin\varphi_2\right) \cdot \cos\varphi_1,$$

olary biri-birinden aýryp gutarnykly alarys

$$\frac{x}{A_1} \sin\varphi_2 - \frac{y}{A_2} \sin\varphi_1 = \sin\omega t \sin(\varphi_2 - \varphi_1).$$

2) Deňlemeleriň ýokarkysyna  $\sin\varphi_2$  aşakysyna  $\sin\varphi_1$  ýokarky ýaly edip köpeldip we olary biri-birinden aýryp alarys:

$$\frac{x}{A_1} \sin\varphi_2 - \frac{y}{A_2} \sin\varphi_1 = \cos\omega t \sin(\varphi_2 - \varphi_1).$$

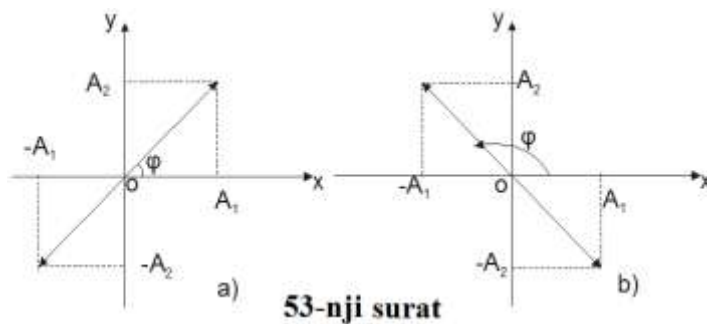
Soňky iki deňlemäni kwadtara göterip, agzama-agza goşup jemleýji yrgyldynyň traýektoriasynyň deňlemesini alarys:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1).$$

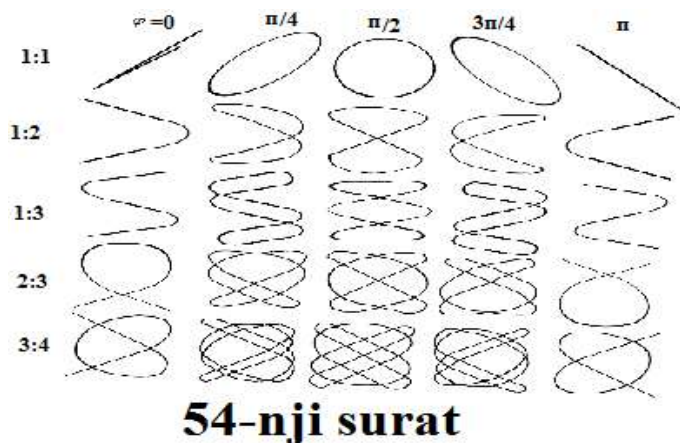
Bu formuladan görnüşi ýaly, jemleýji yrgyldylaryň traýektoriasy ellips forma eýedir. Şeýle yrgyldylara elliptik polýarlanan yrgyldylar diýilýär. Ellipsiň oklarynyň ugry we onuň ölçeg ululygy goşulyşýan yrgyldylaryň amplitudalaryna we fazalar tapawudyna baglydyr. Eger olaryň fazalar tapawudy  $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$  ýa-da  $\varphi_2 = \varphi_1 = \varphi$  bolsa, onda ellipsiň deňlemesi aşakdaky görnüşe eýe bolýar:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} = 0 \quad \text{ýa-da} \quad \left(\frac{x^2}{A_1^2} - \frac{y^2}{A_2^2}\right)^2 = 0.$$

Bu ýerden  $\frac{x}{y} = \frac{A_1}{A_2}$ . Bu bolsa kordinatalar başlangyjyndan geýýän gönileriň deňlemesidir (53-nji surat).



Goşulýan yrgyldylaryň fazalar tapawudy  $\varphi = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ ; yrgyldylaryň gatnaşygy degişlilikde 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 3:4 bolsa, onda 54-nji suratdaky Lissažunyň figuralary diýlip atlandyrylýan figuralar alynýar:



Lissažunyň figuralarynyň görnüşine esaslanyp belli bolan ýygylýk esasynda näbelli ýygylýgy, goşulýşýan yrgyldylaryň ýygylýklarynyň gatnaşyklaryny kesgitlemek mümkin.

**Togtayan yrgyldylar.** Puržinli maýatnigiň yrgyldyly hereketine seretdik. Yrgyldy yzygider we periodik gaýtalanýar diýip, oňa degişli differensial deňlemeler çykaryldy. Wagtyň geçmegi bilen yrgyldynyň amplitudasy kem-kemden kiçelip, yrgyldy togtayar (55-nji surat). Sebabi, ulgama  $F_{\text{mays.}} = -kx$  maýyşgaklyk güýji we puržinden asylan ýükiň tizligine bagly bolan, hereketiň garşysyna ugrukdyrylan  $F_{\text{gars.}} = -r\vartheta$  garşylyk güýji täsir edýär. Bu ulgam üçin Nýutonyň 2-nji kanunynyň formulasy aşakdaky görnüşde ýazylýar:  $m \frac{d^2y}{dt^2} = -ky - r\vartheta$ . Bu ýerde  $k$ -puržiniň maýyşgaklyk koeffisiýenti;  $r$ -garşylyk koeffisiýenti.

Togtayan yrgyldyly hereket edýän ulgam üçin alnan deňlemede deňligiň sagyndaky ululyklary çepine geçirip, deňlemäniň goşulyjylaryny material nokadyň massasyna bölüp alarys:  $\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{k}{m}y + \frac{r}{m}\vartheta = 0$ . Bu ýerde  $\frac{k}{m} = \omega^2$  we  $\frac{r}{m} = 2\beta$  diýip belläp hem-de  $\vartheta$ -ni  $dy/dt$  bilen çalşyryp alarys:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \omega^2y + 2\beta \vartheta = 0.$$

Bu hemişelik koeffisiýentli ikinji tertipli differensial deňlemäni çözmek üçin üýtgeýän taze  $s$  ululyk alalyň we ony  $y$  bilen aşakdaky ýaly baglanyşdyralyň:

$$y = se^{-\beta t}.$$

Bu deňlemäni iki gezek differensirläp alarys:

$$\frac{dy}{dt} = e^{-\beta t} \frac{ds}{dt} - \beta e^{-\beta t} s; \quad \frac{d^2y}{dt^2} = e^{-\beta t} \frac{d^2s}{dt^2} - 2\beta e^{-\beta t} \frac{ds}{dt} - \beta^2 e^{-\beta t} s.$$

alnan bahalary yrgyldynyň ýokarda ýazlan deňlemesinde ornuna goýup alarys:

$$e^{-\beta t} \frac{d^2s}{dt^2} - 2\beta e^{-\beta t} \frac{ds}{dt} - \beta^2 e^{-\beta t} s + 2\beta e^{-\beta t} \frac{ds}{dt} -$$

$$-\beta e^{-\beta t} s + \omega_0^2 e^{-\beta t} s = 0 \quad \text{ýa-da}$$

$$\frac{d^2s}{dt^2} + (\omega_0^2 - \beta^2)s = 0.$$

Soňky deňlemedäki aňlatmany  $\omega_0^2 - \beta^2 = \omega^2$  bilen belgiläp we ony ol deňlemä goýup alarys:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega^2 s = 0.$$

Togtaýan yrgyldynyň differensial deňlemesindeki aýlaw ýygylgynyň položitel bahalarynda ol deňlemäniň çözüwi  $s = A_0 \cos(\omega t + \varphi)$  görnüşinde gözlenilýär. Şeýlelikde,  $\beta^2 \ll \omega_0^2$  bahasynda,

$$y = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

görnüşli, togtaýan yrgyldynyň çözüwi alynýar. Bu ýerde  $A = A_0 e^{-\beta t}$  – togtaýan yrgyldynyň amplitudasy alynýar.

Eger  $t = \frac{1}{\beta}$  bolsa, onda togtaýan yrgyldynyň amplitudasy natural logarifmiň esasyça ( $e$ ) kiçelýär. Bu wagta togtaýan yrgyldynyň relaksasiýa wagty diýilýär. Relaksasiýa wagtynda yrgyldylaryň sanyny  $N_e$  bilen belgilap yzygider iki yrgyldynyň amplitudalaryndan  $A(t)$  we  $A(T+t)$  –den ybarat, peridy  $T$  bolan wagt bilen tapawutlanýan ýanaşyk amplitudalaryň gatnaşygyny alalyň. Oňa togtamanyň dekrementi diýilýär. Onuň natural logarifmine:  $\theta = \ln \frac{A(t)}{A(T+t)} = \beta t = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}$ , togtamanyň logarifmik dekrementi diýilýär. Ol berlen yrgyldyly ulgam üçin hemişelik ululykdyr.

Yrgyldaýan ulgamyň  $E$  doly energiýasynyň bir perioda deň wagtyň dowamynda  $W$  ýitgisine bolan gatnaşygy bilen hasiýetlendirilýän ululyga togtaýan yrgyldyly hereket edýän ulgamyň energiýa gowulygy (dobrotnosty) diýilýär we ol aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:  $Q = 2\pi \frac{E}{W}$ .

Yrgyldynyň gowulygyny  $Q = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e = \frac{\pi}{\beta t} = \frac{\omega_0}{2\beta}$  ýaly aňlamalaryň kömegi bilen hem kesgitlemek mümkin. Soňky aňlatmadan görnüşi ýaly yrgyldaýan ulgamyň energiýa gowulygy relaksasiya wagtynda ýerine ýetilýän onuň yrgyldylarynyň sanyna  $N_e$  proporsionaldyr.

**Mejbury yrgyldy we rezonans.** Yrgyldyly hereket edýän ulgamyň yrgyldysynyň togtamasy üçin ol ulgamyň ýitirýän energiýasynyň öwezini yzygider, periodik dolduryp durmaly. Şeýle doldurma mejbur ediji güýjüň kömegi bilen amala aşyrylyp bilner. Diýmek, togtaýan yrgyldyny häsiýetlendirýän Nýutonyň kanunyna periodik üýtgeýän mejbur ediji  $F_m$  güýji goşmaly bolarys, ýagny

$$F_m = F_0 \cos \omega t.$$

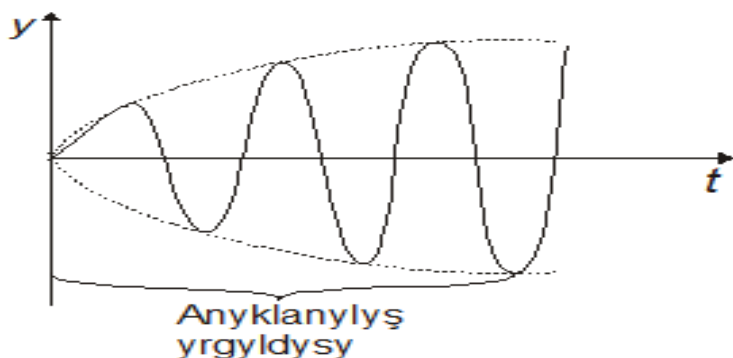
Bu ýerde  $F_0$  - mejbur ediji güýjüň amplituda bahasy.

Netijede, material nokadyň hereketiniň differensial deňlemesini aşakdaky görnüşde ýazyp bolýar:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky - r \frac{dy}{dt} + F_0 \cos \omega t,$$

ýa-da ,

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = \frac{F_0}{m} \cos \omega t = h \cos \omega t .$$



**56-nji surat**

Bu deňlemäniň çözüwinde yrgyldaýan ululygy kompleks san görnüşde ulanalyň. Bu usulda birhilli däl deňlemäniň çözüwiniň hususy haly kompleks formada tapylýar. Onuň üçin mejbury yrgyldynyň deňlemesiniň sag tarapyndaky  $h\sin\omega t$  ululyga derek  $he^{i\omega t}$  kompleks ululygy goýup alarys:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\beta \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = he^{i\omega t}.$$

Alnan soňky deňlemäniň hususy çözüwini  $y = y_0 e^{i\eta t}$  görnüşde gözläliň we ondan birinji we ikinji önüm alalyň:

$$\frac{dy}{dt} = i\eta y_0 e^{i\eta t}, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = -\eta^2 y_0 e^{i\eta t},$$

alnan önümleri mejbury yrgyldynyň deňlemesine goýup, aşakdaky aňlatmany alarys:

$$y_0 e^{i\eta t} (-\eta^2 + 2i\beta\eta + \omega_0^2) = he^{i\omega t}.$$

Bu aňlatmada  $t$  wagty ýok etsek ol wagtyň islendik pursatynda dogry bolar. Eger şeýle bolsa deňlikdäki  $\eta$  belgi aýlaw ýygylgyna deň bolar:  $\eta = \omega$ . Onda

$$y_0 e^{i\eta t} (-\omega^2 + 2i\beta\omega + \omega_0^2) = he^{i\omega t}.$$

Bu deňlemeden

$$y_0 = \frac{h}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2i\beta\omega} = h \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) - 2\beta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\beta^2\omega^2}$$

Bu kompleks sany eksponensial formada aňlatmak amatly, ýagny,  $S_0 = Ae^{-i\varphi}$ , bu ýerde

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + 4\beta^2\omega^2}} \quad \text{we} \quad \varphi = \arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$



Şeýlelikde, mejbury yrgyldynyň differensial deňlemesiniň kompleks formadaky çözüwi:  $y = Ae^{i(\omega t - \varphi)}$  görnüşde bolar. Munuň material bölegi mejbury yrgyldynyň birhilli deňlemesiniň hususy çözügi bolup,  $y = A\cos(\omega t - \varphi)$  görnüşi alar.  $A$  we  $\varphi$  ululyklar ýokarda getirilen aňlatmalar arkaly kesgirtlener.

Diýmek, birhilli däl mejbury yrgyldynyň ikinji tertipli differensial deňlemesiniň hususy halynyň çözüwi,

$$y = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \arctg \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2})$$

görnüşde bolar.

Mejbur ediji  $F_m = h \cos \omega t$  güýç dynçlykda saklanýan nokada (ýüke) täsir etmegi bilen ol ýüki herekete getirer. Nokadyň hereket amplitudasy kem-kemden artar. Şeýle hereket 56-njy suratda görkezilen mejbury yrgyldydyr. Onuň amplitudasy,

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}$$

baha ýetýänçe artar. Yrgyldy şol  $A$  amplitudaly baha ýetende anyk amplitudaly mejbury yrgylda öwrülýär.  $A$  amplitudaly baha çenli amplitudasy az-azdan artýan yrgylda mejbury yrgyldynyň başlangyç anyklanyş yrgyldysy diýilýär. Ol 56-njy surtda görkezilendir. Yrgyldy anyk yrgylda öwrülenden soň amplituda üýtgemeýär.

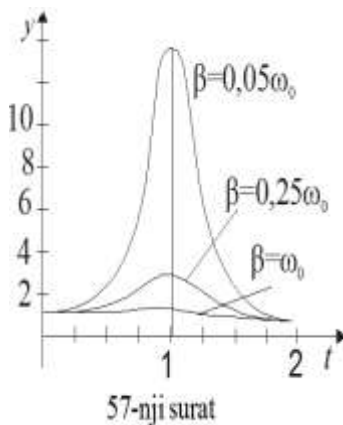
Mejbury yrgyldynyň amplitudasynyň we fazasynyň formulasyndan görnüşi ýaly ol ululyklar mejbur ediji güýjüň  $\omega$  aýlaw ýygylgyna bolan gatnaşygyna bagly. Beýle diýildigi yrgyldy mejbur ediji güýç bilen aýakdaş gitmeýär, ýagny mejbury yrgyldy özüniň in uly süýşmesine mejbur ediji güýjüniň bahasy uly pursatynda alyp bilmeýär. Eger  $\beta = 0$

bolsa, onda yrgyldy ýaly güýç hem bir fazada bolýar. Galan ýagdaýlarda faza  $\varphi \neq 0$ .

Mejbury yrgyldynyň in täsin ýagdaýy yrgyldynyň amplitudasynyň güýjüň amplitudasyna proporsional bolmagyndadyr. Mejburi ediji güýjüň aýlaw ýyglygy yrgyldynyň  $\omega_0$  hususy ýyglygynyň hemişelik pursatynda üýtgeşe, onda mejbury yrgyldynyň amplitudasy hem üýtgeýär. Ol üýtgame amplitudanyň ulalmagyna alyp barýan bolsa onuň in uly bahasyna mejburi ediji güýjüň ýyglygynyň  $\omega_{in\ uly}^2 = \omega_0^2 - 2\beta^2$  bahasyna deň bolanda gözegçilik etmek mümkin. Şeýle in uly bahanyň peýda bolmagy rezonans hadysasynda mümkin. Onda, soňky aňlatmadan rezonans ýyglygynyň  $\omega_{in\ uly} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$  bahasyny alarys. Şol pursatda amplitudanyň in uly bahasy  $A_{in\ uly} = \frac{h}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$ .

Eger gurşawyň garşylygy  $\beta = 0$  bolanda amplitudanyň in uly bahasy üçin  $\omega_{in\ uly} = \omega_0$  deňlik ýerine ýetse, haçanda mejburi ediji güýjüň ýyglygy ulgamyň hususy ýyglygyna deň bolanda alynýar. Şu ýagdaýda mejbury yrgyldynyň ýyglygy tükeniksiz ulalar. Gurşawyň garşylygy noldan tapawutly bolsa amplitudanyň ulalmagy hiç haçan tükeniksizlige ýetmeýär. Onuň in uly bahasy  $\omega_{in\ uly}$  hususy yrgyldynyň ýyglygyndan kiçi pursatlarynda alynýar. 57-nji suratdaky egrilere rezonans egriler diýilýär. Grafikden görnüşi ýaly rezonans egrileriniň in uly bahasynyň ulaldygyça ýyglygyny ýerine ýetirýän ulgamdaky  $\beta$  garşylyk koeffisiýenti şonça-da kiçelýär.

Rezonans hadysasynyň



peýdaly hem zyýanly taraplary bardyr. Meselem, köprüler gurlanda olaryň egrilik radiusynyň ululygy ýüki götermeli, üstünden geçirilmeli ýükleriň hususy yrgyldylarynyň ýygylgy daşky mejbur ediji güýçleriň ýygylgy bilen gabat gelmez ýaly saýlanylyp alynýar. Eger olar gabat gelse, onda weýrançylyk bolmagy, ýagny köprüleriň ýumrulmagy mümkin.

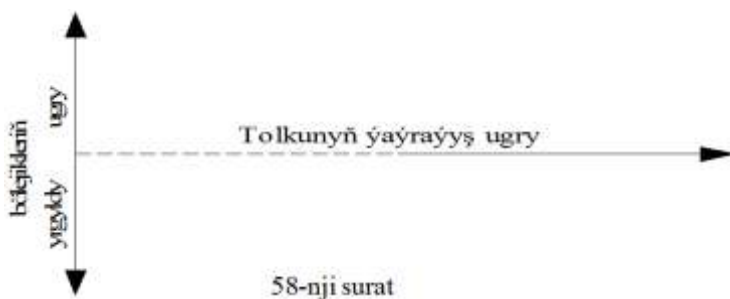
### **Mehaniki tolkunlar**

Yrgyldynyň gurşawda (gaty, suwuk, gaz) ýaýramagyna tolkun diýlýär. Bize belli bolşy yaly gaty, suwuk we gaz maddalar atom diýlip atlandyrylýan bölejiklerden durýar. Ol bölejikler özara biri-biri bilen täsir edişýärler. Ol täsir edişmeklik bölejikleriň öz arasynda ýüze çykan baglanyşyk güýçleriniň üsti bilen amala aşyrylýar. Şeýle maýyşgak baglanyşygyň sebäpkäri maýyşgak güýçlerdir. Hadysa maýyşgaklyk diýlip at berilýär. Gurşawa bolsa maýyşgak gurşaw diýilýär. Şeýle gurşawlarda ýaýraýan yrgyldylara maýyşgak tolkunlar diýilýär.

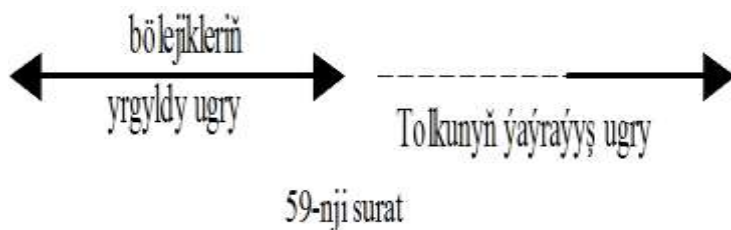
Maýyşgak güýçleriň gurşawda ýüze çykmasy we onda tolkunýň ýaýramagy daşky güýçleriň şol gurşawyň bölejiklerini herekete getirmegi bilen düşündirilýär. Daşky güýç sebäpli herekete gelen, berlen gurşawyň bölejigi, şol gurşawyň goňşy bölejikleriniň arasynda baglanyşyk güýçleriň barlygy sebäpli, özüniň goňşysyna, ol indiki bölejige we beýleki bölejik gapdalyndaka täsir edip yrgyldamaklyga mejbur bolýarlar we özüniň goňşy bölejiklerini herekete getirýärler. Şeýlelikde, gurşawda yrgyldy ýaýrap, şol gurşawda tolkuný ýüze çykarýar. Şu hadysada tolkunlaryň hemmesiniň häsiýetine mahsus bolan maddanyň geçirlişine däl-de energiýanyň geçirilişine gözegçilik edilýär.

**Kese we boý tolkunlar.** Eger-de yrgyldaýan jisimiň ýa-da gurşawyň bölejikleriniň yrgyldy ugry tolkunýň ýaýraýyş ugruna perpendikulýar bolsa, beýle tolkuna kese tolkun

diýilýär. 58-nji suratda ony aşakdaky ýaly görkezmek mümkin.

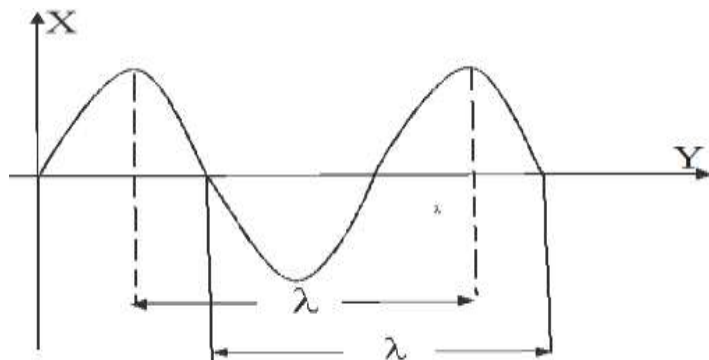


Gurşawyň bölejikleriniň yrgyldy ugry tolkunýň ýaýraýyş ugryna gabat gelse, beýle tolkuna boý tolkun diýlýär. 59-nji suratda ony aşakdaky ýaly görkeziris: Mysal üçin gysylan ýa-da süýndirilen puržinde tolkunýň ýaýraýyş boý tolkunyna mysal bolup biler.



Grafik usulda tolkunun 60-nji suratda görkezilen ýaýraýyşyna seredeliň. Koordinata ulgamynyň dik okuna yrgyldynyň amplitudasyny, kese okunda bolsa, yrgyldynyň, ýagny tolkunýň ýaýraýyş ugruny aňladalyň.

Tolkunyň gurşawda ýaýraýyşyny häsiýetlendirmek üçin tolkun uzynlygy diýlen düşünje girizilýär we  $\lambda$  harpy bilen belgilenilýär. 60-nji suratda  $\lambda$  -ýaýraýan tolkunýň tolkun uzynlygy görkezilen. Tolkunyň tolkun uzynlygy diýip gurşawyň bir deň fazada yrgyldaýan islendik iki nokadynyň



60-nji surat

aralygyna aýdylýar.

Tolkun uzynlygyny, tolkunýň ýaýraýyş tizligi we yrgyldynyň periody bilen baglanyşdyryp aşakdaky ýaly formulany alyp bileris:  $\lambda = \vartheta T$  ya-da:  $\vartheta = \lambda \nu$ , bu yerde,  $\lambda$  – gurşawda ýaýraýan tolkunýň tolkun uzynlygy,  $\vartheta$  - tolkunýň ýaýraýyş tizligi,  $T$  – gurşawyň bölejikleriniň yrgyldysynyň periody,  $\nu$  – yrgyldynyň ýygyllygy.

Tolkunýň gurşawda ýaýraýyş tizliginiň ululygyny, tolkun uzynlygyny, yrgyldynyň ýygyllygyna köpeldilmek hasyly bilen kesgitleýärler. Şu ýerde öň belläp geçişimiz ýaly şeýle zada ünsi çekmeklik zerur. Gurşawda tolkun ýaýraýan wagtynda gurşawy düzýän bölejikler öz deňagramlylyk ýagdaýlarynyň töwereginde yrgyldaýarlar. Ondan daşlaýyp bilmeýärler-de tolkunýň şol gurşawda ýaýramagyna goldaw berýärler. Diňe şol gurşawyň bölejikleriniň arasynda energiýanyň bir bölejikden beýleki bir bölejige geçirilişi bolup geçýär. Şeýlelikde, tolkun gurşawda ýaýranda, gurşawyň bölejikleri öz deňagramlylyk ýagdaýynyň töwereginde yrgyldy edip energiýany öz goňsýalaryna geçirip ýetişýär.

60-njy suratdan görnüş i ýaly birmeňzeş fazada yrgyldaýan iň ýakyn iki nokadynyň aralygyna tolkunýň

uzynlygy diýlişi ýaly, şeýle nokatlaryň geometrik ornuna tolkun üsti ýa-da tolkun fronty diýilýär. Ýaýraýan tolkun tekiz üst görnüşinde bolsa oňa tekiz tolkun, sfera görnüşinde bolsa, oňa sferik tolkun diýilýär.

**Ylgaýjy tekiz tolkunýň deňlemesi.** Energiýany giňişlikde geçiriji, päsgelçiliksiz ýaýraýan tolkuna ylgaýjy tolkun, tekiz bolsa, ylgaýjy tekiz tolkun diýilýär. Tolkuna energiýanyň berlişi mukdar taýdan energiýa akymynyň dykzlyk wektory, maýyşgak tolkunlar üçin rus alymy Umowyň wektory bilen häsiýetlendirilýär. Umowyň wektorynyň ugry energiýanyň geçiriliş ugry bilen gabat gelýär. Ylgaýji tekiz tolkunýň deňlemesini koordinat başlangyjyndan çepe(minus alamatly) we saga (plýus alamatly):

$$f(x,t) = A \cos \omega(t - \frac{x}{g}), \text{ şeýlede } f(x,t) = A \cos(t + \frac{x}{g})$$

ýa-da

$$f(x,t) = A \cos 2\pi(\frac{t}{T} - \frac{x}{g}), \text{ şeýlede } f(x,t) = A \cos 2\pi(\frac{t}{T} + \frac{x}{g})$$

görnüşde aňladarys. Bu ýerde  $A$  - tolkunýň amplitudasy,  $\omega$  aýlaw ýygylgy,  $\omega(t - \frac{x}{g})$  - tekiz tolkunýň fazasy.

Tolkuny häsiýetlendirmek üçin tolkun sany diýilýän ululyk girizilýär we ol  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$  bilen aňladylýar. Ol  $2\pi$  metrde näçe tolkun uzynlygynyň ýerleşip biljekdigini görkezýär. Onda ylgaýjy tolkunýň deňlemesini  $f(x,t) = A \cos(\omega t - kx)$  görnüşde hem aňladyp bolýar. Bu tolkun  $x$  okunyň otrisatel ugry boýunça ýaýraýar, ony Eýleriň kompleks sany bilen çalşyryp alarys:

$$f(x,t) = A e^{i(\omega t - kx)}.$$

Eger tolkun hadysasynda onuň fazasy hemişelik bolsa, onda  $\omega(t - \frac{x}{g}) = const$ , görnüşde aňladyp bolýar. Ol deňlemäni differensirläp alarys:  $dt - \frac{1}{g} dx = 0$ . Bu ýerde  $\frac{dx}{dt} = g$  -

tolkunynyň fazasynyň orun üýtgame tizligi. Oňa tolkunynyň faza tizligi diýilýär.

Birhilli gurşawda ýaýraýan tolkunynyň tolkun deňlemesini önümiň hususy differensial deňlemesiniň üsti bilen hem aňladyp bolýar:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{\vartheta^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

$x$  okunyň ugruna ýaýraýan tekiz tolkunynyň deňlemesi,

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{1}{\vartheta^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$$

görnüşde bolar.

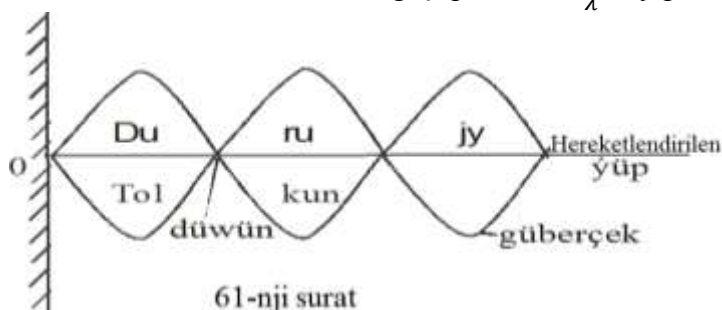
**Duruşy tolkunlar.** Iki ýa-da köp tolkunlaryň giňişlikde ýaýranda goşulyşybam, goşulyşmanam biler. Ol tolkunlar dürli çeşmelerden çykybam, çykmanam biler. Eger-de biri-birine baglanyşyksyz dürli çeşmelerden çykan tolkunlar özlerinden başga tolkun ýok ýaly ýaýraýan bolsa beýle yagdaya superpozisiya düzgüni diýilýär. Bu düzgüne laýyklykda tolkunlaryň ýaýraýan gurşawlarynyň bölejikleriniň süýşmesi şol bölejigiň gatnaşýan tolkunlarynyň her birinden aýry-aýrylykda alýan süýşmeleriniň geometrik jemine deň bolmaly, çünki tolkunlar ýaýran pursatlary biri-birine täsirini ýetirmeýärler, biri-birine baglanyşyksyzlykda ýaýraýar. Şol tolkunlaryň ýaýramagyndaky yrgyldylara gatnaşýan gurşawyň aýry-aýry bölejigi bir wagtyň özünde özara baglanyşyksyz iki, üç we köp ýygylýkly herekete gatnaşar.

Şol gatnaşyş yrgyldyly herekete goşulýan yrgyldylaryň ýygylýklaryna, amplitudalaryna we fazalar tapawudyna bagly.

Eger-de sazlaşykly iki tolkunynyň fazalar gatnaşygyna baglylykda jemleýji tolkunynyň güýçlenmesi ýa-da peselmesi alnan bolsa iki tolkunynyň giňişlikdäki beýle goşulyşyna

tolkunlaryň interferensiýasy diýilýär. Deň ýygylkda we amplitudada biri-birine garşylykly ýaýran ylgaýjy tolkunlaryň goşulyşmagy hem bolup biler. Şeýle goşulyşmadan alnan jemleýji tolkuna durujy tolkun diýilýär. Şeýle tolkun 61-nji suratda görkezilen.

Garşylykly ugra, şol bir  $x$  okuň položitel we otrisatel ugrunda ýaýraýan iki tolkun aşakdaky deňlemeler bilen berlipdir diýeliň:  $f_1 = A \cos(\omega t - kx)$ , şeýlede  $f_2 = A \cos(\omega t + kx)$ . Deňlemeleri goşup we  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  diýip durujy



tolkunýň deňlemesini alarys:

$$f = f_1 + f_2 = 2A \cos kx \cos \omega t = 2 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \cos \omega t.$$

Alnan deňleme tolkunýň islendik nokadynyň islendik wagat pursatyndaky ýaýraýşyny kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Tolkunýň gurşawda ýaýramagyndaky yrgyldy herekete gatnaşýan nokatlaryň hemmesiniň garmoniki yrgyldyly hereketi ýerine ýetirýändigini deňleme görkezýär. Nokatlaryň yrgyldy amplitudasy dürli baha eýe. Onuň şeýledigine durujy tolkunýň deňlemesindeki  $2A \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} = 2A \cos kx$  wagta bagly bolmadyk aňlatmadan hem görünýär. Yrgyldysy kesgitlenýän nokatdan käbir başlangyç nokada çenli  $x$  aralyga durujy tolkunýň amplitudasy baglanyşykly bolup galýar. Aňlatmadaky  $\cos kx$  -iň absolýut ululygynyň 0-dan 1-e çenli üýtgemeginde dürli nokatlaryň amplitudalary 0-dan  $2A$  aralyga üýtgeýär. Şonda iň uly amplituda eýe bolan nokatlara örküçler,



amplitudanyň 0 bahalaryna eýe bolan nokatlara bolsa düwünler diýilýär.

Örküşleriň we düwünleriň haýsy nokatlarda ýatjaklygyny kesgitlemek üçin amplitudasy  $\cos 2\pi \frac{x}{\lambda}$  -ni, degişlilikde, bire we nola deňläp alarys:

a)  $\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} = 1$ , şert  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm k\pi$  bolanda dogrudyr. Eger  $k=0,1,2,3\dots$  diýsek  $x$ -iň bahalary aşakdaky ýaly bolar:  $x = \pm k \frac{\lambda}{2}$ ,

onda,  $x = \pm 2 \frac{\lambda}{2}$ ,  $x = \pm 4 \frac{\lambda}{2}$  ...nokatlarda örküşler alnar;

b)  $\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} = 0$  şert  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm (2k + 1) \frac{\pi}{2}$  bolanda dogrudyr. Eger  $k = 0,1,2,3\dots$  diýsek  $x$ -iň bahalary aşakdaky ýaly bolar:  $x = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ , onda,  $x = \pm \frac{\lambda}{2}$ ,  $x = \pm 3 \frac{\lambda}{2}$ , nokatlarda düwünler alynýar.

Ylgaýan tolkunlardan tapawutlylykda durujy tolkunlarda gidýän we serpigýän birdeň amplitudaly tolkunlar şol bir energiýany garşylykly ugurlara äkidýändigini üçin olarda energiýanyň äkidilmesi bolmaz. Şonuň üçin düwün nokatlarynyň arasynda durujy tolkunyň doly energiýasy üýtgeşsizligine, hemişelik bolmagyna galýar. Diňe, ýarym tolkun  $\frac{\lambda}{2}$  uzynlygyna deň bolan aralyklarda kinetik energiýanyň potensial energiýa öwürülmeleri bolup geçýär.

### Ses tolkunlary

Fizikanyň ses hadysasyny öwrenýän bolumine akustika diýilýär. Ses tolkunlary ýaýranda adamlaryň ýa-da jandarlaryň eşidiş agzalaryna täsir edende ses duýgusy döredilýär. Adamyň eşidiş agzasy ses tolkunlarynyň 16 Gs ýygylgyndan 20 kGs ýygylgyna çenli bolan ses tolkunlaryny eşitmäge ukyply. 16 gersden kiçi bolan sese, ýagny  $16 \text{ Gs} > v_{\text{infr.}}$ , adamyň gulagynyň eşidip bilmeýän ses tolkunlaryna infrasesler diýilýär. Şeýle hem  $v_{\text{ultr.}} > 20 \text{ kGs}$  -

den uly ýygyllykly sesleri hem adamynyň gulagy eşidip bilmeyar. Ol sese ultrases diýliyar, yagny  $20\text{ kGs} < v_{\text{ultr.}}$ .

Sesiň gurşawda ýaýraýyş tizligini  $\vartheta = \frac{s}{t}$  formula bilen kesgitleýärler. Ses dürli gurşawda dürli tizlikler bilen ýaýraýar. Dykyz gurşawda, aýdalyň gaty jisimlerde, suwuk we gaz halyndaky gurşawlara garaňda, ses has ýokary tizlik bilen ýaýraýar. Dykyz gurşawa garanyňda dykyzlyklary pes bolan suwuklyklarda ses tolkunlary kiçi, ýöne dykyz däl gurşawa garanda, aýdalyň howadaka deňeşdirilende ýokary tizlik bilen ýaýraýar. Wakuumda, ýagny howasyz giňişlikde ses tolkunlaryny ýaýradyjy bölejikler bolmaýar. Şonuň üçin howasyz giňişlikde ses tolkunlary ýaýramaýar.

Ses üç görnüşde bolýar:

- 1) ses urgulary;
- 2) galmagallar;
- 3) saz sesleri.

Ses urgulary tüpeň atylanda, güýçli ýarylyş bolan wagtynda, elektrik uçgunynda we ş.m. pursatlarda ýüze cykyp bilýär.

Galmagally sesler periodiki dal urgy wagtynda ýüze çykýar. Meselem: şemalyň şuwuldysy, metal metalyň üstünden hereket eden wagtyndaky ýüze cykýan sesler, araba ýörän wagtynda onuň tigri we oky aralygyndaky çykýan ses we ş.m.

**Saz sesleri** – ses çeşmeleriniň periodiki yrgyldysynyň netijesinde ýüze cykyp bilýär. Kamertondan cykýan ses, saz gurallarynyň tarlaryndan çykýan sesler muňa mysal bolup biler. Sesleri häsiýetlendirmek üçin sesiň belentligi, gatylygy diýlen düşüňjeler girizilýär. Eger yrgyldynyň ýygyllygy pes bolsa, sesiň gatylygy gurşawda ýaýraýan yrgyldynyň amplitudasyna bagly. Eger yrgyldynyň amplitudasy uly bolsa ses şonça-da gaty bolýar, ýagny belentligi ýokary bolýar. Eger yrgyldynyň amplitudasy kiçi bolsa ses şonça-da pes bolyar, yagny gatylygy kici.

Sesiň belentligi gurşawda ýaýraýan yrgyldynyň ýygylgyna bagly. Ýokary ýygylkly yrgyldylar gurşawda ýaýranda, onda oňa ýokary äheňli ses diýilýär. Eger yrgyldynyň ýygylgy pes bolsa, onda oňa pes äheňli ses diýilýär.

**Ultrasesler** – ýokarda belleýşimiz ýaly, örän uly ýygylkly seslerdir, ýagny tolkunlardyr. Olar suwuklygyň içinde ýerleşdirilen jisimi pytratmaga çenli ukyply. Ultrasesler güýçli biologiki tasir etmeklige, esasanam mikroplara tasir etmage ukyply. Ultrasesler howadaka garanda suwuklyklarda dowamly ýaýraýar. Şonuň üçin hem suwda ultrasesli ses ýaýradyjylar gözegçilik işlerinde, ylmy işlerde, durmuşda, aýdalyň suwuklyk çuňluklaryny ölçemeklikde, suwasty gerşleri tapmaklykda giňden peýdalanylýar. Mundan daşary hem ultrasesler metal önümlerindäki bar bolan yetmezçilikleri (deffektleri) tapmaklyk üçin peýdalanylýar.

## EDEBIYATLAR:

1. Türkmenistanyň Konstitusíasy. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiniň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
3. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiniň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
4. Gurbanguly Berdimuhamedow. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, Halky söýmek bagtdyr. Aşgabat, 2007.
5. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistan – sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. Aşgabat, 2007.
6. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň Ministrler Kabinetiniň göçme mejlisinde sözlän sözi. (2009-njy ýylyň 12-nji iýuny). Aşgabat, 2009.
7. Türkmenistanyň Prezidentiniň “Obalaryň, şäherleriň, etrapdaky şäherçeleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşayyş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin” Milli maksatnamasy. Aşgabat, 2007.
8. “Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry” Milli maksatnamasy. “Türkmenistan” gazetini, 2003-nji ýylyň, 27-nji awgusty.
9. “Türkmenistanyň nebitgaz senagatyny ösdürmegiň 2030-njy ýyla çenli döwür üçin Maksatnamasy”. Aşgabat, 2006.
10. И Трофимова. Курс физики., Москва, Высшая школа 1990.
11. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. Курс физики.– Москва, Высшая школа 1989.
12. Agaýew Ý., Baýramow D. Fizika, I, II, III we IV bölüm, Aşgabat, 1992.
13. Kelow G., Kadyrow Ý., Hojamkulyýew A. Leksiýalaryň konspekti (mekanika we molekulýar fizika).– 1996.

14. Çaryýew A.A. Fizika (esasy kanunlar). Aşgabat, Türkmen döwlet neşirýat gullugy.– 2005 ý.
15. Nurgeldiyew A., Bekmyradow O., Akmuradow B. Molekulyar fizika we termodinamika.– Aşgabat, Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2006.

## MAZMUNY:

1. Giriş .....	7
2. Gözegçiligiň statistik we termodinamik usullary .....	14
3. Içki entrgiýa. Iş, ýylylyk mukdary, ý y l y l y k . . . . .	36
4. Molekulalaryň tizlikleri we energiýalary boýunça bölünşi	48
5. Geçiş hadysalary .....	60
6. Karnonyň aýlawy .....	72
7. Hakyky gazlar .....	82
8. Suwuklyklar .....	98
9. Gaty jisimleriň häsiýeti .....	105
10. Mehaniki garmoniki yrgyldylar .....	109
11. Mehaniki tolkunlar .....	136