

**«Молекулалық физикадан физикалық практикум» пәнінен «5B060500 –  
ядролық физика» мамандығы бойынша білім алушы студенттерге арналған қысқаша  
лекциялар**

*Куйкабаева Айжан амангалиевна*

**Лекция 1. Қателіктер теориясының элементтері және өлшеу нәтижелерін өңдеу.**  
Өлшеу түрлері. Өлшеу қателіктері. Жанама өлшеу қателіктерін табу. Тура өлшеу қателіктерін табу. Кіші квадрат әдісі.  
Жанама өлшемнің нәтижесін өңдеу.

Кездейсоқ қате - деп мәні өзгермелі, кездейсоқ себептерден пайда болатын қатені айтады. Берілген шаманы қайталап өлшеген сайын қатенің сандық мәні біресе азайып, біресе көбейіп ешқандай заңдылықсыз өзгеріп отырады.

Ықтималдық теориясы кездейсоқ оқиғаларды және олардың ықтималдығын зерттеудің математикалық әдістерін береді. Ықтималдық теориясы мен математикалық статистиканың қағидаларына сүйене отырып қателер теориясы өлшемнің кездейсоқ қателерінің, кездейсоқ оқиғалардың пайда болу заңдылықтарына бағынады деп қарастырады. Кездейсоқ шамалардың дәл мәндерін табу үшін оларды қандай ықтималдықпен анықтаудың жолдары ықтималдық теориясы мен математикалық статистика заңдылықтарынан шығатынын көреміз.

Қателіктердің жіктелуі

Өлшеу құралдары мен нәтижелерінің сапасын, қателіктерін көрсете отырып, сипаттау қажет. “Қателік” деген ұғымды енгізу мыналар сияқты үш ұғымдарды анықтау және нақты шектеуді қажет етеді: өлшенетін физикалық шаманың шын және нақты мәні мен өлшеу нәтижесі. Физикалық шаманың шын мәні – берілген объектінің мөлшерлі түрдегі және сапасы жағынан қасиетін бейнелейтін идеалды мәні. Ол біздің сана сезімімізге тәуелді емес, идеалды шама болып табылады. Тәжірибеде бұл абстракталы ұғымды “ақиқат шама” деген шамамен алмастырған жөн. Физикалық шаманың нақты мәні – бұл тәжірибеден алынған және мақсатқа сай сол бір керекті шын мәнге жақын шама болып табылады. Өлшеу нәтижесі - өлшеу жолымен алынған шаманың шын мәнін өзінше жуықтап бағалау.

“Қателік” деген ұғым “өлшеу нәтижесінің қателігі” және “өлшеу құралдарының қателігі” деген түсініктемелерден тұратын метрологияның ең маңызды мәселесі. Өлшеу нәтижесінің қателігі – ол өлшеу нәтижесі  $X$  пен өлшенетін шаманың ақиқат (немесе нақты) мәні  $Q$  арасындағы айырымы:

$$\Delta = X - Q \quad (4.1)$$

Ол өлшенетін шама мәнінің анықталмау шегін көрсетеді. Өлшеу құралдарының қателіктері – ол ӨЖ көрсеткіштері мен өлшенетін ФШ-ның айғақты (немесе нақты) мәндері арасындағы аралықты көрсетеді. Ол берілген құралдар арқылы жүргізілген өлшеу нәтижелерінің дәлділігін сипаттайды.

Бұл екі түсініктемелер бір-біріне едәуір жақын және бірдей белгілермен жіктеледі.

Әсер ету сипаты бойынша қателіктер кездейсоқ, жүйелі, прогрестенуші және дөрекі (қате жіберу) болып бөлінеді.

Қателіктердің жоғарыда келтірілген анықтамаларынан олар қандай-да бір құраушылардан тұратыны тиіс екенін байқалмайды. Қателіктерді құраушыларға бөлу олардың көрсетілу

сипатына қарай өлшеу нәтижелерін өңдеу қолайлығы үшін енгізілген. Метрологияның құрылу процесінде қателік тұрақты шама емес екені байқалды. Қарапайым талдау жолымен оның бір бөлігі тұрақты шама ретінде көрсетілетіні, ал екіншісі – алдын ала болжанбай өзгереді. Бұл бөліктерді жүйелі және кездейсоқ қателіктер деп атайды.

Кездейсоқ қателік – қандай да бір ФШ-ны бірдей жағдайларда ұқыпты түрде қайталап өлшеу кезінде кездейсоқ түрде (таңбасы мен мәні бойынша) өзгеретін өлшеу нәтижелерінің бір құрамы болып табылады. Мұндай қателіктер пайда болған кезде ешқандай заңдылыққа жүгінбейді, ол бірдей шамаларды қайталап өлшеу нәтижесінің кейбір шашырандысы түрінде алынады. Кездейсоқ қателіктерден біз құтыла да, жоя да алмаймыз, олар әрқашан да өлшеу нәтижелерінде болады. Кездейсоқ қателіктер кездейсоқ процесстер мен математикалық статистика теориясы негізінде ғана бейнеленуі мүмкін.

Кездейсоқ қателіктерді жүйелі қателіктен айырмашылығы, оны өлшеу нәтижесінен түзету жолы арқылы жоя алмаймыз, бірақ оларды бақылау санын жоғарлату жолымен азайтуға болады. Сондықтан да нәтижені өлшенетін шаманың шын мәнінен минималды аз ғана ерекшеленетін түрде алу үшін, қажетті шаманы тәжірибеде берілген мәндерді математикалық тізбекті өңдеу арқылы көп ретті өлшеу керек.

Жүйелі қателік – бірдей ФШ-ны қайталап өлшеу кезінде тұрақты түрде қалатын немесе ережелерге сәйкес өзгеретін өлшеу нәтижелерінің құрамы болып табылады. Оның ерекшелігі - олар алдын ала болжанып, табылады және осыған байланысты құраушы түзетпелерді енгізе отырып, толығымен жойыла алады.

Прогрестенуші (дрейфтік) қателік – бұл уақыт бойынша жәй өзгеретін, алдын ала болжанылмайтын қателік. Прогрестенуші қателіктердің ерекше қасиеттері:

олар тек берілген уақытта ғана түзету арқылы көшіріле алады да, кейін алдын-ала болжанбай өзгере береді;

прогрестенуші қателіктердің уақыт бойынша өзгеруі - тұрақсыз кездейсоқ прогресс, сондықтан да тұрақты кездейсоқ процесстердің жақсы өңделген терия негізінде тек белгілі ескертпелер арқылы беріледі.

Прогрестенуші қателік – бұл қателіктердің уақыт бойынша өзгеруінің тұрақсыз кездейсоқ процессі үшін спецификалық ұғым, ол кездейсоқ және жүйелі қателік ұғымдарына келтіріле алмайды. Бұлар тек тұрақты кездейсоқ процесстер үшін ғана сипатты. Прогрестенуші қателік тұрақсыз кездейсоқ процесстің ағынды математикалық күтілуінің уақыт бойынша тұрақсыздығымен қатар, оның түрі мен дисперсиясының таралу заңдылығында уақыт бойынша өзгеруі салдарынан туу мүмкін.

Дөрекі қателік (қате жіберу) – бұл өлшеу қатарына кіретін жеке бақылау нәтижесінде алынатын кездейсоқ қателік, ол берілген шарттарда осы қатардың басқа нәтижелерінен лезде ерекшелене алады. Олар, ереже бойынша, оператордың қателігі немесе дұрыс емес әрекеттерінен (оның психофизиологиялық жағдайы, дұрыс есептемеуі, жазба немесе есептеуде кеткен қателіктер, аспаптарды дұрыс қоспауы немесе олардың жұмыс кезіндегі бөгеттер және т. б.) пайда болады. Қателіктің пайда болуының себебі өлшеу жүргізу жағдайының аз уақытта лезде өзгеруі болып табылады. Егер қателіктер өлшеу процесінде пайда болса, олардан тұратын нәтижелер алып тасталады.

Қателіктерді өрнектеу тәсілдері бойынша оларды абсолютті, қатысты және келтірілген деп бөледі.

Абсолютті қателік формуласы бойынша жазылады және өлшенетін шаманың бірлігімен беріледі. Дегенмен, ол өлшеу дәлдігінің көрсеткіші ретінде бола алмайды, өйткені, мысалы,  $X = 100$  болған кезде  $\Delta = 0,05$  өлшеудің жоғарғы дәлдігіне сәйкес,  $X = 1$  мм кезінде – төменгіге сәйкес келеді. Сондықтан да қатысты қателік деген түсініктеме енгізілген. Салыстырмалы қателік – абсолютті өлшеу қателігінің өлшенетін шаманың шын мәніне қатысы болып табылады:

$$\delta = \Delta/Q = (X - Q)/Q. (1)$$

Бұл өлшеу нәтижесінің берілген дәлділік сипаты ӨЖ қателіктерін мөлшерлеу үшін жарамайды, өйткені  $Q$  мәнін өзгерткен кезде  $Q = 0$  кезіндегі шегіне шейін әртүрлі мәндерді қабылдайды. Осыған байланысты ӨЖ қателіктерін көрсету және мөлшерлеу үшін қателіктің тағы бір түрі – келтірілген қателік қолданылады.

Келтірілген қателік - ӨЖ-нің абсолютті қателігі барлық өлшеу аралығында немесе оның бір бөлігінде тұрақты болатын шартты түрде алынған  $QN$  мәніне жататын қатысты қателік:

$$\delta = \Delta/QN = (X - Q)/QN. (2)$$

Шартты түрде алынған  $QN$  мәнін мөлшерлеуші деп атайды. Көбінесе оның орнына берілген ӨЖ-нің жоғарғы өлшеу шегін алады, ол негізгі жағдайда “келтірілген қателік” ұғымының орнына пайдаланылады.

Пайда болу орнына байланысты қателіктерді аспапты, әдістемелі және субъективті деп ажыратады.

Аспапты қателік қолданылатын ӨЖ-нен туған. Кейде бұл қателікті аппаратты деп те атайды.

Өлшеудің әдістемелік қателігі мына жағдайлардан туады:

өлшеу объектісінің алынған моделі оның өлшеу жолымен анық-талған қасиетін барабар көрсететін модельден ерекшеленгенінен;

ӨЖ-ні қолдану тәсілдерінің әсерінен. Бұл мысалы, кернеуді ішкі кедергінің соңғы мәні арқылы вольтметрмен өлшеу кезінде байқалады. Бұл жағдайда вольтметрді кернеу өлшейтін тізбек аймағына шунтирлейді, және ол вольтметр қосылғанға дейінгі мәнінен аз болады;

өлшеу нәтижелерін есептейтін алгоритмдер (формулалар) әсері-нен;

қолданатын өлшеу құралдарының қасиеттерімен байланысы жоқ басқа факторлар әсерінен.

Әдістемелік қателіктің ерекше қасиеті, ол ӨЖ-де қолданылатын нормативті-техникалық құжаттамаларда көрсетілмейді, өйткені оларға тәуелді емес, олар әрбір нақты жағдайларда оператормен анықталады. Осыған байланысты оператор өзінің өлшейтін шамасын өлшеуге жататын

**Лекция 2. Молекулалық физикада биномиальды таралу.** Детерминирленген және статистикалық заңдар. Біқтималдық теориясының негізгі түсініктері. Биномиальды таралу. Биномиальды таралудың қасиеттері. Физикадағы биномиальды таралу. Лаплас – Гаусс таралуы. Гаусс таралуы.

Молекулалық физиканың көзқарасы бойынша әрбір зат орасан сан кішкентай бөлшектерден тұрады. Олар үздіксіз қозғалады және осы қозғалыс кезінде бір-біріне әсер

етеді. Бірақ бұл бөлшектердің жаратылысы, олардың арасында болатын әрекеттесулер мен қозғалыс сипаттары және тағы басқа қасиеттері туралы белгілі мәліметтер жеткіліксіз. Жалпы алғанда, бұл мағлұматтар заттың құрамындағы бөлшектер өте көп және біртекті жүйеде олардың қасиеттері үйлес деп қарауға мүмкіндік тудырады.

Бөлшектерді Ньютонның механикасы заңымен қозғалады десек, онда  $N$  молекуланың әрқайсысының қозғалыс теңдеуі былай жазылады:

$$m_{0i} \cdot \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \sum_{i \neq k} \vec{F}_{ik}, \quad (1)$$

мұндағы  $m_{0i}$  –  $i$  молекуланың массасы,  $v_i$  –  $i$  молекуланың жылдамдығы,  $\vec{F}_{ik}$  –  $i$  және  $k$  – молекулалардың өзара әрекеттесу күші,  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ .

Бұл (1)-ші дифференциалдық теңдеуді қолдану үшін заттың құрамындағы молекулалардың құрылымы және өзара әрекеттесу заңдары белгілі болуы қажет. Тіпті айтылған қиыншылықтар болма-сын, онда (3.1)-ші теңдеуді интегралдау әр молекуланың қозғалысын сипаттайтын орасан сан теңдеулер жүйесін шешуді талап етеді. Ескерте кетейік, қалыпты жағдайда  $1\text{ м}^3$  газда  $2,7 \cdot 10^{25}$  молекула болады.

Сондықтан әр молекуланың алғашқы  $x_i, y_i, z_i$  координаттары мен алғашқы  $v_{ix}, v_{iy}, v_{iz}$  жылдамдықтар проекцияларын білу және олардың траекториясын табу мүмкін емес. Бұл тұрғыдан алғанда, жеке молекула-лардың траекториясы мен қозғалыс заңын анықтауға мүмкіндік туса да, ол бізге тұтас газдың қасиеттері туралы ешқандай мәліметтер бере алмайды.

Шынында, мұндағы туындайтын мәселе жеке молекулалардың қозғалысына назар аудармай, тек бөлшектердің орасан зор жиынтығының қозғалысын және әрекеттесуін сипаттайтын заңдылықтарын ғана пайдаланады. Осы айтылған заңдылықтардың өзіне тән ерекше-ліктері бар және олар жеке қозғалыстардың қарапайым қосынды-сымен анықталмайды.

Қисапсыз сан бөлшектерден тұратын жүйеде, жаңа, көпшілікке бірдейлік, таза статистикалық немесе ықтималдық заңдылықтар пайда болады. Бөлшектер саны аз жүйеде мұндай заңдылықтар болмайды. Сондықтан, көпсанды бөлшектердің әрекеттесуі себепші болатын құбылыстарды зерттегенде, жеке молекуланың қасиеттерін ескерудің қажеті болмайды.

Көпшілікке қатысты кездейсоқ оқиғалардың заңдылықтары *ықтималдық теорияның* ұғымдарымен негізделеді.

Сондықтан, статистикалық әдіс заттың микроскоптық массасында өтетін құбылыстарының заңдарын жеке бөлшектерінің қозғалысын басқаратын заңдары арқылы тағайындайды. Демек, статистикалық әдіс заттағы байқалатын құбылыстардың заңдарын, оның атомдық-молекулалық құрылымына сүйеніп зерттейді.

Ықтималдық теорияның негізгі ұғымының біреуі *кездейсоқ шама* деген болады. Мысалы, газдың молекуласының жылдамдығы тұрақты болмайды, неге десе, басқа молекулалармен соқтығысуына байланысты өзгереді. Мұндай соқтығысулар аз уақыт аралығында өте көп. Белгілі уақытта молекуланың жылдамдығын білсек те, біз оның дәл мәнін 0,01 немесе 0,001 секунд өткенде неге тең екенін анықтай алмаймыз. Тіпті жеке молекуланың өзін орасан жиынтық ішінде белгілеуіміз де мүмкін емес. Молекуланың жылдамдығының өзгерісі кездейсоқ сипатқа ие, демек кездейсоқ шамаға жатады. Әр жеке молекула қандай жылдамдықпен қозғалады және тап осы кезде қай жерде болатынын алдын ала болжау мүмкін емес, өйткені олар кездейсоқ шамалар.

Мысалы, су буға айналады (бұны  $A$  оқиға десек), оны атмосфера-лық қысымда  $100^\circ\text{C}$  температурада қыздырсақ (қыздыру  $A$  оқиғаның болу шарты). Демек, әр  $G$  шарттар комплексі (жиынтығы) іске асырылса,  $A$  оқиға болады.

Әр  $G$  шарттары жүзеге асырылғанда сөзсіз болатын оқиғаны *ақиқатты* деп атайды.

Оқиға *мүмкін емес*, егер оның болмайтынын біле тұра  $G$ -комплекс шарттары жүзеге

асырылса.

А оқиға *кездейсоқ* деп аталады, егер G комплекс шарттары жүзеге асырылғанда, оның болуы да, болмауы да мүмкін.

Оқиғаның ақиқаттығы, мүмкін еместігі, кездейсоқтығы белгілі G шарттар комплексіне қатысты анықталады.

Егер кездейсоқ шама үздіксіз өзгерсе және ықтималдық тығыздығының таралуы  $p(x)$  болса, онда оның математикалық үмітін мына интеграл анықтайды:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} xp(x)dx \quad (2)$$

мұндағы  $p(x)$  -  $x$  шаманың ықтималдық тығыздығының үлестірілуі немесе таралуы. Айта кету керек, *математикалық үміт* кездейсоқ шаманың мүмкін болатын мәндерінің орташасымен сәйкес келеді.

Мысалы,  $\varphi(t)$  функция  $t_0$  және  $t_1$  уақыт аралығында үздіксіз өзге-реді. Онда осы функцияның орташа мәні  $t_0$  мен  $t_1$  уақыт аралығында былай есептеледі:

$$\langle \varphi \rangle_t = \frac{1}{t_1 - t_0} \int_{t_0}^{t_1} \varphi(t) dt \quad (3)$$

орташаландыру уақыт бойынша анықталған, сол себептен  $t$ -деген индекс  $\varphi(t)$  функциясын белгілейді.

Мысалы,  $(a,b)$  интервалында бірқалыпты таралған  $\chi$  кездейсоқ шаманың математикалық үмітін табу қажет :

$$M\chi = \frac{1}{b-a} \int_a^b x dx = \frac{b^2 - a^2}{2(b-a)} = \frac{a+b}{2} \quad (4)$$

Осыдан біз математикалық үміттің кездейсоқ шаманың берілген мәндер интервалының орташасымен сәйкес келетінін көреміз, яғни

$$\langle x \rangle = \frac{a+b}{2} .$$

### Лекция 3. Температураның физикалық мағынасы. Термометрлік шкала.

Температуралық шкала – температураның әр түрлі мәндеріне сәйкес келетін цифрлар тізбегінің жүйесі. Температура тікелей өлшеуге болмайтын шама. Сондықтан оның мәнін қарастырылып отырған заттың басқа бір физикалық қасиетінің (көлемнің, қысымның, электр кедергісінің, ЭҚК-нің, сәуле шығару қарқындылығының және т. б.) температуралық өзгерісі бойынша анықтайды. Температуралық шкаланы құру үшін температураның бастапқы санақ нүктесі және температура бірлігінің өлшемі (градус) таңдап алынады. Эмпирикалық температуралық шкала әдетте осылай анықталады. Температуралық шкалада негізінен бір құраушылы жүйенің фазалық тепе-теңдік нүктелеріне (реперлік немесе тұрақты нүктелер деп аталатын) сәйкес келетін негізгі екі температура белгіленеді. Бұл екі температураның ара қашықтығы Температуралық шкаланың негізгі температуралық интервалы деп аталады. Реперлік нүкте ретінде: судың үштік нүктесі, судың, сутектің және оттектің қайнау нүктесі, т.б. нүктелер алынады. Бірлік

интервалдың (температура бірлігі) мөлшері негізгі интервалдың белгілі бір үлесі ретінде анықталады. Температуралық шкаланың бастапқы санақ нүктесі үшін реперлік нүктелердің бірі алынады. Мысалы, Цельсий шкаласында бастапқы санақ нүктесі үшін судың қату (мұздың еру) нүктесі алынады. Судың қату және қайнау нүктелерінің арасындағы негізгі интервал 100 бөлікке бөлінеді ( $n=100$ ). Температуралық шкала – өлшенетін физикалық шамалардың мәндерімен сызықты байланыста болатын температура мәндері тізбегінің жүйесі. Жалпы жағдайда Температуралық шкалалар термометрлік затқа (газ, сұйық, қатты дене) термометрлік заттың қасиетіне (денелердің жылулық ұлғаюы, т.б.), сондай-ақ реперлік нүктеге тең болады. Цельсий (00 C), Реомюр (0Re) және Фаренгейт (0F) шкалаларында қалыпты қысымдағы мұздың еру және судың қайнау нүктелеріне температураның әр түрлі мәндері сәйкес келеді. Температураның бір шкаладағы мәнінен екінші шкаладағы мәніне көшуге арналған қатынас төмендегіше болады:  $0nC=0,8n$   $0Re=(1,8 n+32)$   $0F$ . Эмпирикалық температуралық шкаланың термометрлік заттың қасиетіне тәуелді болуы оның негізгі кемшілігі болып есептеледі. Термодинамиканың екінші бастамасына негізделген (қаласы Термодинамиканың бастамалары) термодинамикалық Температуралық шкалада мұндай кемшілік жоқаласы Абсолют термодинамикалық температуралық шкала (Кельвин шкаласы) Карно цикліне негізделіп жасалды. Егер Карно циклін жасаушы дене  $T_1$  температурада  $Q_1$  жылуды сіңіріп (жұтып),  $T_2$  температурада  $Q_2$  жылуды берсе, онда  $T_1/T_2= =Q_1/Q_2$  қатынасы жұмыстық дененің қасиетіне тәуелді болмайды да, өлшеуге болатын  $Q_1$  және  $Q_2$  шамалары бойынша термодинамикалық температура анықталады. Термодинамикалық температуралық шкаладағы температура (Т) кельвинмен (К) өлшенеді. Цельсий және абсолют термодинамикалық температуралық шкалаларда өрнектелген температуралар арасындағы қатынастар төмендегіше жазылады:  $TK=t0C+ +273,15K$ ;  $nK=n0C$ , яғни температураның бұл шкаласындағы бірліктердің мөлшері бір-біріне тең. АҚШ-та қолданылатын Ранкиннің термодинамикалық температуралық шкаласы мен абсолют термодинамикалық температуралық шкаласы арасындағы байланыс өрнегімен анықталады. Температураны өлшеу тәсілдері көне заманнан белгілі. Бұл тәсіл-дер заттың температурасы өзгергенде оның қасиеттері өзгертінін пайдаланады.

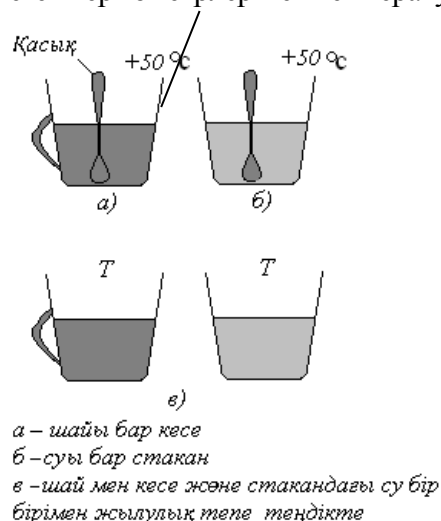
Онда заттың қасиеттерін сипаттайтын шамалар да температура өзгергенде өзгереді. Заттың температурасын өзгерту, оның барлық физикалық қасиеттеріне әсер етеді: сызықтық өлшемдері, олардың серпімділік қасиеттері, өткізгіштердің электрлік кедергілері және т.б. өзгереді. Осы өзгерістердің кез келгенін температураны өлшеу үшін қолдануға болады.

Сондықтан, температураны өлшейтін аспапты, яғни термометрді жасау үшін, қасиеті температураға байланысты үздіксіз және бір-сарынды өзгертін қандай да бір затты таңдайды, оны *термометрлік зат* деп айтады. Оған қоса заттың қасиетін сипаттайтын белгілі бір шаманы, демек *термометрлік шаманы*, таңдап алуымыз қажет. Мыса-лы, термометрлік зат – сынап, онда термометрлік шама ретінде оның көлемін алуға болады. Сынаптың көлемінің өзгерісі температураға тура пропорционал, демек сызықтық түрде өзгереді деп есептеледі. Сұйықтың көлемінің температураға қатысты өзгеруі көптеген термо-метрлерде қолданады.

Термометрлік шаманың температураға тәуелділігін сандық түрде сипаттау үшін, температураның өлшем бірлігін енгізуіміз керек. Температураның өлшем бірлігі ретінде “градус” (латынның *gradus* – адым) тағайындалған. Ол былай анықталады. Еркін түрде алынған екі температура аралығын алып, оны *градус* деп аталатын бірдей бөлік-терге бөлеміз де, температураның біреуіне белгілі бір сандық мән тағайындаймыз. Осы арқылы екінші температураның және аралық-тағы кез келген температуралардың мәнін анықтауға болады. Сөйтіп, *температуралық шкала* құрылады.

Мысалы, әйгілі Цельсийдің температуралық шкаласында айтылған екі температура (*реперлік нүктелер*) ретінде – мұздың еру температурасы  $T_0$  мен судың атмосфералық қысымда қайнау температурасы  $T_k$  алынған. Осы температуралық интервал бірдей 100 бөлікке бөлінген. Сондықтан, бұл шкаланың градусы былай анықталады:  $1^0 C = \frac{T_k - T_0}{100}$ . Осындай тәсіл-

ді қолданып көптеген термометрлер мен температуралық шкала құруға болады.



1-сурет

Ғылымның тарихында, мысалы, Реомюр температуралық шкаласы (Париж, 1750 ж.), Цельсий шкаласы (Швеция, 1742 ж.), Фаренгейт шкаласы (Англия, 1724 ж.) орын тапқан. Мысалы, Фаренгейт шкаласы қазіргі заманда АҚШ-та қолданады,  $1^{\circ}\text{F}=5/9^{\circ}\text{C}$ .

Қазіргі термометрия *идеал газдың* шкаласы бойынша негізделген. Бұл термометрлік шкаласы *газ термометрі* көмегімен тағайындалады. Газ термометрі деген идеал газбен толтырылған, қысымын өлшейтін манометрмен жабдықталған жабық ыдыс. Бұл термометрдің термо-метрлік заты – идеал газ, ал термометрлік шамасы ретінде тұрақты көлем кезіндегі газдың қысымы алынады. Көлемі тұрақты болғанда газдың белгілі массасының қысымының температураға тәуелділігі сызықтық деп есептеледі. Газ термометрінде термометрлік зат ретінде төменгі температурада сутегі немесе гелийді, ал жоғарғы температурада азотты пайдаланады.

Бұл жорамал бойынша судың қайнау және мұздың еру темпе-ратураларына сәйкес қысымдарының қатысы, осы температуралардың өздерінің қатысына тең болады:

$$\frac{P_K}{P_0} = \frac{T_K}{T_0}, \quad (1)$$

мұндағы  $P_K$  – газ термометріндегі идеал газдың судың  $T_K$  қайнау температурасындағы қысымы;  $P_0$  – газ термометріндегі идеал газдың мұздың еруінің  $T_0$  температурасындағы қысымы.

$\frac{P_K}{P_0}$  – қатысы тәжірибеден анықталады. Көптеген өлшеу нәтиже-лерінен мынандай қатынас табылды:  $\frac{P_K}{P_0} = 1,3661$ . Онда температура-лар қатысы да сондай шамаға тең

болады:  $\frac{T_K}{T_0} = 1,3661$ .

Градустың өлшемін  $(T_K - T_0)$  айырмасын жүз бөлікке бөліп табады:

$$T_K - T_0 = 100, \quad \frac{T_K - T_0}{100} = 1^{\circ}. \quad (2)$$

(2.41) және (2.42) өрнектерден мұздың атмосфералық қысымда еритін температурасы  $T_0 = 273,15$  градус, ал судың қайнау температурасы  $373,15$  градус шығады.

Газ термометрімен дененің температурасын өлшеу үшін, денені термометрмен түйістіреді немесе жалғастырады, содан соң жүйеде жылулық тепе-теңдік орналасқаннан кейін, термометрдегі газдың қысымын өлшейді. Сөйтіп, дененің температурасы төмендегі өрнектен табылады:

$$T = \frac{273,15}{p_0} p, \quad (3)$$

мұндағы  $p_0$  – еріп тұрған мұздағы термометрдегі газдың қысымы.

Практикада газ термометрі басқа барлық термометрлерді градуир-леу үшін қолданылады.

Идеал газдың температуралық шкаласы бойынша, температураның нольдік мәні газдың қысымы нольге тең болуына сәйкес келеді. Егер термометрлік шкаланың ноль мәнінде термометрлік шама ноль болса, мұндай шкаланы *абсолюттік шкала* деп атайды. Осы абсолюттік шкала бойынша анықталған температура *абсолюттік температура* деп аталады және  $T$  деп белгіленеді.

Сондықтан газ термометрінің шкаласы абсолюттік болады. Осы шкаланы *Кельвин шкаласы* деп те атайды. Кельвин шкаласындағы температураның өлшем бірлігін Кельвин градусы немесе *кельвин* дейді және  $K$  деп белгілейді.

Айта кету керек, төменгі температураның мәні ноль ( $0 K$ ) және негізгі реперлік нүкте ретінде судың  $T_Y$  үштік температурасы алынған интервалы арқылы 1954 ж. СИ жүйесінде Кельвин өлшем бірлігі анықталған. Судың үштік нүктесі деген су, су буы және мұз (судың қатты күйі) тепе-теңдік күйде болатын температурасы. Онда

$$T_Y - T_0 = T_Y - 0 = 273,16$$

деп тағайындалған. Онда

$$1 K = 1/273,16$$

дәл келеді деп алынған. Бұл шкаланы *термодинамикалық темпера-туралық шкаласы* деп атайды.

Кең таралған Цельсий шкаласының градусы Кельвин шкаласының градусымен сәйкестендірілген. Сондықтан,

$$1 K = 1^\circ C,$$

онда

$$T K = t^\circ C + 273,15 K$$

деп жазуымызға болады. Мұндағы,  $273,15$  саны Цельсий шкала-сындағы температураның нөлдік мәні, мұздың атмосфералық қысым-да еритін температурасына сәйкес. Цельсий шкаласындағы темпера-тура белгісі  $t^\circ C$  болады.

**Лекци 4.** Қысым. Молекула-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі. Идеал газ күйінің теңдеуі.

**Газ күйін сипаттайтын параметрлер арасында байланыс болады. Газдың күйін анықтайтын негізгі параметрлерге газдың  $p$  қысымы,**



$T$  температурасы және  $V$  көлемі жатады. Бұл параметрлердің байланысын анықтайтын теңдеуді газ күйінің теңдеуі деп атайды. Оның жалпы анықталмаған түрі былай жазылады:

$$f(p, V, T) = 0 \quad (1)$$

немесе  $p = f(V, T)$  әрбіреуінің қалған екеуіне тәуелділігін ескеріп  $T = f(p, V)$ , немесе  $V = f(p, T)$  деп те жазамыз.

Қысымды анықтайтын молекула-кинетикалық теңдеуін  $p = f(V, T)$  және температураның анықтамасын  $T = f(p, V)$  қолданып, мына фор-муланы аламыз:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{\overline{mv^2}}{2} = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT \quad (2)$$

Егер газдың массасы өзгермесе,  $n$  тұрақты болады, онда  $p$  қысым  $T$  температураға пропорционал.

Егер газдың қоспасын алсақ, онда массалары әр түрлі газдардың молекулаларының орташа жылдамдықтары әр түрлі, бірақ орташа энергиясы бірдей болады. Қоспаның қысымы мынаған тең болады:

$$p = (n_1 + n_2 + \dots + n_k) kT, \quad (3)$$

мұндағы  $n_1, n_2, \dots, n_k - i$  – компоненттің бірлік көлемдегі молекулалар саны немесе

$$p = n_1 kT + n_2 kT + \dots = p_1 + p_2 + \dots + p_k = \sum_{i=1}^k p_i \quad (4)$$

мұндағы  $p_i - i$  – компоненттің парциал қысымы.

(4) өрнегі Дальтон заңы деп аталады. Бұл заң идеал газ қоспасының қысымы, сол қоспаны құрайтын компоненттердің парциал қысымдарының қосындысына тең екенін көрсетеді.

Егер  $V$  көлемде  $N$  молекула болса, онда  $n = N/V$ , осыны ескеріп (2.51) теңдеуді былай жазамыз:

$$p = \frac{N}{V} kT \text{ немесе } pV = NkT \quad (5)$$

Осы (5) теңдеуге үш негізгі күй параметрлері  $p, V, T$  кіреді, сондықтан бұны газ күйінің теңдеуі деп айтуға болады. Бірақ бұл теңдеуді белгілі зат мөлшері үшін жазу керек, мысалы, бір моль үшін жазсақ, онда  $N = N_A$ , сондықтан

$$pV = N_A kT, \quad (6)$$

мұндағы  $(N_A k)$  – екі іргелі тұрақтылардың көбейтіндісі *универсал газ тұрақтысы* деп аталады және  $R$  әрпімен белгіленеді, демек

$$R = N_A k.$$

Оның мәні  $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ .

Универсал газ тұрақтысын ескеріп (6)-ші теңдеуді мына түрде жазамыз:

$$pV = RT \quad (7)$$

Осы өрнек *Менделеев-Клапейрон теңдеуі* немесе бір моль идеал газ күйінің теңдеуі деп аталады. Ал газдың кез келген  $m$  массасы үшін күй теңдеуі былай анықталады. (4) өрнектегі газдың  $N$  молекулалар санын, мольдің анықтамасын қолданып, былай жазамыз  $N = \frac{m}{M} N_A$ . Онда (5) мына түрде жазылады:

$$pV = \frac{m}{M} N_A kT \quad (8)$$

мұндағы  $m/M = \nu$  – берілген газ массасындағы мольдер саны. (7)-гі ескеріп, (9)-ні мына түрде жазуға болады:

$$pV = \nu RT \quad \text{немесе} \quad pV = \frac{m}{M} RT \quad (9)$$

Осы (9) өрнек идеал газдың кез келген  $m$  массасы үшін жазылған күй теңдеуі.

### Лекция 5. Сұйықтық манометрлер.

**Идеал газ жылусыйымдылығы.** Жылусыйымдылық. Универсал газ тұрақтысының физикалық мағынасы.

Газды қыздыруға жұмсалатын жылу мөлшері қыздырылатын зат-тың мөлшеріне және оның температурасын қанша градусқа өзгертуіне байланысты. Денені суыту үшін, одан бір шама жылу мөлшері алынады. Сондықтан, газдың немесе кез келген дененің жылулық қасиет-терін сипаттау үшін жылусыйымдылық деген ерекше шаманы қолданады.

Дененің температурасын бір кельвинге (1 К) өзгерту үшін, оған берілетін немесе одан алынатын жылу мөлшерін – *жылусыйымдылық* деп атайды. Жылусыйымдылық – *меншікті* және *мольдік* жылусыйым-дылық деп бөлінеді.

Заттың бірлік массасына қатысты жылусыйымдылықты – *меншік-ті жылусыйымдылық* деп атайды. Ол  $c$  ( $\text{це}$ ) кіші әрпімен белгіленеді. Бұл жылусыйымдылық дененің құрамындағы затты сипаттайды.

Заттың бір моліне қатысты жылусыйымдылықты – *мольдік жылусыйымдылық* дейді. Ол  $C$  ( $\text{це}$ ) бас әрпімен белгіленеді. Меншікті жылусыйымдылық сияқты бұл да заттың сипаттамасы болады.

Жылусыйымдылықтың анықтамасы бойынша оның өлшем бірлігі Дж/К, ал меншікті жылусыйымдылықтың –  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  және мольдік жылу сыйымдылықтың өлшем бірлігі –  $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  болады.

Меншікті жылусыйымдылық пен мольдік жылусыйымдылықтың арасындағы қатынас былай анықталады:

$$c = \frac{C}{M} \quad \text{немесе} \quad C = cM, \quad (1)$$

мұндағы  $M$  – мольдік масса.

Анықтамасы бойынша жылусыйымдылық мына қатынасқа тең болады:

$$C_x = \left( \frac{dQ}{dT} \right)_x \quad (2)$$

мұндағы  $dQ$  – денеге берілген (алынған) жылу мөлшері,  $dT$  – температураның өзгерісі,  $x$  – көрсеткіш (индекс) өтетін процестің белгісі. Дене-нің температурасын  $dT$  шамаға өзгертуге жұмсалатын  $dQ$  жылу мөлшері процеске тәуелді болғандықтан, жылусыйымдылығы да оны қыздыру немесе суыту шарттарына тәуелділікті көрсетеді, демек  $C$  әр түрлі  $x$  процестерде бірдей емес. Олай болса, әр түрлі процестерге байланысты жүйе әр түрлі мәндегі жылусыйымдылықпен сипатталады.

**Лекция 6. Жылу мөлшерін және жылусыйымдылығын өлшеу.** Жылу мөлшерін өлшеу. Жылусыйымдылықты өлшеу.  $C_V$  өлшеу.  $C_p$  өлшеу.  $C_p/C_V$  қатынасын өлшеу. Идеал газдың молекулалары материялық нүктелер деп қарастырылады. Бұндай

бөлшектің орташа энергиясы оның ілгерілемелі қозғалысының  $\frac{m_0 \overline{v^2}}{2}$  орташа кинетикалық энергиясымен анықталады. Үш өзара перпендикуляр бағыттарда қозғалатын молекуланың кинетикалық энергиясының үш құраушысының қосындысы ретінде бұл энергияны қарастыруға болады:

$$\frac{m_0 \overline{v^2}}{2} = \frac{m_0 \overline{v_x^2}}{2} + \frac{m_0 \overline{v_y^2}}{2} + \frac{m_0 \overline{v_z^2}}{2},$$

мұндағы  $v_x, v_y, v_z$  – молекуланың үш координат осьтері бойынша жылдамдығының құраушылары. Молекуланың қозғалысының хаостығы себебінен, үш бағыттар бойынша кинетикалық энергияның орташа мәндері бір-біріне тең болады:

$$\frac{m_0 \overline{v_x^2}}{2} = \frac{m_0 \overline{v_y^2}}{2} = \frac{m_0 \overline{v_z^2}}{2} = \frac{1}{3} \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}. \quad (1)$$

Кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі бойынша

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

Осыған орай, (1)-тегі энергияның әр  $\frac{m_0 \overline{v_x^2}}{2}$  құраушысы  $kT/2$ -ге тең.

Бөлшектің кинетикалық энергиясының үш тәуелсіз құраушыға бөлінуі, оның *үш еркіндік дәрежеге* ие материялық нүкте ретінде қарастырылуымен байланысты. Механикалық жүйенің *еркіндік дәрежелер саны* деп, оның кеңістіктегі орнын және конфигурациясын анықтайтын тәуелсіз координаттар санын айтады. Сондықтан, біратомды молекуланың *еркіндік дәрежелер саны үшке* тең, онда әр еркіндік дәрежесіне  $kT/2$ -ге тең энергия сәйкес келеді.

Олай болса, көпатомды молекулалардан тұратын газдың жылу сыйымдылығы біратомды газдікіне тең болмайды.

1-кестеде біратомды және көпатомды газдардың эксперимент бойынша анықталған жылусыйымдылықтары берілген.

1-кесте

Газ біратом ды	$C_V/R$	$\frac{C_p - C_V}{R}$	$\frac{C_p}{C_V}$	Газ көпатом- ды	$C_V/R$	$\frac{C_p - C_V}{R}$	$\frac{C_p}{C_V}$
----------------------	---------	-----------------------	-------------------	-----------------------	---------	-----------------------	-------------------

Гелий (He)	1,51	1,00	1,65	Хлор (Cl <sub>2</sub> )	3,02	1,090	1,36
Неон (Ne)	9	1	9	Азот (N <sub>2</sub> )	2,45	1,005	0
Аргон (Ar)	-	-	1,64	Этилен	4,04	1,030	1,40
Криптон	1,50	1,00	1,67	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	3,25	1,010	4
(Kr)	0	8	1,68	Метан (CH <sub>4</sub> )	3,42	1,060	1,25
Ксенон	-	-	1,66	Аммиак			0
(Xe)	-	-		(NH <sub>3</sub> )			1,31
							0
							1,31
							0

1-кестеден  $C_V / R$  және  $C_p / C_V$  шамалардың мәндерін молекула-лары біратомды газдар үшін молекулалары екі және одан көп-атомды газдардыкімен салыстырғанда, айырмасын көреміз.  $C_p - C_V / R$  қатысы мәндері барлық газдарға жуық бірдей. Бұл мольдік  $C_p$  және  $C_V$  жылусыйымдылықтарының айырмасы молекуладағы атомдар санына тәуелсіз,  $R$  тұрақты шамаға тең болатынын көрсетеді. Демек, кез келген идеал газдың молі ұлғайып, тұрақты қысымда температурасы  $1K$  -ге көтерілгенде бірдей  $R$ -ге тең жұмыс істейді.

Осы кестедегі газдарды екі топқа бөлуге болады: екі атомды газдарға, олардың  $C_V / R$  қатынасы 2,5 жуық, ал  $C_p / C_V - 1,4$ ; молекулалары үш және одан көп-атомды газдарға  $C_V / R$  шамалары 3-4 маңайында, ал  $C_p / C_V - 1,3$  жуық.

Бірінші топтағы екіатомды молекулалардан тұратын газдардың жылусыйымдылықтары бір-біріне жақын және олар мынаған тең:

$$C_V = \frac{5}{2}R \approx 20,8 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К},$$

$$C_p = \frac{5}{2}R + R \approx 29,1 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К},$$

$$\text{сондықтан } C_p / C_V = 7/5 \approx 1,4.$$

Молекулалары үшатомды немесе одан көп-атомды газдар үшін (1-кесте) мольдік жылу сыйымдылықтарының мәндері мынадай:

$$C_V = 3R \approx 24,9 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К},$$

$$C_p = 3R + R \approx 3,33 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К},$$

$$C_p / C_V = 8/6 \approx 1,33 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

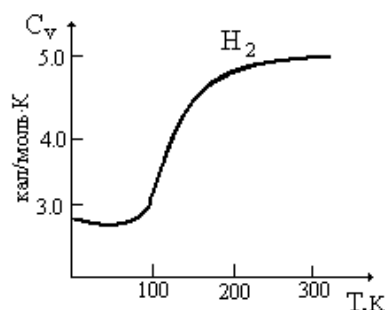
Осыдан  $C_p / C_V = 8/6 \approx 1,33$  екенін көреміз.

1-кестеде келтірілген газдардың жылусыйымдылықтарының экс-перименттік мәндері атмосфералық қысым төңірегінде бөлме темпе-ратурасына жуық жағдайларда анықталған.

Бұл жағдайларда газдар-дың қасиеттері идеалдыққа жақын болады. Ал көп-атомды газдарда байқалған ауытқуларды түсіндіру үшін энергияның бірдей үлестірілу заңын қолдануымыз керек.

Лекция 7. Сұйық  
Сұйық  
Мысалы,

сутегінің



жылусыйымдылығы.  
жылусыйымдылығы.  
жылусыйымдылығының

температураға тәуел-ділігін (1-сурет) қарастырайық.

Сутегінің тұрақты көлемдегі жылу сыйымдылығы бөлме темпе-ратурасында  $5 \text{ кал/моль}\cdot\text{К}$  ( $1 \text{ кал/моль}\cdot\text{К} = 4,1868 \text{ Дж/моль}\cdot\text{К}$ ), ал  $50 \text{ К}$  ( $-223^0 \text{ С}$ ) жуық температурада  $3 \text{ кал/моль}\cdot\text{К}$ -ге тең болады. Демек екіатомды сутегі газының жылу-сыйымдылығы үш еркіндік дәреже-ге ие біратомды газдыкіндей сияқты болады.

Эксперимент бойынша сутегі-нің жылусыйымдылығы темпе-ра-тура төмендегенде баяу кемиді (1-сурет). Бұл өзгерісті классикалық теория бойынша түсіндіру қиын.

Сондықтан, бұл ауытқуларды түсіндіру үшін кванттық теорияны қолданады. Себебі, микроскоптық денелердің қасиеттері оның құра-мындағы микробөлшектердің қозғалысы және әрекеттесуі арқылы түсіндіріледі. Егер жүйені сипаттайтын шамалар *1-сурет* өлшемдері  $h$  Планк тұрақтысымен салыстырмалы болса, онда физикалық жүйелердің бейнелеу тәсілдері мен қозғалыс заңдарын *кванттық механика* (толқындық механика) тағайындайды. Бұл шартты микробөлшек-тердің қозғалысы қанағаттандырады. Кейбір жағдайларда кванттық қасиеттерге микроскоптық жүйелер де ие болады. Кванттық механика заңдары заттың құрылымы туралы ғылымдардың *іргесін* (фунда-ментін) қалайды. Кванттық теория негізінде көптеген макроқұбылыс-тар түсіндіріледі, мысалы, газ, қатты денелердің жылусыйымдылығы-ның температураға тәуелділігі; қатты денелердің құрылысы және т.б. Кванттық теория негіздері арнайы курстарда қарастырылады.

Кванттық теория сутегінің жылусыйымдылығының температураға тәуелділігін былай түсіндіреді: сутегі молекулалары екі әр түрлі күйлерде болады – парасутегі және ортосутегі деген. Кванттық теория бойынша атом ядросының импульс моменті болады. Сутегі молеку-ласы екі атомнан құралғанда, ядролар моменттері (векторлық шама-лар) бір-біріне параллель ( $\uparrow\uparrow$ ) немесе антипараллель ( $\uparrow\downarrow$ ) орналасуы мүмкін. Атомдарының ядролық моменттері параллель бағыттағы молекула – ортосутегі, ал ядролық моменттері антипараллель молеку-ласынан құралған сутегі – парасутегі деп аталады. Сутегідегі осы молекулалар мөлшері температураға тәуелді. Кәдімгі сутегіде бөлме температурасында 25%-ке жуық парасутегі болады, ал температура төмендегенде парасутегі шамасы өседі,  $20\text{К}$ -де сутегі толығымен парасутегіден тұрады (99,8%).

Сутегінің орто- және паракүйлеріне айналмалы қозғалыстың энергиясының әр түрлі мәндері сәйкес келеді. Сондықтан, бұл екі күйлердегі сутегінің жылусыйымдылықтары әр түрлі болады. Төменгі температурада ( $50 \text{ К}$  жуық, 1-сурет) молекулалардың айналмалы қозғалысына тәуелді жылусыйымдылығы екі күйде бірдей нольге тең болады. Осыған орай, сутегінің жылусыйымдылығы біратомды газды-кіндей деп түсіндіріледі.

Жылусыйымдылықты өлшеу нәтижелері, молекулалардың құры-лымы туралы маңызды мәліметтер береді, әсіресе төменгі темпе-ра-туралардағы зерттеулер өте маңызды. Көптеген техникалық мәселе-лерді шешу үшін заттардың жылу сыйымдылығын және оның температуралық тәуелділігін білу қажет.

## **Лекция 8. Газ тұтқырлығы.** Тұтқырлық үйкеліс. Тұтқыр сұйықтың түтік бойымен ағуы.

Тұтқырлық – сұйықтар мен газдардың негізгі қасиеттерінің бірі. Мысалы, машиналарды майлау үшін жанармайды алдын ала тұтқырлығына қарап таңдап алады. Сұйық тұтқырлығының температураға байланыстылығы өте күшті болады. Себебі сұйықтың температурасы жоғарылап кризистік температураға жеткенде (мысалы, суды алсақ ол  $1000\text{с}$ -та қайнап буға айналады) басқа фазаға өтеді. Әсіресе майлар тұтқырлығының тәуелділігі күшті, мысалы, температурасы  $180 \text{ С}$ -тан  $400 \text{ С}$ -қа дейін көтерілгенде кастор майының тұтқырлығы төрт еседей кемиді. Барлық нақты сұйықтардың бір қабаты екінші қабатымен салыстырғанда орын ауыстырса, онда азды-көпті үйкеліс күші пайда болады. Шапшаңырақ қозғалатын қабат тарапынан жай қозғалатын қабатқа үдетуші күш әсер етеді. Керісінше, жай қозғалатын қабат тарапынан шапшаң қозғалатын қабатқа бөгеуші күш әсер етеді. Бұл күштер ішкі үйкеліс күштері деп аталады, олар қабаттардың бетіне жүргізілген

жанама бойымен бағытталады. Ішкі үйкеліс күшінің шамасы сұйық ағысының  $v$  жылдамдығы бір қабаттан екінші қабатқа көшкенде қаншалықты шапшаң өзгеретіндігіне тәуелді және қарастырылып отырған сұйық қабаты бетінің  $S$  ауданы неғұрлым үлкен болса, соғұрлым зор болады. Мысалы, бірінен-бірі  $\Delta h$  қашықтықтағы сұйықтың екі қабаты  $v_1$  және  $v_2$  жылдамдықпен ақсын ( $v_1 - v_2 = \Delta v$ ) делік. Қабаттардың  $\Delta h$  арақашықтығын өлшегенде бағыт сол қабаттардың ағыс жылдамдығына перпендикуляр болсын. Сонда  $\Delta v / \Delta h$  шамасы бір қабаттан екінші қабатқа көшкенде жылдамдықтың қаншалықты шапшаң өзгеретіндігін көрсетеді, оны жылдамдық градиенті деп атайды. Ньютон алғаш рет сұйықтың екі қабатының арасындағы үйкеліс күші жылдамдықтар айырымы мен жанасып тұрған сұйық қабаттары бетінің ауданына тура пропорционал және сол қабаттардың ара қашықтығына кері пропорционал екендігін дәлелдеді. Тұтқырлық коэффициенті неғұрлым үлкен болған сайын сұйықтың идеал сұйықтан айырмашылығы мен үйкеліс күші соғұрлым үлкен болады. Тұтқырлық коэффициенттің өлшемділігі:  $\eta = ML^{-1}T^{-1}$  Тұтқырлық динамикалық коэффициенті  $\frac{H/c}{m^2}$  -пен өлшенеді, яғни жылдамдық градиенті –  $1 \frac{H/c}{m^2}$ . Бетінің ауданы  $1 \text{ м}^2$  сұйық қабаттарының әсерлесу кезіндегі тұтқырлық күші  $1 \text{ Н}$  болады. Әдетте  $\eta$  коэффициентін тұтқырлықтың абсолюттік коэффициенті деп атайды. Ал осы коэффициенттің берілген сұйықтың тығыздығына ( $\rho$ ) қатынасы тұтқырлықтың кинетикалық коэффициенті делінеді Бұл тұтқырлық коэффициентіне кері шама, яғни  $1/\eta$  – аққыштық коэффициенті деп аталады. Тұтқырлықтың СИ системасындағы өлшем бірлігі  $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , СГС системасындағы тұтқырлық өлшем бірлігі пуаз деп аталады:  $1 \text{ пуаз} = 1 \text{ дин} \cdot \text{с} / \text{см}^2 = 0,1 \text{ Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = 0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . [2]

Мазмұны

- 1 Заттың тұтқырлығы
- 2 Судың тұтқырлығы
- 3 Газ тұтқырлығы
- 4 Сұйықтың тұтқырлығы
- 5 Динамикалық тұтқырлық
- 6 Қойнауқаттық су тұтқырлығы
- 7 Қойнауқаттық мұнай тұтқырлығы
- 8 Сұрыпталған мұнайдың тұтқырлығы
- 9 Кинематикалық тұтқырлық
- 10 Екпінді тұтқырлық
- 11 Пайдаланған әдебиет
- 12 Пайдаланған әдебиет
- 13 Тағы қараңыз

Заттың тұтқырлығы Сұйық немесе газ түріндегі заттың ығыстыру деформациясына қарсылық көрсету қабілеті. Судың тұтқырлығы Судың қозғалысы барысында оның үйкеліс күшін туындату қабілеті. Осы құбылыс ағыс жылдамдығы жоғарырақ судың аталған жылдамдық мөлшері төменірек суға әсер етуін қамтамасыз етеді. Судың тұтқырлығы температура мен сулы ерітіндінің үйірімділігіне тәуелді, оның мөлшері тұтқырлық коэффициентімен бағаланады. Газ тұтқырлығы Бір-бірімен жарыса, бірақ әр түрлі жылдамдықтармен жылжыған газ қабаттары аралығында пайда болатын олардың ішкі үйкеліс күші (тұтқырлығы). Сұйықтың тұтқырлығы Сұйықтың қозғалысы барысында оның өз өңірінде үйкеліс күшін тудыру қабілеті. Сұйықтың тұтқырлығы қатты жылдамдықпен қозғалған сұйық қабаттарының қозғалысын азырақ жылдамдықпен қозғалған сұйық қабаттарына беруге қабілетті. Сұйықтың тұтқырлығының мөлшері температура көрсеткішіне және ерітіндінің үйірімділігіне тәуелді. Физикалық тұрғыдан сұйықтың тұтқырлығы тұтқырлық коэффициентімен бағаланады. Динамикалық тұтқырлық Динамикалық тұтқырлық – газ немесе сұйықтықтың бір қабаттының екінші қабатына қатысты жылжу кедергісінің сандық сипаттамасы. Сұйықтың динамикалық тұтқырлығы. Ауданы  $1 \text{ см}^2$  сұйық (су) қабатының  $1 \text{ см} / \text{с}$  жылдамдықпен  $1 \text{ см}$  қашықтыққа қозғалуына қарсылық көрсету күші. Қойнауқаттық су тұтқырлығы Мөлшері температура мен ерітінді үйірімділігіне тәуелді болып келетін, судың қозғалысы барысында үйкеліс күшін тудыру қабілеті. Қойнауқаттық мұнай тұтқырлығы Мұнайдың қойнауқаттық жағдайлардағы қозғалмалық дәрежесін анықтайтын, сөйтіп мұнай жатынын игеріп алудың өнімділігі мен тиімділігіне айтарлықтай әсер ететін сол мұнайдың өзіндік қабілеті. Бұл қабілеттің мәнін қысым мөлшерлерінде айырмашылықтар бар аралықтарда қойнауқаттық мұнай тамшыларының қозғалуына жасалатын кедергі деп түсіну

керек. Бұл көрсеткіш әдетте динамикалық тұтқырлық бірлігімен өлшенеді. Сұрыпталған мұнайдың тұтқырлығы Белгілі бір күш әсер еткенде газдан арылған қалыпты жағдайдағы мұнай тамшыларының қозғалыстарына жасалатын кедергі; кинематикалық (см<sup>2</sup>/сек) немесе динамикалық тұтқырлықтар түрінде есепке алына отырып, әр түрлі мұнай жатындары үшін МПа.сек бірлігінің ондаған бөлігінен жүздеген, тіпті мыңдаған бөлігіне дейінгі аралықтарда өзгереді. Кинематикалық тұтқырлық Кинематикалық тұтқырлық – газ немесе сұйықтықтың тығыздығына динамикалық тұтқырлықтың қатынасы. Екпінді тұтқырлық Екпінді тұтқырлық – екпінді жүктеме әсерінен бұзылу үрдісі нәтижесінде қатты денелердің механикалық энергияны сіңіруі.

**Лекция 9.10. Сұйықтағы молекуланың жылулық қозғалысының ерекшеліктері. Я.И. Френкель моделі.**

**Сұйық шекарасындағы құбылыстар. Беттік керілу коэффициенті. Жылудың механикалық жұмысқа айналуы**

Тепе-теңдік, қайтымды және қайтымсыз деген ұғымдар табиғатта өтетін барлық процестерге бірдей қатысты.

Табиғаттағы жүйелердің тепе-теңдік күйге өту кезіндегі жиі кезде-сетін процестің біреуі механикалық энергияның жылуға айналуы. Мысалы, денелердің үйкелісі кезінде жылудың бөлінуі. Айталық, механикалық энергия деп біз макроscopicтық энергияны, демек тұтас жүйе ретінде қарастырылатын денелердің қозғалысының кинетикалық және өзара немесе сыртқы өрістермен әсерлесетін потенциалдық энергиясын айта-мыз. Ал осы денелердің құрамындағы молекулалардың жылулық қозға-лысының кинетикалық энергиясы мен өзара әрекеттесуінің потенциал-дық энергиясын ішкі энергия дейміз. Олай болса, механикалық энергия есебінен бөлінген жылуды макроscopicтық энергияның жылулық қозға-лыстың микроscopicтық энергиясына айналу процесі деуге болады.

XVII ғ. және XVIII ғ. жылулық қозғалтқыштар дәуірі басталды. Жылулық қозғалтқыштарды пайдалану жылу мен механикалық жұмыс-тың өзара айналу проблемаларын (мәселелерін) шешуін, оның теориялық негізін қалауды талап етті. Механикалық жұмысты жылу арқылы алу тәсілдері өркениеттің тарихында *термодинамика* деген ғылымның дамуына әкелді. Мысалы, ядролық энергияны жұмыс істеуге қолдану біздің дәуірдің өте маңызды белгісі. Бірақ, ядролық энергия механикалық жұмысқа тікелей ауыспайды, тек жылу арқылы жүзеге асады. Осыған байланысты механикалық жұмыс пен жылулық энергияның өзара айналу заңдарын зерттеу өте маңызды мәселелерге жатады.

Механикалық және жылулық заңдарын зерттейтін физика бөлімі ретінде термодинамика тарихта дамыды. Қазіргі заманда термодина-мика жылулық энергия мен энергияның басқа түрлерімен (химиялық, электрлік, ядролық және т.б.) байланысын зерттейтін жалпы заңдарын қарастырады.

Механикалық және жылулық энергияны термодинамиканың бірін-ші бастамасы (энергияның сақталу заңы, 6.3 бап) байланыстырады. Жүйеге  $dQ$  жылу мөлшерін бергенде, оның күйі өзгереді және ол  $dA$  жұмыс атқарады. Онда энергияның сақталу заңы бойынша істелген жұмыс пен жүйенің ішкі энергиясының өзгеруінің қосындысы берілген жылу мөлшеріне тең болады:

$$dQ = dU + dA,$$

мұндағы  $dA = pdV$ .

Бұл формуланы мына түрде жазуға болады:

$$dU = dQ - dA.$$

Егер жүйенің күйі макроscopicтық өзгеріске ұшыраса, онда барлық  $dQ$  мен  $dA$ -ның қосындысын алу қажет, сондықтан жүйе бірінші күй-ден екіншіге өткенде ішкі энергиясының өзгерісін былай есептейді:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 dQ - \int_1^2 dA \quad (1)$$

Мұнда берілген жылу мөлшері мен жүйенің істеген (немесе үсті-нен істелген) жұмысы жүйенің бірінші күйден екіншіге өту жолына тәуелді болады. Ал ішкі энергияның  $dU$  өзгеруі өту жолына тәуелді емес, тек бастапқы және соңғы күйлерімен анықталады. Сондықтан (1)-теңдеуді былай жазуға болады:

$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1 = \int_1^2 dQ - \int_1^2 dA ,$$

бірақ бұл теңдеуді

$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1 = \int_1^2 dQ - \int_1^2 dA = (Q_2 - Q_1) - (A_2 - A_1)$$

деп жазуға болмайды.

Осыған орай, әр күйдегі жүйе ішкі энергияның белгілі бір мәніне ие, бірақ ол белгілі жылу мөлшері мен жұмысқа ие екен деуге болмай-ды. Сондықтан,  $Q$  жылу және  $A$  жұмыс жүйенің өзгеру процесінің функциясы болады, күйінің функциясы болмайды. Математикалық  $dQ$  мен  $dA$  толық дифференциал болмайтынын көрсетеді, ал  $dU$  толық дифференциал болады.

Енді кері процесті, жылудың механикалық жұмысқа айналуын қарастырайық. Температурасы жоғарғы денеден температурасы төменгі денеге берілетін энергияны, мысалы, денелердің түйіскенінде немесе сәулеленуінде – жылу мөлшері деп аталатынын айтып кеттік. Бұлай энергияның берілуінде жұмыс атқарылмайды, себебі денелердің қозғалысы болмайды. Мұнда жылу берілген дененің тек ішкі энергиясы өседі, сонымен температуралары теңелгеннен кейін, жылу-алмасу процесі тоқталады. Бірақ жылу берілгенде дене ұлғаятын болса, онда ол жұмыс істейді. Энергияның сақталу заңы бойынша бұл жұмыс мынаған тең болады:

$$dA = dQ - dU ,$$

мұндағы  $dU$  – ішкі энергияның өзгерісі.

Жұмыстың ең үлкен мәні изотермдік процесте істеледі, сонда ғана  $dA = dQ$ . Бұдан артық жұмыстың істелуі мүмкін емес. Сондықтан, максимал жұмыс атқару үшін, ұлғаятын денемен және жылу көзінің арасында температура айырмасы болмауы керек.

**Лекция 12. Беттік керілу коэффициентін анықтау.** Сақина қиынды әдісі.

Беттік керілу[1] — екі фазаның (дененің) бөліну бетінің термодинамикалық сипаттамасы. Өлшем бірліктері Дж/м<sup>2</sup> немесе Н/м. Беттік керілуді бөліну беті сұйықтық болған жағдайда, бет контурының ұзындық бірлігіне әсер ететін және фазалардың берілген көлемдерінде бетті ең кіші шамаға (минимумға) дейін жиыруға ұмтылатын күш ретінде де қарастыруға болады. Екі қоюланған (конденсацияланған) фазаның шекарасындағы беттік керілу, әдетте, фазааралық керілу деп аталады. Жаңа бетті түзетін жұмыс, зат молекулаларын дене көлемінен беттік қабатқа ауыстыру кезіндегі молекулааралық ілініс күшін жеңуге жұмсалады. Беттік қабаттағы молекулааралық күштердің тең әсерлі күшінің шамасы дене көлеміндегідей нөлге тең болмайды әрі ол ілініс күштері көбірек болатын фаза ішіне қарай бағытталады. Сонымен беттік керілу беттік (фазааралық) қабаттағы молекулааралық күштердің теңгерілмеуінің өлшемі болады.



Жылжымалы сұйықтық үшін беттік керілу — еркін беттік энергияға тепе-тең шама. Сыртқы әсер болмаған жағдайда сұйықтық беттік керілудің салдарынан шар (бет мейлінше кіші және еркін беттік энергияның мәні барынша аз болатын жағдай) пішіндес болады. Егер фазалардың көлемдері молекулалардың өлшемдерімен салыстырғанда жеткілікті үлкен болса, онда беттік керілу беттің шамасы мен пішініне тәуелді болмайды. Беттік керілу температураның жоғарылауынан, сондай-ақ, беттік белсенді заттардың әсерінен азаяды. Сұйықтық пен газдың (будың) немесе сұйықтық пен сұйықтықтың оңай жылжымалы шекарасындағы беттік керілуді әр түрлі жолмен өлшеуге болады. Молекулалары (атомдары) еркін орын ауыстыра алмайтындықтан қатты дененің беттік керілуін тәжірибе арқылы анықтау қиын. Анизотропия салдарынан кристалдың әр қырындағы беттік керілу әр түрлі болып келеді. Қатты дене үшін беттік керілу және беттік энергия ұғымдарының мәні бірдей емес. Өйткені кристалдық тор ақаулары (дислокация, т.б.) еркін беттік энергияға әсерін тигізеді. Қатты дененің беттік керілуін, әдетте, молекулааралық және атомаралық өзара әсерлерді негізге ала отырып, жанама жолмен есептейді. Беттік керілудің шамасы мен өзгерісіне көптеген беттік құбылыстар байланысты болып келеді. Сабын көпіршіктерін үрлеуді балалар әуес көреді. Ал ойынның осы түрінен де құнды мәлімет алуға болады екен. Сабын көпіршігі үрленіп созылған балалар шарына ұқсайды.

Сондай-ақ әрқайсың жапырақ бетіндегі таңғы шыққа құмарта қараған боларсындар. Балауыз бетіндегі су тамшыларының да осындай пішіні болады. Неліктен олар жайылып кетпейді? Күнделікті өмірден сұйық өзі құйылған ыдыстың пішінін алатынын және оның меншікті пішіні болмайтынын білеміз. Ал бірақ бұл әр уақытта орындала бермейді екен. Сұйықтың бетінде орналасқан M1 молекуланы және оның ішіндегі M2 молекуланы қарастырайық. Сұйық ішіндегі M2 молекула барлық жағынан басқа молекулалармен қоршалған және олар оны барлық жағынан бірдей «тартады». Сұйық бетіндегі M, молекуланың жоғарғы жағында ондай көршілері жоқ (Газ (атмосфера) тығыздығының сұйық тығыздығынан едәуір аз екенін есімізге түсірейік). Оны, негізінен, сұйық ішіндегі молекулалар тартады. Сондықтан сұйық бетіндегі әрбір молекула оның ішіне еруге бейім болады. Алайда барлық молекулалар сұйық ішіне ене алмайды. Сұйық бетіндегі молекулаларды одан төмен орналасқан молекулалар ғана емес, оның бетіндегі көршілес молекулалар да тартады. Бұл күштердің қорытқы күші сұйықтың беттік керілуін береді. Ол сұйықтың беттік қабатында әрекет ететін күшпен сипатталады және F<sub>бет</sub> беттік керілу күші деп аталады. Бұл күш сұйық бетін ықшамдауға әрекет етеді. Көлемдері бірдей денелердің ішінде шардың беттік ауданы ең кіші болады. Таңғы шықтың, сабын көпіршіктерінің және т. б. шар пішінді болуы осымен түсіндіріледі.

#### 1. Фазалық ауысулар.

### Лекция 14. Кристалдану және балқу процестері.

Балқу мен қатаю процестерін зерттеулер көрсеткендей, осы процестер кезінде заттың ішкі энергиясының өзгерісі оның  $m$  массасына тура пропорционал болады екен. Осы кездегі энергияның өзгерісін балқу жылуы мөлшерімен анықтайтын болғандықтан:

$$Q_{бал} = \lambda m. \quad (1)$$

$Q_{бал}$  балқу жылуы осымен қатар заттың тегіне және сыртқы шарттарға тәуелді болады. Осы тәуелділікті  $\lambda$  пропорционалдық коэффициентімен өрнектейді. *Заттың балқу немесе қатаю процестері кезінде оның ішкі энергиясының заттың тегіне және сыртқы шарттарға тәуелділігін сипаттайтын  $\lambda$  шамасы меншікті балқу жылуы деп аталады. Меншікті жылу сыйымдылығы осы заттың балқу температурасында алынған бірлік массасын балқытуға қажетті жылу мөлшерімен өлшенеді:*

$$\lambda = Q_{бал} / m. \quad (2)$$

$\lambda$  меншікті балқу жылуының СИ системасындағы өлшем бірлігін анықтайық:

$\lambda=1 \text{ Дж}/1 \text{ кг}=1 \text{ Дж}/\text{кг}$ .

СИ системасында  $\lambda$  бірлігі үшін тұрақты температура кезінде 1 кг массаны балқытуға 1 Дж энергия жұмсалатын меншікті балқу жылуын алады.

Меншікті балқу жылуын тәжірибеде анықтайды және есептеулер кезінде оның мәнін таблицадан алады.

**Балқу және қатаю кезінде заттың көлемінің және тығыздығының өзгеруі.** Балқу кезінде қатты дененің торындағы реттеліп орналасқан бөлшектер сұйықтағы ретсіз орналасуға ауысады, сондықтан балқу және қатаю кезде заттың тығыздығында, яғни көлемінде біршама өзгерістер болуы тиіс деп күтуге болады. Тәжірибе де осы болжамды дәлелдейді.

Заттардың басым көпшілігінде балқыған кезде көлемі артады да, қатаю кезінде ол азаяды екен. Осы кезде олардың тығыздығының да өзгеретіндігі сөзсіз: балқыған кезде тығыздық кемиді де, ал қатайған кезде тығыздық артады. Мұны жеп-жеңіл тәжірибеде дәлелдеуге болады. Мысалы қатты нафталиннің кристалликтері балқыған нафталинге батып кетеді. Висмут та өзінің балқымасында жүзіп жүреді. Мұз да суда жүзіп жүреді. Кейбір, висмут, мұз, галий, германий, кремний, шойын тәрізді заттар балқыған кезде сығылады, ал қатайған кезде ұлғаяды. Жалпы ережеден осы құсаған ауытқулар осы заттардың кристалдық торының құрылысының ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Мысалға, германий мен кремнийдің кристалдық торы атомдарының онша жоғары емес тығыздығымен көзге түседі, бұл заттар балқу кезінде өзінің көлемін азайтады.



● Н ○ О

1 - сурет

1-суретте кеңістіктік торда мұз

молекулаларының орналасуы көрсетілген, одан көріп отырғанымыздай,  $\text{H}_2\text{O}$  молекулалары бір-біріне тығыз орналасқан, бірақ олардың орналасуы шілте тәрізді конструкция береді де, олардың арасында бос қуыстар молынан кездеседі. Балқыған кезде іргелес орналасқан  $\text{H}_2\text{O}$  молекулаларының ара қашықтығы басқа заттардағы тәрізді артады, бірақ шілтелі конструкция күйреп, молекулалардың ішкі қуыстарды толтыруының арқасында жалпы көлем азаяды. Сондықтан су мұзға қарағанда тығызырақ болып шығады.

Зерттеулер көрсеткендей, балқығаннан кейін де суда кристалдық тордың жеке бөліктері сақталып қалады екен, ал оларда бостықтар болады. Олар суды одан әрі қыздырған кезде ғана күйрейді. Сондықтан су  $4^0\text{C}$  температураға дейін қыздырған кезде сығылады да,  $4^0\text{C}$  кезінде бостықтардың жоғалуы және молекулалардың ара қашықтықтарының артуы бір-бірін өтемелейді де, суды одан әрі қыздырған кезде ол ұлғая бастайды. Суды салқындатқан кезде осы аталған процестер кері бағытта өтеді. Сөйтіп,  $4^0\text{C}$  кезінде ғана судың тығыздығы максималь болады.

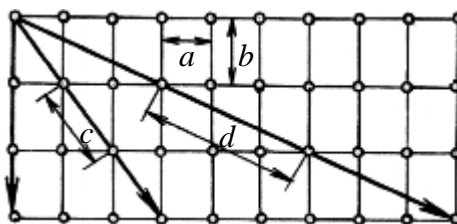
Судың мұндай қасиетінің табиғатта атқаратын ролі орасан зор. Судың қатқан кезде ұлғаюының арқасында тау жыныстары күйрейді, су қоймаларының ақырына дейін қатаюын болдырмайды.

**Лекция 15. Қатты дененің жылуөткізгіштігі.** Жылуөткізгіш. Жылулық ағын. **Заттың қатты күйінің сипаттамасы. Кристалдар.** Өзінің формасын да, көлемін де сақтайтын затты қатты дене деп атайтынымызды білеміз. Бірақ бұлар тек заттың қатты күйін тек сырттай ғана сипаттайды. Физикалық тұрғыдан алғанда біз бұл белгілеріне қарап қатты күйді сұйық күйден айыра алмаймыз.

Қатты денелерді зерттеген кезде табиғатта олардың белгілі бұрыштармен орналасқан жазық беттерінің болатындығы, кей жағдайларда олардың дұрыс көпбұрыштар түрінде болатындығы анықталады. Мұндай қатты денелерді *монокристалдар* деп атайды (“моно” бір деген грек сөзінен). Көпшілігінде монокристалдардың мөлшерлері өте кішкентай болады, әйтпеседе олардың арасында үлкендері де болады, мысалы тау хрусталының монокристалы адаммен теңесерліктей.

Кристалдардың ішкі құрылысын рентген сәулелерінің көмегімен зерттеулер кристалдардағы бөлшектердің (молекулалар, атомдар және иондардың) дұрыс орналасатындығын көрсетті, яғни олар *кристалдық* (кеңістіктік) тор түзеді. Кристалдық тордағы қатты дененің бөлшектерінің ең орнықты тепе-теңдік қалпына сәйкес нүктелер *тордың түйіндері* деп аталады.

Тордың түйіндері дұрыс орналасады, олар кристалл ішінде периодты түрде қайталанып отырады. Бұл дегеніміз егер қайсы-бір түзу бойында жуық орналасқан түйіндердің ара қашықтығы  $a$  болатын болса (1-сурет), онда осы түзу бойында осы



1 - сурет

түйіннен  $na$  қашықтықта кристалдық тордың  $n$ -шы түйіні болады дегенді білдіреді. Кристалдық тордағы түйіндердің орналасуы кез-келген түзу бойында қайталанып отырады. (1-суреттегі I-IV сызықтар). Бөлшектердің кристалдық тордың түйіндерінде дұрыс орналасуы бөлшектердің орналасуындағы *алыс тәртіп* деп аталады.

Физикада қатты денелер деп кристалдық құралымы бар денелер ғана аталады. Басқаша айтқанда, қатты дененің бөлшектерінің орналасуында алыс тәртіп болу керек.

### **Кристалдардың анизотропиясы. Кеңістіктік тор және оның кемтіктері.**

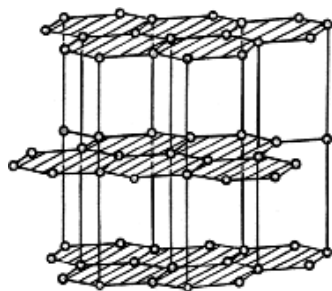
Кристалдағы бөлшектердің дұрыс орналасуынан кристалдардың анизотропиясы шығады, бұл дегеніміз кристалдардың қайсы-бір қасиеттерінің бағытқа тәуелділігі.

Көптеген кристалдарда кристалдың механикалық беріктіктерінің бағытқа тәуелділігі қатты білінеді. Мысалға слюда суда қабыршықтарға жеңіл ыдырайтын болса, ал тас тұзы кубиктерге ыдырайды. Бұл тәуелділік әсіресе графитте жақсы көрінеді. Графит кристалының әрбір қабатында көміртегі атомдары дұрыс алтыбұрыштықтардың төбелерінде орналасқан, ал іргелес қабаттардың ара қашықтығы әр қабаттағы іргелес орналасқан атомдардың ара қашықтығынан 2,5 есе артық болады (48-сурет). Сондықтан графиттегі қабаттар бір-біріне қатысты жеңіл сырғып кетеді. Графиттің бұл қасиетін біз қарындашпен жазған кезде пайдаланамыз. Графиттің бұл қасиетін сонымен қатар майлағыш материал ретінде де пайдаланады (әсіресе жоғарғы температуралар кезінде). Кристалдық заттың жеңіл жарылатын жазықтықтарын *жапсарлану жазықтықтары* деп атайды.

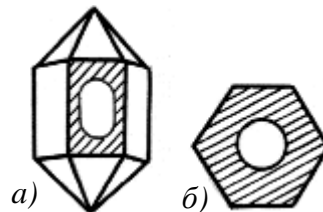
Егер кварцтың бетіне воск жағып, сосын қатты қыздырылған сымның ұшын кристалдың жағының ортасына тигізсек, онда воск эллипс түрінде балқиды (2 а-сурет). Демек, кварц кристалының жылу өткізгіштігі бағытқа тәуелді болады. Тәжірибе басқа кристалдар үшін де олардың қасиеттерінің бағытқа тәуелді болатындығын көрсетеді.

Анизотропия қасиетінің тек монокристалдарға ғана тән болатындығын тағы да айта кетелік. Қатты заттардың көпшілігінің құрылымы *поликристалдық* болады (“поли” көп деген грек сөзінен), яғни көбіне микроскоппен ғана көруге болатын өте ұсақ кристалдардың көп санды жиынтығынан тұрады. Бұл кристалликтер бір-біріне қатысты хаустық түрде орналасатын болғандықтан,

қатты дене тұтастай алғанда изотропты болады, яғни жеке кристалликтердің анизотропиясы болса да,



48 -

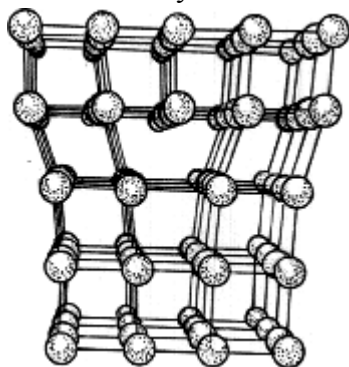


2 - сурет

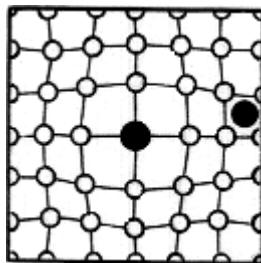
дененің барлық бағыттардағы қасиеттері бірдей болады. Аморфтық денелер де изотропты болады, себебі олардың кристалдық торы жоқ. Поликристалдық денелер мен аморфтық денелердің айырмашылығы мынада болады: поликристалдық дененің анизотропия байқалатын өте кішкентай бөлігін бөліп алуға болады, ал аморфтық денелердің кез-келген бөлігін қарастырсақ та, ол әрқашанда изотропты болады.

Тәжірибе көрсеткендей, қатты заттың бөлшектерінің орналасуында идеал алыс тәртіп ешуақытта да практикада кездеспейді екен. Кристалдағы идеал тәртіптен кез-келген ауытқуды кеңістіктік тордың *кемтіктері* деп атайды.

Тордың ең маңызды кемтіктерінің бірі кристалдағы бөлшектердің әрбір уақыт мезетінде жылулық қозғалысының әсерінен болатын бөлшектердің



50 - сурет



51 - сурет

орналасуындағы тәртіптің бұзылуы. Шындығында да, бөлшектер өне бойы тербеліп тұратын болғандықтан, түйіндер тек әрбір бөлшектің орташа қалпын ғана анықтайды.

Тағы бір маңызды кемтік – *дислокация* деп аталады (50-сурет). Тордың жеке түйіндерінде бөлшектің болмауы (вакансия) немесе бөлшектің түйіндер арасына ығысуы түріндегі дефектер де кездеседі. Басқа текті атомдардың тордың жеке-дара түйіндерінде орналасуы немесе түйіндердің арасына орналасуы да кристалл тордың кемтігі болып табылады (51-сурет).

Кристалдардың торындағы кемтіктер қатты дененің көптеген қасиеттеріне, мысалға, беріктігіне, майысқыштығына, электр өткізгіштігіне және т.б. қасиеттеріне күшті әсерін тигізеді.

**Молекулалық физикада қолданатын СИ жүйесіндегі өлшем бірліктер**

Физикалық шама		Өлшем бірлігі	
Атаулары	Өлшемділік	Негізгі белгілеуі, халықаралық	Белгіленуі
<b>Негізгі бірліктер</b>			
Ұзындық	L	<i>l</i>	м
Масса	M	<i>m</i>	кг
Уақыт	T	<i>t</i>	с
Ток күші	I	<i>I</i>	А
Температура	$\theta$	<i>v</i>	моль
Зат мөлшері	N	<i>I</i>	кд
Жарық күші	J		
<b>Туынды бірліктер</b>			
Жылдамдық	$LT^{-1}$	<i>v, u</i>	м/с
Үдеу	$LT^{-2}$	<i>a</i>	м/с <sup>2</sup>
Күш	$LMT^{-2}$	<i>F</i>	Н
Қысым	$L^{-1}MT^{-2}$	<i>p</i>	Па
<b>Импульс</b>	$LMT^{-1}$	<i>p</i>	кг·м/с
Энергия	$L^2MT^{-2}$	<i>W, E</i>	Дж
Қуат	$L^2MT^{-3}$	<i>P</i>	Вт
Ішкі энергия Энтальпия	$L^2MT^{-2}$	<i>U</i>	Дж
Еркін энергия	$L^2MT^{-2}$	<i>F</i>	Дж
Гиббс функциясы	$L^2MT^{-2}$	<i>G</i>	Дж
Жылу мөлшері	$L^2MT^{-2}$	<i>Q</i>	Дж
Жұмыс	$L^2MT^{-2}$	<i>A</i>	Дж
Аудан	$L^2$	<i>S</i>	м <sup>2</sup>
Көлем	$L^3$	<i>V</i>	м <sup>3</sup>
Мольдік көлем	$L^3N^{-1}$	<i>V<sub>m</sub></i>	м <sup>3</sup> /моль
Меншікті көлем	$L^3M^{-1}$	<i>v</i>	м <sup>3</sup> /кг
Масса тығыздығы	$ML^{-3}$	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>
Жылу сыйымдылық	$L^2MT^{-2}\theta^{-1}$	<i>C</i>	Дж/К
<b>Энтропия</b>	$L^2MT^{-2}\theta^{-1}$	<i>S</i>	Дж/К
Салыстырмалы атомдық масса	өлшемсіз	<i>A<sub>r</sub></i>	
Мольдік масса	$MN^{-1}$	<i>M</i>	кг/моль
Заттың құрылымдық бөлшектерінің саны	өлшемсіз	<i>n, m</i>	
Концентрация	$L^{-3}$	<i>n<sub>0</sub></i>	м <sup>-3</sup>
Адиабат көрсеткіші	өлшемсіз	$\gamma$	
Политроп көрсеткіші	өлшемсіз	<i>n</i>	
Пайдалы әсер коэффициенті	өлшемсіз	$\eta$	Н/м
Беттік керілу	$MT^{-2}$	$\sigma$	Дж
Химиялық потенциал	$L^2MT^{-2}$	$\mu$	

Сызықтық ұлғаюдың температуралық коэффициенті	$\theta^l$	$\alpha$	$K^{-1}$
Көлемдік ұлғаюдың температуралық коэффициенті	$\theta^l$	$\gamma$	$K^{-1}$
Қысымның температуралық коэффициенті	$\theta^l$	$\beta$	$K^{-1}$
Еркін жүру жолының орташа ұзындығы	$L$	$\langle l \rangle, l$	$m$
Соктығысу жиілігі	$T^{-1}$	$\nu$	$c^{-1}$
Жылуөткізгіштік	$LMT^{-3}\Theta^{-1}$	$\lambda$	$Вт/(м\cdot K)$
Динамикалық тұтқырлық	$L^{-1}MT^{-1}$	$\eta$	$Па\cdot c$
Диффузия коэффициенті	$L^2T^{-1}$	$D$	$m^2/c$

Іргелі физикалық тұрақтылар		
Атаулары	Белгілеуі	Сандық мәні
Вакуумдағы жарық жылдамдығы	$c$	$2,99792458\cdot 10^8$ м/с
Еркін түсу үдеуі	$g$	$9,80665$ м/с <sup>2</sup>
Қалыпты мольдік көлем	$V_{m,n}$	$22,41383$ м <sup>3</sup> /моль
Авогадро тұрақтысы	$N_A$	$6,022045\cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Планк тұрақтысы	$h$	$6,626176\cdot 10^{-34}$ Дж·Гц <sup>-1</sup>
	$\hbar$	$1,0545887\cdot 10^{-34}$ Дж·с
Мольдік газ тұрақтысы (универсал газ тұрақтысы)	$R$	$8,31441$ Дж/(моль·К)
Электрлік тұрақтысы	$\epsilon_0$	$8,85418782\cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магниттік тұрақтысы	$\mu_0$	$1,25663706144\cdot 10^{-6}$ Гн/м
Массаның атомдық бірлігі	$m_u$	$1,6605655\cdot 10^{-27}$ кг
	$\sigma$	$5,67032\cdot 10^{-8}$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К <sup>4</sup> )
Стефан-Больцман тұрақтысы	$e$	$1,6021892\cdot 10^{-19}$ Кл
Элементар электр заряды	$m_e$	$9,109534\cdot 10^{-31}$ кг
Электронның тыныштық массасы	$m_p$	$1,6726485\cdot 10^{-27}$ кг
Протонның тыныштық массасы	$m_n$	$1,6749543\cdot 10^{-27}$ кг
Гравитациялық тұрақты	$G$	$6,6720\cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )

► **Молекулалық физика** – физиканың, заттың құрылымын және қасиеттерін, барлық денелер үздіксіз хаустық қозғалыста болатындығына сүйенетін молекулалық-кинетикалық көзқарастарға сүйене отырып зерттейтін саласы.

► **Термодинамика** – физиканың, термодинамикалық тепе-теңдік күйдегі макроскопиялық жүйелердің жалпы қасиеттерін және осы күйлердің арасында болып жатқан өту процестерін зерттейтін саласы.

► **Термодинамикалық жүйе** – бір-бірімен және сонымен қатар басқа да денелермен (сыртқы ортамен) өзара әрекеттесетін және энергия алмасып жататын макроскопиялық денелердің жиынтығы.

► **Термодинамикалық параметрлер (күй параметрлері)** – термодинамикалық жүйенің қасиеттерін сипаттайтын физикалық шамалардың жиынтығы.

Көбіне күй параметрлері ретінде температураны, қысымды және меншікті көлемді таңдайды.

► **Термодинамикалық тепе-теңдік** – уақыт бойынша өзгеріссіз қалатын күйдегі термодинамикалық жүйенің тепе-теңдігі.

► **Температура** – макроскопиялық жүйенің термодинамикалық тепе-теңдік күйін сипаттайтын физикалық шама.

Өлшемдер мен салмақтар бойынша XI Бас конференцияның (1960) шешімі бойынша тек екі температуралық шкалаларды ғана – сәйкес түрде

кельвиндерге (К) және Цельсий градустеріне ( $^{\circ}\text{C}$ ) градуирленген **термодинамикалық және Халықаралық практикалық шкалаларды** ғана пайдаланауға болады.

► **Халықаралық практикалық шкалада** судың  $1,013 \cdot 10^5$  Па қысым кезіндегі қатаю және қайнау температуралары сәйкес түрде 0 және  $100^{\circ}\text{C}$  -ге тең (реперлік нүктелер). **Термодинамикалық температуралық шкала** жалғыз реперлік нүктемен анықталады, ол үшін **судың үштік нүктесі** алынған ( $609$  Па қысым кезінде мұз, су және қаныққан бу термодинамикалық тепе-теңдікте болатын температура). Термодинамикалық температураны және Халықаралық практикалық шкала бойынша температураны байланыстыратын формула:  $T = 273,15 + t$ .

► **Термодинамикалық процесс** – ең болмағанда термодинамикалық параметрлерінің біреуінің өзгеруімен байланысты болатын термодинамикалық жүйедегі өзгеріс.

► **Идеал газ** – идеалданған модель, ол бойынша:

- 1) газ молекулаларының меншікті көлемі ыдыстың көлемімен салыстырғанда ескерімсіз аз;
- 2) газ молекулаларының арасында өзара әрекеттесу күштері жоқ;
- 3) газ молекулаларының бір-бірімен және ыдыстың қабырғасымен соқтығысулары абсолют серпімді.

► **Бойль-Мариотт заңы:** *газдың берілген массасы үшін тұрақты температура кезінде газдың қысымының оның көлеміне көбейтіндісі тұрақты шама болып табылады.*

$$pV = \text{const} \quad (T = \text{const}, m = \text{const})$$

[ $p$  – қысым,  $V$  – көлем,  $T$  – термодинамикалық температура,  $m$  – газ массасы].

► **Изотермиялық процесс** – тұрақты температура кезінде өтетін процесс.

► **Изотерма** – тұрақты температура кезіндегі газ күйі параметрлерінің арасындағы байланыс графигі.  $p, V$  координаттарындағы изотермалар дегеніміз гиперболалар, процесс өтетін температура неғұрлым жоғары болса, графикте олар солғұрлым жоғары орналасады ( $T_1$ -сурет). Изотермиялық процесс  $V, T$  координаттарында  $T_2$ -суретте, ал  $p, T$  координаттарында  $T_3$ -суретте көрсетілген.

► **Гей-Люссак заңы** (тұжырымдамасы):

*Газдың берілген массасының көлемі тұрақты қысым кезінде температураға қатысты сызықты өзгереді.*

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

немесе

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (p = \text{const}, m = \text{const}).$$

► **Шарль заңы** (тұжырымдамасы):

*Газдың берілген массасының қысымы тұрақты көлем кезінде температураға қатысты сызықты өзгереді.*

$$p = p_0(1 + \alpha t)$$

немесе

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (V = \text{const}, m = \text{const}).$$

[ $t$  – Цельсий шкаласы бойынша температура;  $V_0$  және  $p_0$  – сәйкес түрде кезіндегі көлем мен қысым; коэффициент  $\alpha = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$ ; 1 және 2 индекстер кезкелген күйлерге жатады].

► **Изобаралық процесс** – тұрақты қысым кезінде өтетін процесс.

► **Изобара** – тұрақты қысым кезіндегі газ күйі параметрлерінің арасындағы байланыс графигі.

Изобаралар  $p, V$  координаттарында Т4-суретте,  $V, t$  координаттарында Т5-суретте,  $p, T$  координаттарында Т6-суретте өрнектелген.

► **Изохора** – тұрақты көлем кезіндегі газ күйі параметрлерінің арасындағы байланыс графигі.

Изохоралар  $p, V$  координаттарында Т7-суретте,  $V, T$  координаттарында Т8-суретте,  $p, t$  координаттарында Т9-суретте өрнектелген.

► **Авогадро заңы:** *кезкелген газдың молдері бірдей температура мен қысымда бірдей көлемдер алады.*

$$V_m = \frac{V}{\nu} = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}.$$

► **Молдік көлем** – біртекті жүйенің көлемінің жүйенің зат мөлшеріне қатынасына тең физикалық шама.

► **Авогадро тұрақтысы** – түрліше заттардың бір молінде болатын атомдардың (молекулалардың, немесе басқа құрылымдық бірліктердің) саны.

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

► **Молдік масса - заттың 1 молінің массасы**

$$M = m_0 N_A$$

[ $m_0$  – молекуланың массасы,  $N_A$  – Авогадро тұрақтысы].

Молдік массаның бірлігі – молге килограмм (кг/моль).

► **Молге килограмм** дегеніміз зат мөлшері 1 моль заттың массасы 1 кг болатын кездегі молдік массаға тең.

► **Дальтон заңы:** *идеал газ қоспасының қысымы оған кіретін газдардың парциалдық қысымдарының қосындысына тең:*

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

( $p_1, p_2, \dots, p_n$  – **парциалдық қысым**, егер қоспаның газдарының әрбіреуі жеке-дара қоспаның көлеміне тең көлемді сол температура кезінде алып тұратын болса, олар осындай қысым көрсеткен болар еді).

► **Клапейрон теңдеуі**

$$\frac{pV}{T} = B = \text{const}$$

( $p$  – қысым,  $V$  – көлем,  $T$  – температура,  $B$  – газ тұрақтысы, ол түрлі газдар үшін түрліше болады).

► **Клапейрон–Менделеев теңдеуі** (идеал газдың күй теңдеуі)

$$pV_m = RT \text{ (газдың 1 молі үшін)}$$

$$pV = \frac{m}{M} RT \text{ (газдың кезкелген массасы үшін)}$$

( $V_m$  – молдік көлем;  $R$  – газдың молдік тұрақтысы;  $M$  – газдың молдік массасы;  $m$  – газдың массасы;  $m/M = \nu$  – зат мөлшері).



► **Газдың молдік тұрақтысы**

$$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К}).$$

► **Больцман тұрақтысы**

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}/\text{К}$$

( $R$  – газдың молдік тұрақтысы;  $N_A$  – Авогадро тұрақтысы).

► **Газ қысымының молекулалардың  $n$  концентрациясына (газдың  $1 \text{ м}^3$  көлеміндегі молекулалар санына) және  $T$  температурасына тәуелділігі**

$$p = nkT$$

( $k$  – Больцман тұрақтысы).

Идеал газдың қысымы газ молекулаларының концентрациясына және оның абсолют температурасына тура пропорционал болады.

► **Лошмидт тұрақтысы** – қалыпты жағдайларда газдың  $1 \text{ м}^3$  көлеміндегі молекулалар саны.

$$N_L = \frac{p_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

► **Идеал газдың молекулалық-кинетикалық теориясының негізгі тендеуі**

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2,$$

немесе

$$pV = \frac{2}{3} N \left( \frac{m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2}{2} \right) = \frac{2}{3} E,$$

немесе

$$pV = \frac{1}{3} Nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2$$

( $\langle v_{\text{кв}} \rangle$  – молекулалардың орташа квадраттық жылдамдығы;  $E$  – газдың барлық молекулаларының ілгерілемелі қозғалысының қосынды кинетикалық энергиясы;  $n$  – молекулалардың концентрациясы;  $m_0$  – бір молекуланың массасы;  $m = Nm_0$  – газдың массасы;  $N$  – газдың  $V$  көлеміндегі молекулалар саны).

► **Идеал газдың молекуласының ілгерілемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы**

$$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

► Идеал газ молекулаларының жылдамдықтар бойынша таралуы үшін Максвелл заңы Молекулалардың жылдамдықтар бойынша таралу функциясы  $f(v)$  (Т10-сурет) молекулалардың  $N$  жалпы санының ішіндегі жылдамдықтары  $v$ -дан  $v + dv$  -ға дейінгі интервалда жататын молекулаларының салыстырмалы  $dN(v)/N$  санын анықтайды.

$$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv} = 4\pi \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left( -\frac{mv_0^2}{2kT} \right).$$

Бұл функцияның графигі Т10-суретте келтірілген.

Таралу функциясынан температура артқан кезде молекулалардың жылдамдықтар бойынша таралу функциясының максимумының оңға қарай ығысатындығын көреміз (ең ықтимал жылдамдықтың мәні артады (Т11-сурет)). Бірақ қисықпен шектелген аудан өзгеріссіз қалады, сондықтан

температура артқан кезде молекулалардың жылдамдықтар бойынша таралуы қисығы созылады және төмендейтін болады.

► **Молекулалардың жылдамдықтары:**

*орташа квадраттық*

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

**орташа арифметикалық**

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}}$$

**ең ықтимал** (идеал газ молекулаларының жылдамдықтар бойынша таралуы функциясы максимал болатын кездегі жылдамдық)

$$v_{\text{ык}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}$$

(мұндағы  $m_0$  – молекуланың массасы).

► **Идеал газ молекулаларының жылулық қозғалысы энергиялары бойынша таралуы үшін Максвелл заңы.** Молекулалардың жылулық қозғалысының энергиялары бойынша таралуының  $f(v)$  функциясы молекулалардың  $N$  жалпы санының қандай салыстырмалы  $dN(\varepsilon)/N$  санының кинетикалық энергиялары  $\varepsilon$ -нан  $\varepsilon + d\varepsilon$ -ға дейінгі аралықта жаттатындығын анықтайды.

$$f(\varepsilon) = \frac{dN(\varepsilon)}{Nd(\varepsilon)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \varepsilon^{1/2} \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT}\right).$$

► **Барометрлік формула**

$$p_h = p_0 \exp\left[-\frac{Mg(h-h_0)}{kT}\right]$$

( $p_h$  және  $p_0$  –  $h$  және  $h_0$  биіктіктердегі газ қысымы).

► **Сыртқы потенциалдық өрістегі Больцман таралуы**

$$n = n_0 \exp\left(\frac{-Mgh}{RT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{m_0gh}{kT}\right)$$

немесе

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_p}{kT}\right)$$

( $n$  және  $n_0$  – молекулалардың  $h$  және  $h=0$  биіктіктегі концентрациясы;

$E_p = m_0gh$  – ауырлық өрісіндегі молекуланың потенциалдық энергиясы).

Газ молекуласының 1 с ішіндегі **соқтығысуларының орташа саны**

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle$$

( $d$  – молекуланың эффективтік диаметрі (соқтығысу кезінде екі молекуланың центрлерінің

бір-біріне жуықтай алатын минималь қашықтығы);  $n$  – молекулалардың концентрациясы;

$\langle v \rangle$  – молекулалардың орташа арифметикалық жылдамдығы).

► Газ молекулаларының еркін өту жолының орташа ұзындығы – молекуланың қатарлас екі соқтығысуларының орташа ара қашықтығы).

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n}.$$

► Тасымалдану құбылыстары – тепе-теңдіксіз термодинамикалық жүйедегі қайтымсыз процестер, осылардың нәтижесінде энергияның, массаның, импульстың кеңістіктік тасымалдануы өтеді.

Тасымалдану құбылыстарына *жылуөткізгіштік* (энергияның тасымалдануынан туады), *диффузия* (массаның тасымалдануынан туады) және *ішкі үйкеліс* (импульстың тасымалдануынан туады) жатады.

► Фурьенің жылуөткізгіштік заңы

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

( $j_E$  – жылу ағынының тығыздығы;  $\lambda$  – жылуөткізгіштік;  $\frac{dT}{dx}$  – температура

**градиенті**, ол температураның берілген ауданшаға нормал бағытта  $x$  бірлік ұзындығына келетін өзгеріс жылдамдығына тең болады. Минус таңбасы жылуөткізгіштік кезінде энергияның температураның төмендеу бағытында тасымалданатындығын көрсетеді).

► Жылу ағынының тығыздығы –  $x$  осіне перпендикуляр  $1 \text{ м}^2$  аудан арқылы  $1 \text{ с}$  ішінде жылу түрінде алынып өтілетін энергиямен анықталатын физикалық шама.

► Жылуөткізгіштік (жылуөткізгіштік коэффициенті).

$$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

► Фик заңы

$$j_m = -D \frac{d\rho}{dx}$$

( $j_m$  – масса ағынының тығыздығының;  $D$  – диффузия (диффузия коэффициенті);  $\frac{d\rho}{dx}$  – тығыздық градиенті, ол тығыздықтың берілген

ауданға нормал бойымен бағытталған бірлік  $x$  ұзындыққа келетін өзгеріс жылдамдығына тең. Минус таңбасы массаның тасымалдануының тығыздықтың кемуі бағытында өтетіндігін көрсетеді).

► Масса ағынының тығыздығы –  $1 \text{ с}$  ішінде осіне перпендикуляр  $1 \text{ м}$  аудан арқылы диффузияланатын зат массасымен анықталатын физикалық шама.

► Диффузия (диффузия коэффициенті)

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

► Ішкі үйкеліс (тұтқырлық) үшін Ньютон заңы

$$j_p = -\eta \frac{dv}{dx}$$

( $j_p$  – импульс ағынының тығыздығы;  $\eta$  – динамикалық тұтқырлық;  $\frac{dv}{dx}$  –

**тығыздық градиенті**, ол жылдамдықтың қабаттардың қозғалыс бағытына перпендикуляр  $x$  бағытындағы өзгеріс тездігін көрсетеді. Минус таңбасы импульстың жылдамдықтың түсу бағытында тасымалданатындығын көрсетеді).

► **Импульс ағынының тығыздығы** – 1 с ішінде  $x$  осіне перпендикуляр  $1 \text{ м}^2$  аудан арқылы  $x$  осінің оң бағытында алынып өтілетін толық импульспен анықталатын физикалық шама.

► **Динамикалық тұтқырлық.**

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

## ТЕРМОДИНАМИКА

► **Ішкі энергия**  $U$  – жүйенің микробөлшектерінің (молекулаларының, атомдарының, электрондарының, ядроларының және т.б.) хаостық (жылулық) қозғалысының энергиясы және осы бөлшектердің өзара әрекеттесу энергиясы.

Ішкі энергия – жүйенің термодинамикалық күйінің бірімәнді функциясы, яғни әрбір күйде жүйенің нақты анықталған ішкі энергиясы болады (ол жүйенің осы күйге қалай келгеніне тәуелсіз).

► **Энергияның молекулалардың еркіндік дәрежелері бойынша біркелкі таралуы жайлы Больцман заңы:** *термодинамикалық тепе-теңдік күйдегі статистикалық жүйе үшін әрбір ілгерілемелі айналмалы еркіндік дәрежесіне орташа есеппен  $kT/2$ -ге тең кинетикалық энергиядан, ал әрбір тербеліс еркіндік дәрежесіне  $kT$ -ға тең энергиядан келеді.*

Тербеліс еркіндік дәрежесіне екі есе артық энергиядан келеді, себебі оған тек кинетикалық энергия ғана тиесілі емес (ілгерілемелі және айналмалы қозғалыстар кезіндегідей), потенциалдық энергия да тиесілі, әрі кинетикалық және потенциалдық энергиялардың орташа мәндері бірдей болады.

► **Молекуланың орташа энергиясы**

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$$

[ $i$  – ілгерілемелі, айналмалы, екі еселенген тербеліс еркіндік дәрежелерінің қосындысы ( $i = n_{\text{ілл}} + n_{\text{айн}} + 2n_{\text{терб}}$ )].

► **Идеал газдың ішкі энергиясы**

$$U = \nu \frac{i}{2} RT = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT$$

( $\nu$  – зат мөлшері,  $m$  – газдың массасы,  $M$  – газдың молдік массасы,  $R$  – газдың молдік тұрақтысы).

► **Термодинамиканың бірінші бастамасы:** *жүйеге берілген жылу оның ішкі энергиясын өзгертуге және оның сыртқы күштерге қарсы жұмыс атқаруына жұмсалады.*

Егер жүйе периодты түрде бастапқы күйіне қайтып оралып отыратын боса, онда оның ішкі энергиясының өзгерісі  $\Delta U = 0$ . Сонда, термодинамиканың бірінші бастамасына сай,  $A = Q$ .

$$Q = \Delta U + A.$$

► Жүйенің азғантай өзгерісі үшін **термодинамиканың бірінші бастамасы**

$$dQ = dU + dA,$$

немесе

$$\delta Q = dU + \delta A$$

( $dU$  – ішкі энергияның шексіз аз өзгерісі,  $\delta A$  – элементар жұмыс,  $\delta Q$  – шексіз аз жылу мөлшері;  $dU$  – толық дифференциал, ал  $\delta A$  және  $\delta Q$  толық дифференциалдар болып табыламайды).

► **Бірінші түрдегі мәңгі двигатель** – периодты түрде жұмыс атқаратын, сырттан берілген энергия мөлшерінен артық жұмыс жасай алатын двигатель мүмкін емес (термодинамиканың бірінші бастамасының тұжырымдамаларының бірі).

► **Жылу сыйымдылық** – сан мәні денеге берілген  $\Delta Q$  жылу мөлшерінің дененің термодинамикалық процесстер кезіндегі температурасының өзгерісіне қатынасына тең болатын физикалық шама.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad c = \frac{dQ}{dT}.$$

► **Заттың меншікті жылу сыйымдылығы** – заттың 1 кг-ын 1 К-ге қыздыруға қажетті жылу мөлшерімен анықталатын шама.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad c = \frac{\delta Q}{mdT}.$$

► Жылу сыйымдылықтың бірлігі – **килограмм-кельвинге джоуль** [Дж/(кг.К)].

► **Молдік жылу сыйымдылық** – заттың 1 мольін 1 К-ге қыздыруға қажетті жылу мөлшерімен анықталатын шама.

$$C_m = \frac{Q}{\nu\Delta T}, \quad C_m = \frac{\delta Q}{\nu dT}.$$

( $\nu = m/M$  – зат мөлшері).

► Молдік жылу сыйымдылықтың бірлігі – **моль-кельвинге джоуль** [Дж/(моль.К)].

► Меншікті жылу сыйымдылықтың молдік жылу сыйымдылықпен байланыс формуласы

$$C_m = cM$$

( $M$  – заттың молдік массасы).

► **Газдың тұрақты көлем кезіндегі молдік массасы.**

$$C_v = \frac{i}{2} R.$$

► **Газдың тұрақты қысым кезіндегі молдік массасы.**

$$C_p = \frac{i+2}{2} R.$$

► **Майер теңдеуі**  $C_p$  жылу сыйымдылығының  $C_v$  жылу сыйымдылығынан әрқашанда молдік газ тұрақтысы шамасына артық болатындығын көрсетеді. Бұл – газды тұрақты қысым кезінде қыздырған кезде газдың ұлғаюы үшін қосымша жұмыс атқару керек екендігімен түсіндіріледі, себебі газ қысымының тұрақты болып қалуы газдың көлемінің артуымен қамтамасыз етіледі.

$$C_p = C_v + R.$$

► **Идеал газдың ішкі энергиясының өзгерісі.**

$$dU = \frac{m}{M} C_v dT.$$

► **Газдың көлемі өзгерген кезде оның атқаратын жұмысы.**

$$dA = pdV.$$

► **Газдың көлемі өзгерген кезде атқарылатын толық жұмыс**

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

( $V_1$  және  $V_2$  – сәйкес түрде газдың бастапқы және ақырғы көлемдері).

Қайсы-бір процесс кезінде атқарылған жұмысты график түрінде  $p, V$  координаттарындағы қисықпен өрнектеуге болады. Мысалы, ұлғаю кезіндегі газ қысымының өзгерісі Т12-суретте көрсетілген. Көлемді  $dV$  шамасына өзгерткен кезде газдың атқаратын жұмысы  $p dV$ , яғни табаны  $dV$  болатын жолақтың ауданымен анықталады. Сондықтан, газдың  $V_1$  көлемнен  $V_2$  көлемге дейін ұлғаюы кезінде атқарылған жұмыс абцисса осімен,  $p = f(V)$  қисықпен және  $V_1$  және  $V_2$  түзулерімен шектелген ауданмен анықталады.

► **Изобаралық процесс кезіндегі газдың атқаратын жұмысы** график түрінде тіктөртбұрыштың ауданымен анықталады (Т13-сурет).

$$A = p(V_2 - V_1).$$

Клапейрон-Менделеев теңдеуін пайдалана отырып, жұмыстың өрнегін одан  $R$  молдік газ тұрақтысының физикалық мағынасы шығатын түрге келтіруге болады: егер  $T_2 - T_1 = 1K$  болса, онда 1 моль газ үшін  $R = A$ , яғни  $R$  сан мәні жағынан идеал газдың 1 мольін 1 К-ге қыздыру кезіндегі изобаралық жұмысқа тең болады.

$$A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

► **Изотермиялық процесс кезіндегі жұмыс**

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

немесе

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

► **Адиабаттық процесс** – жүйе және қоршаған орта арасында жылу алмасу болмайтын процесс ( $\delta Q = 0$ ).

► **Адиабаттық процестің теңдеуі (Пуассон теңдеуі)**

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}$$

( $\gamma$  – адиабата көрсеткіші).

Адиабаттық процестің диаграммасы (адиабата)  $p, V$  координаттарында гиперболамен өрнектеледі (Т14-сурет). Адиабата ( $pV^\gamma = \text{const}$ ) изотермаға қарағанда ( $pV = \text{const}$ ) тіктеу. Бұл былай түсіндіріледі: адиабаттық 1–3 сығылу кезінде газдың қысымының артуы изотермиялық процесс кезіндегідей оның көлемінің кемуінен ғана емес, температураның артуынан да болады.

► **Адиабата көрсеткіші**

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}.$$

► **Адиабаттық процесс кезіндегі жұмыс**

$$A = \frac{m}{M} C_v (T_1 - T_2),$$

$$A = \frac{RT_1}{\gamma-1} \frac{m}{M} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]$$

( $T_1, T_2$  және  $V_1, V_2$  – сәйкес түрде газдың бастапқы және ақырғы температурасы мен көлемі).

► **Политроптық процесс** – жылусыйымдылығы тұрақты болып қалатын процесс.  $C = 0, n = \gamma$  кезінде адиабата теңдеуін аламыз;  $C = \infty, n = 1$  кезінде изотерма теңдеуін;  $C = C_p, n = 0$  кезінде изобара теңдеуін;  $C = C_v, n = \pm \infty$  кезінде изохора теңдеуін аламыз. Сонымен, барлық қарастырылып кеткен процестер политроптық процестің дербес жағдайлары екен.

► **Политроптық процестің теңдеуі**

$$pV^n = \text{const}$$

( $n$  – политропа көрсеткіші).

► **Политропа көрсеткіші**

$$n = \frac{C - C_p}{C - C_v}.$$

► **Дөңгелек процесс (цикл)** – жүйенің бірқатар күйлерден өтіп, өзінің бастапқы күйіне қайтып оралатын процесс.

$p, V$  диаграммада цикл тұйықталған қисықпен өрнектеледі (Т15,16-суреттер). Идеал газбен өтетін циклды ұлғаю (1–2) және сығылу (2–1) процестеріне бөлуге болады. *Ұлғаю жұмысы* ( $1a2V_2V_11$  фигураның ауданымен анықталады) *оң* ( $dV > 0$ ), *сығылу жұмысы* ( $2b1V_1V_22$  фигураның ауданымен анықталады) *теріс* ( $dV < 0$ ) болады. Демек газдың цикл ішінде атқарған жұмысы тұйықталған қисықпен қамтылған ауданмен анықталады.

► **Тура цикл** – оң  $A = \oint pdV > 0$  жұмыс атқарылатын цикл (цикл сағат тілі бағытында өтеді; Т15-сурет).

► **Кері цикл** – теріс  $A = \oint pdV < 0$  жұмыс атқарылатын цикл (цикл сағат тілі бағытына қарсы өтеді; Р16-сурет).

► **Жылу двигателі** – сырттан алынған жылу есебінен жұмыс атқаратын периодты түрде жұмыс істейтін двигатель.

Жылу двигателінің жұмыс принципі Т17-суретте көрсетілген.  $T_1$  температурасы жоғарырақ болатын **қыздырғыш** деп аталатын термостаттан цикл ішінде  $Q_1$  жылу мөлшері алынады да, температурасы төменірек  $T_2$  болатын **суытқыш** деп аталатын термостатқа цикл ішінде  $Q_2$  жылу мөлшері беріліп,  $A = Q_1 - Q_2$  жұмыс атқарылады.

Жылу двигателінің термиялық пайдалы коэффициенті  $\eta = 1$  болу үшін  $Q_2 = 0$  шарты орындалуы тиіс, яғни жылу двигателінің бір ғана жылу көзі болуы тиіс, ал бұл мүмкін емес. Француз физигі әрі инженері Н.Л.С.Карно *жылу двигателінің жұмыс атқару үшін температуралары түрліше болатын кем дегенде екі жылу көзінің қажет болатындығын көрсетті, әйтпесе бұл термодинамиканың екінші бастамасына қайшы келеді.*

Карно теоремасы: *қыздырғышының ( $T_1$ ) және суытқышының ( $T_2$ ) температуралары бірдей болатын периодты түрде жұмыс атқаратын барлық жылу машиналарының ішінде п.э.к.-нің ең үлкен мәні қайтымды машиналарда болады; осы кезде қыздырғыштың ( $T_1$ ) және суытқыштың ( $T_2$ ) бірдей температуралары кезінде жұмыс атқаратын қайтымды машиналардың п.э.к.-і бір-біріне тең болады және ол жұмыс денесінің тегіне тәуелсіз болады.*

► Дөңгелек процесс (цикл) үшін **термиялық пайдалы әсер коэффициенті**

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

( $Q_1$  – жүйенің алған жылу мөлшері;  $Q_2$  – жүйенің берген жылу мөлшері;  $A$  – цикл ішінде атқарылған жұмыс).

► **Жұмыс денесі** – дөңгелек процесс атқаратын және басқа денелермен энергия алмасып отыратын дене.

► **Суытқыш машина** – сыртқы күштер есебінен жылу температурасы жоғарырақ денелерге беріліп отыратын периодты түрде жұмыс атқаратын қондырғы.

Суытқыш машинаның жұмыс принципі T18-суретте көрсетілген. Жүйе цикл ішінде  $T_2$  температурасы төменірек термостаттан  $Q_2$  жылу мөлшерін алып,  $T_1$  температурасы жоғарырақ болатын термостатқа  $Q_1$  жылу мөлшерін береді. Дөңгелек процестер үшін  $Q = A$ , бірақ, шарт бойынша  $Q = Q_2 - Q_1 < 0$ , сондықтан  $A < 0$  және  $Q_2 - Q_1 = -A$ , немесе  $Q_1 = Q_2 + A$ , яғни жоғарырақ  $T_1$  температура кезінде жүйенің жылу көзіне берген  $Q_1$  жылу мөлшері төменірек  $T_2$  температура кезінде жылу көзінен алынған  $Q_2$  жылу мөлшерінен жүйеге атқарылған жұмыс мөлшеріндей шамаға артық болады. Демек, жұмыс атқарусыз салқынырақ денеден жылуды алып, оны ыстығырақ денеге беруге болмайды.

► **Қайтымды процесс** – тура да, кері де бағыттарда өте алатын термодинамикалық процесс, әрі, егер мұндай процесс әуелі тура бағытта, сосын кері бағытта өтіп, жүйе бастапқы күйге қайтып оралатын болса, онда қоршаған ортада да, жүйенің өзінде де ешқандай өзгерітер болмайды. Осы шарттарды қанағаттандырмайтын кезкелген процесс **қайтымсыз** болып табылады.

Қайтымды процестер дегеніміз нақты, реал процестердің *идеализациясы* болып табылады.

► **Келтірілген жылу мөлшері** – изотермиялық процесс кезінде дененің алған  $Q$  жылу мөлшерінің жылу беретін дененің  $T$  температурасына қатынасына тең болатын физикалық шама. Процестің шексіз аз учаскесінде денеге берілген келтірілген жылу мөлшері  $\delta Q/T$  болады.

► *Кезкелген қайтымды дөңгелек процесс кезінде денеге берілген келтірілген жылу мөлшері нөлге тең болады.*

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0.$$

Интеграл астындағы  $\delta Q/T$  өрнек қайсы-бір функцияның толық дифференциалы, ол тек жүйенің күйімен ғана анықталады және жүйенің осы күйге қандай жолмен келгеніне тәуелсіз болады.

$$\frac{\delta Q}{T} = dS.$$

► **Энтропия** – толық дифференциалы  $\delta Q/T$  болып табылатын күй функциясы.

► **Клаузиустың теңсіздігі:** *тұйықталған жүйенің энтропиясы не артады (қайтымсыз процестер кезінде), не тұрақты болып қалады (қайтымды процестер кезінде).*

$$\Delta S \geq 0.$$

► **Энтропияның өзгерісі:** 1 күйден 2 күйге теңбе-теңдік өту кезіндегі энтропияның өзгерісі  $1 \rightarrow 2$  өту процесінің түріне тәуелсіз болады.



$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \int_1^2 \frac{dU + dA}{T} =$$

$$= \frac{m}{M} \left( C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right).$$

► Адиабаттық процесс үшін  $\delta Q = 0$ , сонда  $\Delta S = 0$  және де,  $S = \text{const}$ , яғни *адиабаттық қайтымды процесс тұрақты энтропия кезінде өтеді*, сондықтан оны **изоэнтропиялық процесс** деп атайды.

► Жүйенің күйінің **термодинамикалық ықтималдығы**  $W$  – макроскопиялық жүйенің берілген күйін қамтамасыз ете алатын тәсілдер саны немесе берілген макрокүйді іске асыра алатын микрокүйлер саны (анықтама бойынша  $W \geq 1$ , яғни термодинамикалық ықтималдық математикалық тұрғыдан алғандағы ықтималдық емес, соңғысы  $\leq 1$  болады).

► **Больцман формуласы**: жүйенің энтропиясын және термодинамикалық ықтималдықты байланыстырады

$$S = k \ln W$$

(мұндағы  $k$  – Больцманның тұрақтысы).

Энтропия берілген макрокүйді қамтамасыз ететін микрокүйлер санының логарифмімен анықталады. Демек, *энтропияны термодинамикалық жүйенің күйінің ықтималдығының мөлшері деп қарастыруға болады*. Больцманның формуласының көмегімен энтропияға мынандай статистикалық түсініктеме беруге болады: *энтропия жүйенің ретсіздігінің мөлшері болып табылады*.

► **Энтропияның артуы принципі**: тұйықталған жүйедегі барлық процестер кезінде оның энтропиясы артады.

Энтропияның статистикалық тұрғысынан бұл дегеніміз: *тұйықталған жүйедегі процестер микрокүйлердің артуы бағытында, басқаша айтқанда, ықтималдығы төмен күйлерден ықтималдығы жоғары күйлер бағытында өтеді және бұл күй ықтималдығы максимал болғанға дейін созылады*.

► **Термодинамиканың екінші бастамасы** (тұжырымдамалар).

1. **Кельвин бойынша**: *жалғыз ғана нәтижесі қыздырғыштан алған жылууды оған эквивалентті жұмысқа айналдыру болып табылатын дөңгелек процесс мүмкін емес*;

**екінші түрдегі мәңгі двигатель** – *бір ғана жылу көзін суыту есесінен жұмыс атқаратын периодты түрде жұмыс істейтін двигатель мүмкін емес*.

2. **Клаузиус бойынша**: *жалғыз ғана нәтижесі салқынырақ денеден ыстығырақ денеге жылу беру болып табылатын дөңгелек процесс мүмкін емес*.

► **Термодинамиканың үшінші бастамасы (Нернст теоремасы)**: тепе- теңдік күйдегі барлық денелердің энтропиялары температура  $0 \text{ K}$ -ге жақындаған сайын нөлге ұмтылады.

$$\lim_{T \rightarrow 0 \text{ K}} S = 0.$$

► **Карно циклінің** (екі изотерма мен екі адиабаттан тұратын) **термиялық пайдалы әсер коэффициенті** (Т19-сурет)

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

( $Q_1$  – изотермиялық ұлғаю кезінде газдың қыздырғыштан алған жылу мөлшері;  $Q_2$  – газдың изотермиялық сығылу кезінде суытқышқа берген жылу мөлшері;  $T_1$  – қыздырғыштың температурасы;  $T_2$  – суытқыштың температурасы).

► **Нақты газдар** – қасиеттері молекулалардың өзара әрекеттесуіне тәуелді болатын газдар, мұнда **молекулалар аралық өзара әрекеттесу күштерін** ескеру керек. Олар  $\leq 10^{-9}$  м қашықтықтарда білінеді және молекулалар арасындағы қашықтықтар артқан кезде тез азаяды. Мұндай күштерді **қысқа әсерлі күштер** деп атайды.

T20-суретте молекулалар аралық өзара әрекеттесу күштерінің молекулалардың  $r$  ара қашықтығына тәуелділігі сапалық түрде өрнектелген ( $F_{\text{теб}}$  және  $F_{\text{тарт}}$  – сәйкес түрде тебілу және тартылу күштері,  $F$  – олардың қорытқысы). Тебілу күштері *оң* деп, ал өзара тартылыс күштері *теріс* деп саналады.

$r = r_0$  қашықтықта қорытқы күш  $F = 0$ , яғни тартылыс және тебілу күштері бір-бірін теңгерістіреді.  $r_0$  қашықтық молекулалар арасындағы теңбе-теңдік қалыпқа сәйкес келеді, жылулық қозғалыс жоқ кезде олар бір-бірінен осындай қашықтықта орналасқан болар еді.  $r < r_0$  кезінде тебілу күштері күштірек ( $F > 0$ ), ал  $r > r_0$  кезінде тартылыс күштері күштірек болады ( $F < 0$ ).  $r > 10^{-9}$  м қашықтықтарда молекулалар аралық өзара әрекеттесу күштерін жоқ деуге болады ( $F \rightarrow 0$ ).

► **Газдың молі үшін Ван-дер-Ваальс теңдеуі (нақты газдардың күй теңдеуі)**

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

( $–$  молдік көлем; және  $–$  түрлі газдар үшін әртүрлі болатын Ван-дер-Ваальс тұрақтылары).

► **Газдың кезкелген массасы үшін Ван-дер-Ваальс теңдеуі**

$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)\left(\frac{V}{\nu} - b\right) = RT$$

немесе

$$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT$$

( $\nu = m/M$  – зат мөлшері).

► **Ван-дер-Ваальс изотермалары** T21-суретте көрсетілген. Бұл – газдың молі үшін Ван-дер-Ваальс теңдеуімен анықталатын берілген  $T$  температуралар кезіндегі  $p$  қысымның  $V_m$  көлемге тәуелділігінің қисықтары.

Жоғары температура кезінде ( $T > T_k$ ) нақты газдың изотермасының идеал газ изотермасынан айырмашылығы сәл-пәл ғана, сыртқы түріндегі ауытқуда ғана, екі жағдайда да қисық монотонды түсіп отырады. Қайсы-бір  $T_k$  температура кезінде изотерманың жалғыз ғана  $K$  иілу нүктесі бар. Бұл **изотерма кризистік** деп, ал оған сәйкес келетін температура **кризистік температура** деп аталады. Кризистік изотерманың жалғыз ғана  $K$  иілу нүктесі болады, ол **кризистік нүкте** деп аталады; бұл нүктеде оған жанама абцисса осіне параллель болады. Осы нүктеге сәйкес келетін  $V_k$  көлем және  $p_k$  қысым да **кризистік** деп аталады.

► **Кризистік күй** – параметрлері ( $p_k, V_k, T_k$ ) кризистікке тең болатын параметрлер.

Төменгі температуралар кезінде ( $T < T_k$ ) изотермалардың иілімелі учаскесі болады, ол әуелі монотонды төмен түседі, содан кейін монотонды жоғары көтеріліп, тағы да монотонды төмен түседі.

► Ван-дер-Ваальс теңдеуі берілген  $p$  және  $T$  кезінде  $V_m$  көлемге қатысты үшінші дәрежелі теңдеу болып табылады; демек, оның үш заттық, не бір заттық және екі жорамал түбірі болуы тиіс, әрі заттық оң түбірлердің ғана физикалық мағынасы болады. Сондықтан бірінші жағдайға төменгі температуралар кезіндегі изотермалар сәйкес келеді (газ көлемінің  $V_1, V_2$  және  $V_3$  мәндері қысымның бір ғана  $p_1$  мәніне келеді), ал екінші жағдайға – жоғары температуралар кезіндегі изотермалар сәйкес келеді.

$T < T_k$  кезіндегі изотермалардың түрліше учаскелерін қарастыра отырып (Т22-сурет), 1–3 және 5–7 учаскелерде  $V_m$  көлемнің азаюы кезінде  $p$  қысымның артуын көреміз. 3–5 учаскеде заттың сығылуы оның қысымның төмендеуіне алып келеді; практика табиғатта мұндай жағдайлардың кездеспейтіндігін көрсетеді. 3–5 учаскенің болуы заттың көлемін бірте-бірте өзгерткен кезде оның өне бойы біртекті орта түрінде қала алмайтындығын білдіреді; қандай да бір мезетте күйдің секірмелі өзгерісі болып, заттың екі фазаға ыдырауы тиіс. Сөйтіп, нағыз изотерманың түрі 7–6–2–1 сынық сызығындай болады. 7–6 бөлігі газ түріндегі күйге, ал 2–1 бөлігі – сұйық күйге сәйкес келеді. Изотерманың 6–2 горизонтал учаскесіне сәйкес келетін күйлерде заттың сұйық және газ түріндегі фазаларының теңбе-теңдігі бақыланады.

► Бу – заттың кризистіктен төмен температурада газ күйінде болуы.

► Қаныққан бу – өз сұйығымен теңбе-теңдіктегі бу.

Егер изотермалар әулетінің горизонтал учаскелерінің шеткі нүктелері арқылы сызық жүргізсек, онда заттың екі фазалық күйлер обылысын шектеп тұратын, қоңырау тәрізді қисық аламыз (Т23-сурет). Осы қисық пен кризистік изотерма, изотерма астындағы  $p, V_m$  диаграмманы үш аумаққа бөледі: қоңырау тәрізді қисық астында екі фазалық күйлер аумағы (сұйық және оның қаныққан буы) орналасса, оның сол жағында сұйық күй, оң жағында – бу күйі аумақтары орналасады. Бұдың басқа газ тәрізді күйлерден айырмашылығы – оны изотермиялық сығу кезінде сұйыққа айналдыруға болады. Ал газды кризистіктен жоғары температурада ешқандай қысыммен сұйыққа айналдыруға болмайды.

► Ішкі қысым (молекулалардың өзара әрекеттесуінен пайда болады).

$$p' = \frac{a}{V_m^2}.$$

► Кризистік параметрлердің Ван-дер-Ваальстың  $a$  және  $b$  тұрақтыларымен байланысы.

$$V_k = 3b, p_k = \frac{a}{27b^2}, T_k = \frac{8a}{27Rb}.$$

► Нақты газдың ішкі энергиясы – оның молекулаларының жылулық қозғалысының кинетикалық энергиясы және молекулалар аралық өзара әрекеттесудің потенциалдық энергиясы.

► Газдың бір молі үшін:

$$U_m = C_v T - \frac{a}{V_m}.$$

► Газдың кезкелген массасы үшін:

$$U = \nu \left( C_v T - \frac{a}{V_m} \right).$$

► **Жүйенің энтальпиясы**

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2.$$

(1 және 2 индекстері (белгіленулері) жүйенің бастапқы және ақырғы күйлеріне сәйкес келеді).

► **Шық нүктесі** – будың қанығу күйіне өтетін температурасы.

► **Ауаның салыстырмалы ылғалдығы** – берілген температурадағы ауадағы су буының  $p$  парциалдық қысымының осы температурадағы қаныққан будың  $p_k$  қысымына процентпен берілген қатынасы.

$$\varphi = \frac{p}{p_k} \cdot 100\%.$$

► **Беттік керілу** – контурдың бірлік ұзындығына келетін беттік керілу күшіне тең шама. Беттік керілуді беттік энергияның тығыздығы түрінде

$$\sigma = \frac{F}{l}$$

немесе

$$\sigma = \frac{\Delta E}{\Delta S}$$

деп анықтауға да болады

( $F$  – сұйықтың бетін шектеп тұрған  $l$  контурға әсер ететін беттік керілу күші;  $\Delta E$  – қабыршақтың бетінің  $\Delta S$  ауданымен байланысты беттік энергия).

Беттік керілу бірлігі – **метрге ньютон (Н/м)** немесе **шаршы метрге джоуль (Дж/м<sup>2</sup>)**.

► **Беттік актив зат** – сұйықтың беттік керілуін әлсірететін зат.

► **Жұғу. Жұқпау.** Су тамшысы шынының бетіне жайылып кетіп, Т24-суреттегідей түрге келеді, ал сынап болса, ол сол бетте сығылыңқы тамшыға айналады (Т25-сурет). Бірінші жағдайда сұйық қатты бетке **жұғады**, екінші жағдайда – оған **жұқпайды**. Жұғу жанасатын орталардың беттік қабаттарының молекулаларының арасындағы арасында әсер ететін күштердің сипатына тәуелді болады.

Жұғатын сұйық үшін сұйық пен қатты дененің молекулаларының арасындағы тартылыс күштері сұйықтың өз молекулаларының арасындағы тартылыс күштерінен артық болады, осыдан келіп, сұйық қатты денемен жанасу бетін арттыруға тырысады.

Жұқпайтын сұйық үшін сұйық пен қатты дененің молекулаларының арасындағы тартылыс күштері сұйықтың өз молекулаларының арасындағы тартылыс күштерінен кем болады, осыдан келіп, сұйық қатты денемен жанасу бетін кемітуге тырысады.

► **Шеттік бұрыш** – сұйық пен қатты дененің беттерінің жанамаларының арасындағы  $\theta$  бұрышы.

► **Сұйықтың кезкелген пішіндегі бетінің астындағы бас артық қысым** (қисықтықтары түрліше беттер үшін Лаплас формуласы)

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

( $R_1$  және  $R_2$  – сұйық бетінің екі өзара перпендикуляр нормаль қималарының қисықтық радиустары; егер қисықтық центрі сұйықтың ішінде жататын болса, қисықтық радиусы – оң (*дөңес мениск*), егер қисықтық центрі сұйықтан тыс жатса – теріс (*ойыс мениск*) болады).

► **Бас артық қысым** (сфералық бет жағдайында).

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}.$$

► **Капиллярлық** – капиллярлардағы (жіңішке түтіктердегі) сұйық деңгейінің өзгеру құбылысы. Егер сұйық түтіктің материалына жұғатын болса, онда оның ішіндегі сұйықтың беті (**мениск**) ойыс түрде (Т26-сурет), ал жұқпайтын болса – дөңес (Т27-сурет) болады.

► Капилляр түтіктегі **сұйықтың көтерілу биіктігі**

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

( $\theta$  – шеттік бұрыш,  $r$  – капиллярдың радиусы,  $\rho$  – сұйықтың тығыздығы,  $g$  – еркін түсу үдеуі).

► **Кристалдық тор** – бөлшектерінің реттелген орналасуы үш өлшемділікпен периодты түрде қайталанып отыратын сипаттағы құрылым.

► **Кристалл торының түйіндері** – бөлшектер орналасқан, дәлірек айтсақ, өздеріне қатысты бөлшектер тербеліс жасайтын нүктелер.

► **Монокристалл** – бөлшектері біртұтас кристалдық торды түзетін қатты дене.

► **Поликристалл** – ұсақ кристалдық құрылымы бар, яғни, тәртіпсіз бағдарланған көптеген ұсақ кристалдық дәндерден тұратын қатты дене.

► **Анизотроптылық** – физикалық қасиеттердің (серпімділік, механикалық, жылулық, электрлік, магниттік, оптикалық) бағытқа тәуелділігі.

► **Монокристаллдардың анизотроптылығы** кристалдық торда ұзындықтары бірдей, бірақ түрліше бағытталған (49-сурет), кесінділерде бөлшектердің түрліше санының орналасуымен, яғни кристалдық торда бөлшектердің түрліше бағыттарда орналасу тығыздығының бірдей болмайтындығымен түсіндіріледі, осының арқасында кристалдың осы бағыттардағы қасиеттері де түрліше болады.

► **Кристалдық торлардың түрлері.** Кристаллдарды екі белгі бойынша сұрыптауға болады: 1) кристаллографиялық; 2) физикалық (кристалл торының түйіндерінде орналасқан бөлшектердің табиғаты және олардың арасындағы өзара әрекеттесу күштерінің сипаты).

► **Кристаллдардың кристаллографиялық белгісі.** Бұл жағдайда тек бөлшектердің орналасуындағы кеңістіктік периодтық маңызды, сондықтан олардың ішкі құрылымын ескермей, бөлшектерді геометриялық нүктелер деп қарастыруға болады.

Кристалдық тор әртүрлі симметрияларға ие бола алады.

Үшөлшемді кеңістікте жылжыту симметриясын үшөлшемдік периодтық құрылым түсінігімен – **кеңістіктік тор**, немесе **Бравэ торы** түсінігімен байланыстырады. Кезкелген кеңістіктік торды түрліше үш бағыттарда жалғыз ғана құрылымдық элементті – **элементар ұяшықты** – қайталап отыру арқылы алуға болады. Бравэ ұяшықтарының барлығы 14 түрі болады, олардың бір-бірінен айырмашылығы жылжыту симметриясының түрінде ғана. Оларды жеті **кристаллографиялық жүйелер**, немесе, **сингониялар** бойынша таратуға болады.

Элементар ұяшықтарды сипаттау үшін кристаллографиялық координат остерін пайдаланады: олар элементар ұяшықтың қабырғалары бойымен бағытталған, ал координаттар басын элементар ұяшықтың алдыңғы жағының сол жақ бұрышында орналастырады. Элементар кристалл ұяшық дегеніміз қабырғаларының арасындағы бұрыштары  $\alpha$ ,  $\beta$  және  $\gamma$  болатын  $a$ ,  $b$  және  $c$

кабырғаларында тұрғызылған параллелопипед болып табылады.  $a$ ,  $b$  және  $c$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  және  $\gamma$  шамалары **элементар ұяшықтың параметрлері** деп аталады және оны бірмәнділікпен анықтайды.

► **Кристалдық тордың симметриясы** – оның кейбір кеңістіктік орын ауыстырулар кезіндегі, мысалға, параллель жылжытулар, бұрылулар, шағылулар немесе олардың комбинациялары және т.б. кездерде өзімен-өзі болып, бірдей түсу қасиеті. Кристалл тоға симметрия элементтерінің 230 комбинациялары тән, немесе олардың түрліше 230 кеңістіктік топтары болады.

► **Кристалдардың физикалық белгісі**. Кристалдық тордың түйіндерінде орналасқан бөлшектердің тегіне және олардың арасындағы өзара әрекеттесу күштерінің сипатына тәуелді түрде кристалдар төрт түрге бөлінеді: иондық, атомдық, металдық, молекулалық.

► **Иондық кристалл** – кристалдық торының түйіндерінде қарама-қарсы таңбалы иондар кезектесіп орналасатын кристалл.

► **Иондық (гетерополярлық) байланыс** – қарама-қарсы зарядталған иондардың арасындағы кулондық тартылыс күштерінен туатын байланыс.

► **Атомдық кристалл** – кристалдық торының түйіндерінде, тор түйіндерінде кванттық-механикалық тектегі **гомеополярлық**, немесе **коваленттік** (көршілес атомдарда атоммен әлсізрек байланысқан электрондар ортақталған) **байланыстармен** ұсталып тұратын кристалл.

Мысалы, алмаз атомдық кристалл болып табылады, онда көміртегінің әрбір атомы өзі тәрізді төрт атоммен қоршалған, олар одан бірдей қашықтықтарда тетраэдрдің төбелерінде орналасқан.

► **Металдық кристалл** – кристалдық торының түйіндерінде металдың оң иондары орналасқан кристалл. Кристалдық тор түзілген кезде атомдармен әлсіз байланыстағы валенттік электрондар атомдардан бөлініп, коллективтенеді: олар енді иондық байланыс жағдайындағдай бір атомға да, гомеополярлық байланыс жағдайындағдай іргелес атомдар жұбына да жатпайды, түгелдей кристалға жатады.

► **Молекулалық кристалл** – кристалдық торының түйіндерінде заттың нейтрал молекулалары орналасатын, ал олардың арасындағы өзара әрекеттесу күштері атомдардың электрондық қабықшаларындағы электрондардың аз-маз ығысуынан пайда болатын кристалл. Бұл күштерді **ван-дер-ваальстық** деп атайды, себебі олар газды идеалдықтан тайдыратын молекулалар арасындағы тартылыс күштерімен бір тектес болады.

► **Координациялық сан** – кристал торындағы немесе молекулалық кристалдардағы берілген атоммен бір типті оған жуық орналасқан атомдардың саны.

► **Кристалдық тордың ахаулары** – бөлшектердің тордың түйіндерінде реттеліп орналасуларынан ауытқулар.

**Ахаулар** кристалдардың пайда болуы және өсуі кезінде пайда болатын (мысалға, жарықтар, қуыстар, басқа түрдегі макроскопиялық ендірулер) **макроскопиялық** болып, периодтылықтан микроскопиялық ауытқулардан пайда болатын, **микроскопиялық** болып бөлінеді.

**Микроахаулар нүктелік** және **сызықтық** болып бөлінеді. Нүктелік дефекттердің үш түрі болады:

- 1) **вакансия** – кристал торының түйінінде атомның болмауы (50-сурет);
- 2) **түйінаралық атом** – түйіндер арасындағы кеңістікке енген атом (51-сурет);
- 3) **қоспалық атом** – қоспаның атомы, не негізгі заттың кристалдық торындағы атомын алмастырып тұрған атом (52-сурет).

► **Фаза** – берілген заттың басқа мүмкін болатын тепе-теңдік күйлерінен физикалық қасиеттері бойынша ерекшеленетін, осы заттың термодинамикалық тепе-теңдік күйі.

► **Фазалық өту** – заттың бір фазадан екінші фазаға өтуі.

► **Бірінші түрдегі фазалық өту** (мысалы, балқу, кристаллизация және т.б.) – фазалық өту жылуы деп аталатын жылуды жұту немесе шығарумен қатар жүретін фазалық өту.

Температураның тұрақтылығымен, энтропия мен көлемнің өзгерулерімен сипатталады.

► **Екінші түрдегі фазалық өту** – жылуды жұту немесе шығарумен және көлемнің өзгерісімен еш байланыссыз жүретін фазалық өту.

Көлемнің, энтропияның тұрақтылығымен және жылусыйымдылықтың секірмелі түрдегі өзгерісімен сипатталады.

► **Дюлонг және Пти заңы:** *кристалдық күйдегі химиялық тұрғыдан қарапайым денелердің молдік (атомдық) жылусыйымдылығы бірдей болады және температураларға тәуелсіз*

$$C_v = 3R$$

( $C_v$  – химиялық қарапайым денелердің молдік (атомдық) жылусыйымдылығы).

► **Клапейрон-Клаузиус теңдеуі** – тепе-теңдікте өтіп жатқан процесс кезіндегі фазалық өтудің температурасының өзгерісін қысымның өзгерісіне тәуелді түрде анықтауға мүмкіндік беретін теңдеу

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}$$

( $L$  – фазалық өту жылуы,  $(V_2 - V_1)$  – заттың көлемінің бірінші фазадан екінші фазаға өткен кездегі өзгерісі,  $T$  – өту температурасы (процесс изотермиялық)).