

## Лекциялардың қысқаша конспектілері

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Заитович

#### 1-ші Лекция

Тақырыбы: Зерттеу кешендері: молекулалық физика және термодинамика пәні мен әдістері

*Лекцияның мақсаты* молекулалық физика және термодинамика пәнінің әдістері туралы кәсіби білімдерді алуға машықтану

*Негізгі қолданылатын сөздер.* МОЛЕКУЛА, МОЛЬ, АТОМДАР ЖӘНЕ МОЛЕКУЛАЛАР МАССАЛАРЫ, ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЭЛЕМЕНТ, ЗАТ МӨЛШЕРІ, АВОГАДРО ТҰРАҚТЫСЫ, ГАЗ, ИДЕАЛ ГАЗ, КҮЙ ТЕНДЕУЛЕРІ, МАКРОПАРАМЕТРЛЕР.

Материалдық денелердің молекулалық-кинетикалық үлгісі. Молекулалық физика мен термодинамиканың даму тарихына қысқаша шолу. Тепе-теңдік күйлер мен процестер физикасы. Бақыланатын макроқұбылыстар микропроцестеріндегі қайтымдылық және қайтымсыздық қатынастарының мәселелері. Молекулалық физикаға компьютерлерді қолдану.

**Пәнді оқыту мақсаты.** «Молекулалық физика» пәнін оқыту мақсаты: зерттелетін жүйелердегі процестер тек молекулалық қозғалыс және молекулалааралық әсерлесулермен анықталады. Курстың бұл бөлімін физикалық эксперименттер мен практикалық тәжірибелерді жалпылау негізінде жақсалған физикалық теория ретінде қарастыра отырып, өте көп бөлшектерден құралатын арнайы ерекшеліктері бар зерттеу кешені және молекулалық физика мен термодинамика заңдарының статистикалық сипаттарын ашу. Қазіргі заманғы ғылымның даму логикасына және физиканың тарихына сәйкес, тізбекті түрде нақты кезеңде адамзат әрекітінің әртүрлі саласындағы қолданылатын процестерге күй параметрлері мен процестер параметрлерін енгізумен қатар, оларға молекулалық-кинетикалық түсіндірмелер беру қажет. Қозғалыстың молекулалық түрі экологияда маңызды екенін көрсету және экологияның проблемалары (жылулық ластанулар, технологиялық шығарымдарды тазарту мәселелері және т.б.) Табиғаттың жалпы заңдылықтары термодинамика мен физикалық кинетика заңдарының негізінде шешілуі тиіс.

Жоғары оқу орындарына арналған жалпы физика курсында «Молекулалық физика» пәні «Механика» пәні оқылған соң, осы курстың жалғасы ретінде оқылады. «Молекулалық физика» пәніне кіреді: газдардың кинетикалық теориясы, термодинамиканың негіздері, сұйықтар мен қатты денелер физикасының негіздері, тасымалдау процестері. Зерттеу кешендері болып табылады: әртүрлі термодинамикалық жағдайлардағы газдар, сұйықтар, қатты денелер. Бұл кешендерді зерттеуге әртүрлі әдістер қолданылады: эксперимент, феноменологиялық сипаттау, молекула-кинетикалық теория, термодинамикалық әдістер, компьютерлік шартты моделдеу. Молекулалық физика – молекулалардың өзара әсерлесуімен және қозғалыстарымен анықталатын заттар қасиеттері туралы ғылым саласы. Физиканың бұл саласында келесі маңызды шамалар енгізіледі: температура, ішкі энергия, жылу, энтропия, диффузия, жылуөткізгіштік, тұтқырлық; олардың микроскоптық түсіндірмелері толығымен беріліп, яғни молекулалық деңгейде. Табиғатта көбінесе кездесетін процестерді есептеуге арналған қатынастар шығарылады.

Молекулалық физика қоршаған ортаны сақтау келелі мәселесіне тікелей қатынасы бар. Себебі, экожүйелердегі негізгі процестер импульсті, энергияны және энтропияны тасымалдау процестері молекулалық физика зерттейді. Қоршаған ортаны ластайтын технологиялық қондырғыларда осы процестер негізінен жүреді. Жылу машиналарындағы

процестерді жалпылау негізінде термодинамиканың негізгі қағидалары тұжырымдалған. Қазіргі заманғы индустрияның негізі жылу машиналары және оларды пайдалану қоршаған ортаның ластануына әкеледі. С.Карно және Р.Клаузиус көрсеткендей жылу машинасының қажетті элементі мұздатқыш болып табылады. Қазіргі заманғы жылу машиналары мұздатқыш ретінде қоршаған ортаны пайдаланады, сондықтан бұл жылулық ластанумен бірге әлемдік жылу мәселесіне әкеледі. Сондықтан ПӘК коэффициенті өте үлкен жылу машинасын жасау, қоршаған ортаға жылулық әсерін кемітеді, бұл экологияға жақсы көзқарастың белгісі.

Бұл курста қайтымды және қайтымсыз процестер енгізілумен қатар зерттеледі. Қазіргі заманғы ғылымда қайтымсыздық проблемасы ең Үлкен есептердің біріне айналды, сондықтан оны шешу үшін, молекулалық физикадағы енгізілген қатаң анықтамалар мен түсініктерді дұрыс қолдану. Ең қиыны жылу мен энтропияның қатаң анықтамаларын дұрыс қолдану. Жылу машиналарының жұмысын талдау арқылы Р. Клаузиус анықтаған және енгізген сақталмайтын шама энтропия. Қайтымсыз процестердегі энтропия туындауының сандық сипаттамасы – энтропияның өндірілуі – қайтымсыздықтың өлшемі ретінде тұйық және ашық жүйелерге қолдануға болады, себебі экожүйелер осындай жүйелерге жатады. Молекулалық физиканың негіздерін білу экологиялық, қайтымсыздық проблемаларының шешімін табуға септігін тигізеді.

Статистикалық әдістер қазіргі заманғы физикаға молекулалық физика арқылы кірді. Молекулалық физикадағы кездесетін көптеген амалдар, қазіргі заманғы физикада әдістемелік жағынан өте бағалы.

Молекулалық физика өте маңызды курс болғандықтан, бұл курсты тек көптеген әдебиеттерді оқу арқылы меңгеруге болады. Молекулалық физикада енгізілген түсініктер және физикалық шамалар, басқа курстарды меңгеруге негіз болады. Төменде машықтануға тесттермен жасалатын жаттығулар берілген.

Атомдар мен молекулалардың массалары. Құрылымдық элемент. Зат мөлшері - моль. Феноменологиялық, термодинамикалық және молекула-кинетикалық зерттеу әдістері. Статистикалық және динамикалық заңдылықтар. Зат қасиеттерінің құрылыммен, құрылымдық элементтердің өзара әсерлесу күштерімен және құрылымдық элементтердің қозғалыс сипаттарымен байланысы. Молекулалық физиканың даму кезеңдеріне қысқаша тарихи шолу. Микропроцестер қатынастарының қайтымдылық мен бақыланатын макроқұбылыстардың қайтымсыздығы проблемалары. Молекулалық физикада компьютерлерді қолдану.

Идеал газ шартты үлгісі.

Молекулалық физикадағы негізгі СИ шамалары: моль, кельвин. Молекулалық физикадағы күй параметрлері мен процестер сипаттамаларының өзгеру ерекшеліктері. Термодинамикалық шамалардың жалпыламалығы. Процестер мен күйлерге арналған қатынастар. Термодинамикалық тепе-теңдік. Қысым. Температура. Концентрация. Менделеев – Клапейрон теңдеуі. Дальтон заңы.

Идеал газдың Менделеев-Клапейрон күй теңдеуін келесі түрде жазуға болады:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad p = nkT .$$

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Молекулалық физикада қандай кешендер зерттеледі?
2. Газ молекулаларының жылулық қозғалысының сипаты қандай?
3. Молекулалық физиканың зерттейтін аумағы?
4. Молекулалық физикада қандай теориялық зерттеулер қолданылады?
5. Физикалық шама дегеніміз не?
6. Авогадро тұрақтысы неге тең  $N_A$ ?

7. Молекулалық физикада бірлік масса ретінде  $^{12}\text{C}$  изотоп атомының 1/12 массасы алынған. Бірлік масса неге тең?
8. СИ жүйесіндегі зат мөлшерін өлшейтін негізгі физикалық шама.
9. Идеал газдардың күй теңдеулері.
10. Гелий молекулаласының массасын есептеңіз.
11. Азот молекулаласының массасын есептеңіз.
12. Аргон молекулаласының массасын есептеңіз.

Ұсынылатын әдебиеттер

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
5. Термодинамика. Терминология. Вып. 85. М.: Наука, 1973.- 56с.
6. Радченко И.В. Молекулярная физика. М.: Наука, 1965.- 479 с.
7. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004. – 544 с.
8. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
9. Ә.С.Асқарова., М.С.Молдабекова Молекулалық физика: Жоғары оқу орындарына арналған оқулық.-Алматы, 2006ж,245бет.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

#### 2- ші Лекция

Тақырыбы: Термодинамикалық тепе-теңдік. Локальдық термодинамикалық тепе-теңдік. Тепе-теңдіктегі және локальдық тепе-теңдіктегі макропараметрлер. Қысым. Температура. Концентрация.

*Лекцияның мақсаты* студенттердің абсолюттік, локальдық термодинамикалық тепе-теңдіктер және тепе-теңдік және локальдық макропараметрлер туралы кәсіби білімдерді алуға машықтандыру.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ТЕПЕ-ТЕҢДІК, ИДЕАЛ ГАЗДЫҢ ІШКІ ЭНЕРГИЯСЫ, МАКРОПАРАМЕТРЛЕР.

Локальдық термодинамикалық тепе-теңдік. Тепе-теңдік және локальдық макропараметрлер. Идеал газдың ішкі энергиясы. Еркіндік дәрежелері бойынша энергияның бірқалыпты үлестірілуі заңы.

Біртекті емес жүйелерді сипаттау үшін, (жүйеде макропараметрлер кеңістікте біртектісіз үлестірілген) локальдық тепе-теңдіктегі макропараметрлерді енгізу қажет. Олар келесі пішін бойынша енгізіледі, мысалы локальдық тығыздық:

$$\rho(\bar{x}) = \lim_{\Delta V \rightarrow V^*} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

мұндағы  $\Delta m$  - газ мөлшерінің массасы.

Қоспа (ертінді, қорытпа) құрамындағы затты компонент деп атайды. Қоспаның қосылыс сандық құрамын әр түрлі тәсілдермен анықтайды. Қоспаның бірлік массасындағы немесе бірлік көлеміндегі зат компоненттерінің мөлшерін концентрация дейміз. Молекулалық физикада концентрацияның бірнеше түрлері қолданылады.

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. СИ жүйесіндегі  $\nu$  моль санының өлшемі.
2. СИ жүйесіндегі көлемнің өлшемі.
3. СИ жүйесіндегі тығыздықтың өлшемі.
4. СИ жүйесіндегі термодинамикалық температураны өлшеудің негізгі шамасы -
5. СИ жүйесіндегі термодинамикалық температураның өлшем бірлігі  $T$  ?
6. Абсолюттік температурамен  $T$  жүз градустық шкаламен  $t$  байланысы:
7. Қысым дегеніміз не?
8. Қысымның СИ жүйесіндегі өлшем бірлігі қандай?
9. Жұмыстың СИ жүйесіндегі өлшем бірлігі қандай?
10. Ішкі энергияның СИ жүйесіндегі өлшем бірлігі қандай?
11. Жылудың СИ жүйесіндегі өлшем бірлігі қандай?
12. СИ жүйесінде молярлық массаның өлшемі?
13. Универсал газ тұрақтысының СИ жүйесіндегі өлшем бірлігі қандай?
14. Локальдық тепе-теңдік тығыздық қандай қатынас арқылы енгізіледі:

Ұсынылатын әдебиеттер

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
2. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.- 544 с.
3. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
4. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
5. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

### 3- ші Лекция

Тақырыбы: Математикалық статистиканың негізгі түсініктері. Молекулалық жүйелердегі кездейсоқ шамалар мен кездейсоқ оқиғалар.

*Лекцияның мақсаты* Молекулалық жүйелердегі математикалық статистиканың және кездейсоқ шамалардың негіздері туралы кәсіби білімдерді меңгеру

*Негізгі қолданылатын сөздер.* КЕЗДЕЙСОҚ ОҚИҒАЛАР, КЕЗДЕЙСОҚ ШАМАЛАР, ЫҚТИМАЛДЫЛЫҚ, ФЛУКТУАЦИЯ, СТАТИСТИКАЛЫҚ ОРТАШАЛАР.

Кездейсоқ шамалар. Идеал газдағы жекеленген молекулалардың белгілі уақыт мезетіндегі координаттары мен жылдамдықтарын алдын-ала дәл білу мүмкін емес. Себебі олар кездейсоқ шамаларға жатады.

Кездейсоқ шамалармен байланысты заңдылықтарды ықтималдылықтар теориясы мен математикалық статистика зерттейді.

Ықтималдылық. Ғылымда және күнделікті өмірде көптеген әралуан кездейсоқ оқиғалар зерттелініп, жалпы нәтиже келесі түрде тұжырымдалады: оқиға болды немесе болмады. Кездейсоқ оқиғаларды болжайтын теорияның мақсаты осы мүмкіндіктердің сандық сипаттамаларын табу.

Ықтималдылықты жиіліктік анықтамасы. Идеал газ алатын көлемді екі тең бөлікке бөлеміз. Біз бөлшектерді бір-бірінен ажырата аламыз және жеке бөлшектердің орын ауыстыруын бақыланатын жүйеге және бөлшектің қозғалысына әсер тудырмай бақылайтын дәрежеге жеттік деп санайық. Бұл жағдайда жүйе өзгермейтін сыртқы ортада болады деп болжайық.

Зерттелетін бөлшек екі көлем бөлігінің бірінде болатын оқиғаны қарастырайық. Бұл жағдайда бақылау нәтижесі келесі тұжырымдарға әкеледі: оқиға болды, яғни бөлшек көлемнің сол бөлігінде немесе бөлшек ол көлемде жоқ, яғни оқиға болған жоқ. Белгілеулер:  $N$  — жалпы бақылау саны;  $N_A$  — оқиға болған тәжірибелер саны, яғни бөлшек қарастырылатын көлемде;  $A$  — оқиға. Болатын оқиғаның ықтималдылығы  $A$  В.1 формуласымен анықталады.

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_A}{N}.$$

Өзгеріссіз сыртқы жағдайларда ( $N \rightarrow \infty$ ) өте үлкен тәжірибе саны. Бір жүйемен тәжірибелерді өзгеріссіз жағдайларда өткізудің орнына, бірдей өте көп жүйелермен дербес тәжірибе жүргізуге болады. Бірдей өте көп жүйелерді ансамбль деп атаймыз. Сол себебі В.1 формуласындағы  $N_A$  саны бөлшектің белгіленген көлемде болуы ансамбльдегі жүйелер саны болады, ал  $N$  — ансамбльдегі жалпы жүйелер саны. Бұл екі әдіс өзара эквивалентті, бірақ нақты жағдайларда олардың біреуі екіншісіне қарағанда ыңғайлы болуы мүмкін.

Егер өте үлкен тәжірибе жүргізетін болсақ, В.1 формуласы бойынша ықтималдылықтарды есептеу қарапайым математикалық амал. Бірақ осы формуланың көмегімен белгілі-бір оқиғаның болу ықтималдылығын теориялық есептеу күрделі, себебі осы оқиға болатын  $N_A$  тәжірибе санын алдын-ала болжау түсініксіз.

Осындай есептерді қарастырғанда көп жағдайларда комбинаторика көмектеседі. Оның көмегімен кейбір оқиғаның болуына әсер ететін факторларды есептеуге болады. Бұл жағдайда тең мүмкіндіктегі оқиғалар туралы сезімталдық түсініктер, ал олардың математикалық сипаттамасы ретінде пайда болу жиілігі  $N_A$  В.1 формуласындағы және ықтималдылықты анықтауға болады. Бұл әдіс көптеген жағдайларда қолданылады.

Ойша екі тең бөлікке бөлінген көлемдегі бөлшектердің қозғалысының бөліктердің тек бірінде болуын қамтамасыз ететін физикалық факторлар жоқ. Екі бөліктің әрбіреуінде бөлшектердің болуы тең мүмкіндікте. Сондықтан бақылаулар саны  $N$  өте көп болса, яғни  $N_A = N/2$ , а  $\&(A) = 1/2$ . Осындай болжауларды тиындарды лақтыруларда т.б. қолдануға болады.

Барлық жағдайларда тәжірибелердің тең мүмкіндіктегі нәтижелерді анықтау әкеледі. В.1 формуласымен ықтималдылықтарды комбинаторика әдістерімен есептеу келесі жағдайларда жүргізіледі: егер тәжірибе  $N$  тең мүмкіндіктегі жүргізілетін болса, яғни  $N$

мүмкіндіктерден  $N_A$  рет А оқиғалары түссе ықтималдылық В.1 формуласымен беріледі. Мысалы алты қырлы сүйекті лақтыру кезінде, егер оның қырлары 1, 2, 3, 4, 5, 6 сандары арқылы белгіленген болса, сүйекті N лақтырғанда осы сандардың кез-келгені түсуі мүмкін. 1 саны N/6 түсуі мүмкін.

Бұл тәжірибелерде жеке сүйек статистикалық жүйе, ал ансамбль N бірдей сүйектер болады. Ықтималдылықтар тығыздығы. Егер оқиға үздіксіз өзгеретін шамалармен сипатталынатын болса, В.1 формуласымен ықтималдылықты анықтауға болмайды. Мысалы бөлшектің жылдамдығы 10 м/с болу ықтималдылығын есептеу мүмкін емес, себебі жылдамдық үздіксіз шама.

Көптеген оқиғаларды бұл жағдайларда есептеу мүмкін емес, ал оларды ықтималдылық арқылы сипаттау тек ықтималдылық тығыздығымен жүргізіледі. Сыртқы жағдайлар өзгермейтін тұйық ыдысты алайық, ал молекулалар ретсіз қозғалыста, яғни бұл жағдайда ыдыстың барлық бөлігі молекулалар үшін тең мүмкіндікте емес. Мысалы ауырлық өрістегі ыдыста молекулалар үшін, ықтимал жағдай ыдыстың төменгі жағы, бірақ молекулалар ыдыстың барлық бөлігінде орналасады. Егер белгілі әдіспен молекулалардың ішінен таңдалып алынған молекуланың кеңістіктегі орынын басқа молекулалардың қозғалысын және орынын өзгертпей анықтайтын болсақ. Әртүрлі бақылауларда молекула әртүрлі нүктелерде болады. Барлық кеңістікті кішкентай көлемдерге бөлсек  $\Delta V_t$ . Осындай көлемдер шексіз ( $i = 1, 2, \dots$ ). Бақылау санын N деп белгілесек. Яғни, әрбір бақылауда молекула  $\Delta V_t$  көлемдерінің бірінде болады.

Броундық қозғалыс. Оқиғаның пайда болу ықтималдылығы. Ықтималдылықтарды қосу мен көбейту. Статистикалық орташалар. Дискреттік және үздіксіз кездейсоқ шамалардың орташа мәндері. Эргодикалық гипотеза. Флуктуация. Кездейсоқ шамалардың өзара байланысы. Биномиальдық үлестірім. Пуассон үлестірімі. Гаусс үлестірімі. Макрокүй және микрокүй. Термодинамикалық ықтималдылық.

#### Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Ықтималдылық дегеніміз не ?
2. Тәуелсіз оқиғалардың бірге болу ықтималдылығы:
3. Дискреттік кездейсоқ шаманың орташа мәні
4. Үздіксіз өзгеретін кездейсоқ шаманың  $x$  орташа мәні.
5. Гаусс үлестірімінің қалыпты заңы  $\sigma$  орташа квадраттық ауытқу арқылы жазылуы?
6. Флуктуация дегеніміз не?
7. Флуктуацияның салыстырмалы маңызы . . .
8. Эргодикалық болжау нені тұжырымдайды?

#### Ұсынылатын әдебиеттер

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
2. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
4. Ә.С.Асқарова., М.С.Молдабекова Молекулалық физика: Жоғары оқу орындарына арналған оқулық.-Алматы, 2006ж,245бет.

## «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Заитович

### 4-ші Лекция

Тақырыбы: Газдардың кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі. Молекулалар жылдамдықтарының Максвеллдік үлестірімі.

*Лекцияның мақсаты* студенттердің газдардың кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі мен жылдамдықтар бойынша молекулалардың максвеллдік үлестірімі туралы кәсіби білімдерді алып оларға машықтану.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* МОЛЕКУЛА, ХАОСТЫҚ ҚОЗҒАЛЫС, МОЛЕКУЛАЛАР ЖЫЛДАМДЫҒЫ, ИМПУЛЬС, ҚЫСЫМ, ДАЛЬТОН ЗАҢЫ, ГАЗДАРДЫҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ТЕОРИЯСЫ, БОЛЬЦМАН ТҰРАҚТЫСЫ, ЭНЕРГИЯНЫҢ ЕРКІНДІК ДӘРЕЖЕЛЕРІ БОЙЫНША ҮЛЕСТІРІЛУІ.

Газдардың кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі. Абсолютті термодинамикалық тепе-теңдіктек жағдайындағы максвеллдік үлестірім. Газдардағы молекулалардың сипаттамалық жылдамдықтары. Локальдық – тепе-теңдік функция. Ауырлық өрісіндегі газ. Больцман үлестірімі. Максвелл-Больцман үлестірімі. Теріс температуралар.

Газдардың кинетикалық теориясының негізгі формуласы Менделеев-Клапейрон теңдеуіне кіретін термодинамикалық температураны идеал газ молекулаларының хаосты қозғалысының орташа кинетикалық энергиямен байланыстырады. Қазіргі заманғы физикада үлестірім функциясын нормировкалау арқылы бақыланатын құбылыстарды статистикалық тұжырымдау.

Негізгі теңдеу молекулалардың үлестірім функцияларында Менделеев-Клапейрон теңдеуіне кіретін температураны қолдануға мүмкіндік береді (термодинамикалық температураны). Себебі қысымның туындауы қабырғаға берілетін молекулалардың импульстері немесе жылулық хаосты қозғалыстағы массалары бар молекулалардың элементар беттен өтетін ағысты тудыруы. Осы тұжырымдауды статистикалық ансамбльдерде қолдану үшін, ансамбльдердегі жүйелерді белгілейтін нүктелер нақты молекулалар сияқты қабырғаға импульс береді немесе импульстер ағысын тудырады деп санаймыз. Бірінші осыны Гибсс жасамақшы болды. Газдардағы молекулалар мен кескіндеуші нүктелер өзара толық механикалық эквивалентті екенін дәлелдеу керек. Сонда ғана абсолюттік температураны статистикалық үлестірім функциясына енгізу негізделген болып саналады. Фазалық кеңістіктегі кескіндеуші нүктелердің ерекшелігі ансамбльдегі барлық жүйелердің гамильтонианы тұрақты (бірдей) . Бұл талап молекулалар үшін орындалмайды, соқтығысу кезінде әрбір молекуланың энергиясы өзгереді.

Бұл қарастырулар газдардың идеал күйден ауытқу кезіндегі енгізілетін түзетулер кластерлік құрамның эволюциясының әсерінен қысым, температура және қоспа құрамының өзгеруі моль санының айнаымалылығына әкеледі.

Кинетикалық теорияның негізгі теңдеуін қорыту идеал газдың шартты үлгісіне негізделген, себебі тепе-теңдік жағдайында молекулалар үздіксіз хаосты жылулық қозғалысқа қатысады, ал газды шектейтін қабырғаға түсірілетін қысым осы қабырғамен соқтығысатын молекулалар импульсінің өзгерісімен анықталады. Енді нақты газдардың кейбір ерекшеліктерін ескеру үшін, молекулаларды өзара сирек соқтығысатын кішкентай

шариктер ретінде модельдеуге болады. Мұндай газды Больцман газы деп атайды. Бұл шартты үлгінің артықшылығы бір жағынан үлгі идеал газдың күй теңдеуіне бағынады, ал екінші жағынан максвелл функциясымен сипатталынатын молекулалардың өзара соқтығысуы молекулалар жылдамдығының тепе-теңдік үлестіріміне әкеледі. Идеал газ шартты үлгісінде молекулалар түрінде, ал Больцман газында молекулалардың өлшемдерін ескеру арқылы жылдамдықтардың тепе-теңдік үлестірімінің негізгі себебі. Молекулалар үлестірімінің хаустық сипаты, жылдамдықтың белгілі-бір бағытының және өлшемінің жоқтығы бірінші кезеңде барлық молекулалар модуль бойынша тең жылдамдықтармен қозғалады деуге болады. Орташалау арқылы табылған барлық молекулалар жылдамдығының мәні, орташа жылдамдыққа тең, ал бұл орташаланған мән соңғы формулаларға қойылады.

Тепе-теңдік жағдайындағы қысым күшпен анықталатын күй параметрі ретінде қабылданады. Бұл күшті бірлік уақытта қабырғамен соқтығысқан және қабырғаға импульс берген молекулалардың санын есептеу арқылы табамыз. Алынған нәтижені локальдық тепе-теңдік жағдайына қолдану үшін,  $dS_x$  элементар беттің ауданшасы мен оған жататын  $v_x dt dS_x$  көлемдерді қарастырамыз.  $Ox$  өсін газға сырттай нормаль бойынша  $dS_x$  ауданшасына бағытталған. Белгілі уақыт мезеті  $dt$  уақытында  $v_x dt dS_x$  көлеміндегі және қабырғаға қарай қозғалған ( $v_x > 0$ ) молекулалар басқа молекулалармен соқтығыспай ұшып жетуі.

Бір молекуланың  $ox$  осі бойымен қабырғамен соқтығысуға дейінгі импульсінің құраушысының түрі:

$$1. K_{ix} = m_i v_x$$

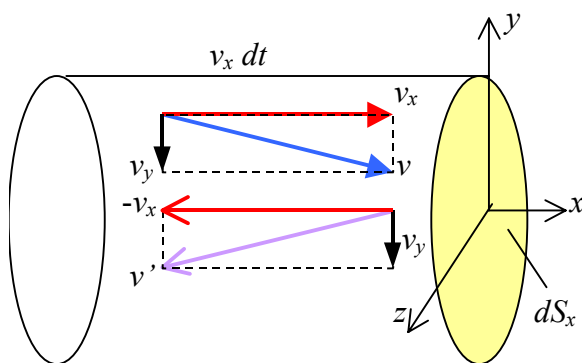
мұндағы  $K_{ix}$  - бір молекула импульсінің  $x$  - құраушысы,

$m_i$  - бір молекуланың массасы,

$v_x$  - молекула жылдамдығының  $x$  - құраушысы.

Молекуланың қабырғамен серпімді соқтығысқаннан кейінгі импульсінің  $x$ -құраушысы тек белгісін ғана өзгертеді, сондықтан импульстің  $x$ -құраушысының өзгерісі келесі түрде беріледі:

$$\Delta K_{ix} = -m_i v_x - m_i v_x = -2m_i v_x$$



Сурет.1.

Молекуланың  $dS_x$  ауданшамен соқтығысу сұлбасы  $v$  - молекуланың соқтығысуға дейінгі жылдамдығы,  $v'$  - молекуланың соқтығысқаннан кейінгі жылдамдығы,  $v_x$  - молекула жылдамдығының  $x$  - құраушысы,  $v_y$  - молекула жылдамдығының  $y$  - құраушысы



2. Элементар көлемде  $v_x dt dS_x$ , келесі  $n v_x dt dS_x$ , молекулалар бар, олардың жартысы жылдамдықтың  $x$  – құраушысы немесе қабырғаға қарай бағытталған. Таңдалынған молекулалардың әрқайсысы  $dt$  уақыт аралығында қабырғамен соқтығысады, сондықтан олардың  $dt$  уақыт аралығындағы импульсінің өзгерісі тең:

$$3. dK_x = -2m_i v_x (n/2) v_x dt dS = -n m_i v_x v_x dt dS_x$$

Белгіленген элементар көлемдегі  $n v_x dt dS_x$  молекулалардан құралған жүйе және  $dS_x$  қабырға ауданшасының аумағы тұйықталған механикалық жүйе болып табылады, сол себепті  $dK_{xW}$  ауданшасының импульсінің өзгеруінен молекулалардың қабырғамен соқтығысу кезіндегі импульсті алып тастаймыз  $dK_{xW} = -dK_x$

Ауданша импульсінің уақыт бойынша туындысы, осы элементар ауданшаға әсер ететін күшке тең:

$$dK_{xW} / dt = F_x$$

Біз  $ox$  осі бойынша  $dS_x$  ауданшасына әсер ететін күшті қарастырамыз, сондықтан күшті ауданша өлшеміне бөлу арқылы қысым тензорының құраушыларын аламыз:

$$p_{xx} = F_x / dS_x$$

Барлық табылған шамаларды  $p_{xx}$  өрнегіне қою арқылы келесі өрнекті аламыз:

$$p_{xx} = dK_{xW} / dt = n m_i v_x v_x dt dS_x / (dt dS_x) = n m_i v_x v_x .$$

Тепе-теңдік жағдайындағы Паскаль заңы біздің белгілеулермен келесі түрде жазылады:

$$p_{xx} = p_{yy} = p_{zz} ,$$

мұндағы  $p_{yy}$  ,  $p_{zz}$  – қысым тензорының компоненттері, егер жылдамдық векторының сәйкес құраушылары ретінде қарастырсақ  $p_{xx}$  .

Сонымен Паскальдың тәжірибелік заңы және тепе-теңдік жағдайда кинетикалық теорияда алынған қысым тензорының компоненттеріне арналған заңдылық:

$$n m_i v_x v_x = n m_i v_y v_y = n m_i v_z v_z ,$$

немесе,

$$v_x v_x = v_y v_y = v_z v_z ,$$

мұндағы молекулалардың жылдамдықтары мен олардың құраушылары орташа мәндері қарастырылады.

Осы заңдылықтан еркіндік дәрежелеріне сәйкес энергияның тең үлестірім іргелі заңы туындайды, яғни әрбір еркіндік жәрежесіне сай орташа кинетикалық энергия бірдей:

$$m_i v_x^2 / 2 = m_i v_y^2 / 2 = m_i v_z^2 / 2 ,$$

Жылдамдықтар квадратын құраушылар арқылы өрнектесек,

$$v^2 = v_x v_x + v_y v_y + v_z v_z , ,$$

аламыз:

$$v_x v_x = v_y v_y = v_z v_z = 1/3 v^2 .$$

Егер орташаларға кәдімгі бұрыштық жақшаларды қолдану арқылы қатынастарды келесі түрде жазуға болады:

$$\langle v_x v_x \rangle = 1/3 \langle v^2 \rangle .$$

Тепе-теңдік жағдайында жанама кернеуліктер жоқ сондықтан манометр статикалық қысымды  $p$  өлшеуге болады өлшемі бойынша (сан мәні бойынша) қысым тензорының компоненттерімен сәйкес келеді  $p_{xx}$  яғни статикалық қысымды газдардағы жылулық қозғалыстың орташа энергиясы арқылы өрнектеуге болады:

$$p = 1/3 n m_i \langle v^2 \rangle = 2/3 n \langle m_i v^2 / 2 \rangle = 2/3 n \langle \epsilon_i \rangle .$$

Сонымен, қысымның молекулалардың хаосты жылулық қозғалысының орташа энергиясымен байланысы қабырғамен молекулалардың соқтығысуы таза механикалық қарастырулардың негізінде алынған. Алынған формуланы қысымға арналған газдардың кинетикалық теориясының негізгі формуласы деп аталады, себебі механикадағы анықталған

шамалар термодинамикада енгізілген температурамен байланыстырады. Клапейрон-Менделеев күй теңдеуін

$$pV = m/MRT$$

келесі түрге келтіреміз

$$p = m/(MV)RT = m/(m_i N_A V)RT = RT m/(m_i N_A V) = nkT .$$

$$p = nkT .$$

Кинетикалық теорияда алынған қысымға арналған формуланы келесі түрде жазамыз:

$$p = 2/3 n \langle \varepsilon_i \rangle .$$

Соңғы өрнектердің сол жақтары өзара тең, сондықтан оң жақтарын теңестіру арқылы аламыз:

$$2/3 n \langle \varepsilon_i \rangle = nkT .$$

Осы өрнектен молекулалардың жылулық қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы температура арқылы келесі түрде сипатталады:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = 3/2 kT .$$

Бір молекуланың хаосты қозғалысының орташа энергиясы  $\langle \varepsilon_i \rangle$  бірдей үш құраушылардың қосындысына тең, ал бір еркіндік дәрежесіне  $1/2 kT$  энергия сәйкес келеді. Ал, екінші жағынан алынған қатынасты келесі түрде жазуға болады:

$$\langle m_i v^2 / 2 \rangle = 3/2 kT .$$

Соңғы формуладан газ молекулалардың жылулық қозғалысының температураға тәуелділігі:

$$T = 2/3 \langle m_i v^2 / 2 \rangle / k .$$

Бұл формуланы бір молекуланың ілгерілемелі қозғалысының орташа энергиясы арқылы келесі түрде жазуға болады:

$$T = 2/3 \langle \varepsilon_i \rangle / k .$$

Пропорциональдық коэффициент ретінде  $k$  Больцман тұрақтысы қолданылады. Тұрақтының өлшем бірлігі СИ жүйесінде Дж/К.

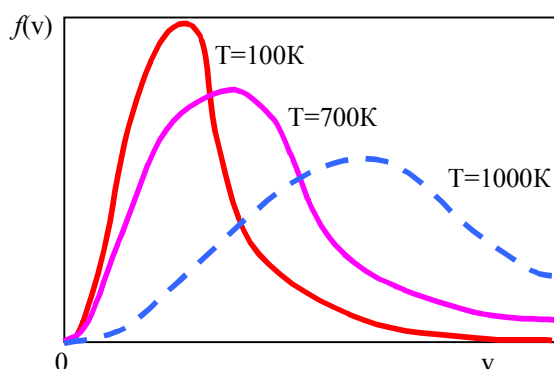
Алынған қатынастарды  $i$  еркіндік дәрежелері бар бөлшектерге жалпылауға болады және осындай бөлшектердің орташа энергияларын есептеу әдістерін алуға болады. Бір моль бөлшектің орташа энергиясын анықтау үшін,  $i$  еркіндік дәрежелері бар бір бөлшектің орташа энергиясын Авагадро санына көбейтеміз:

$$U = i/2 RT .$$

Статистикалық физикада энергияны орташалаудың әдістері толықтанып орташа энергия мен температураның арасындағы қатынастар енгізілетін ықтималдылық тығыздығын нормировкалау (молекулалық физикада – молекулалардың жылдамдықтар бойынша үлестірім функциясы).

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Серпімді емес соқтығысулардағы екі молекуланың кинетикалық энергияларының қосындысы қалай өзгереді?
2. Температура өскендегі молекулалардың жылдамдығы қалай өзгереді?
3. Изотермдік жағдайда қысым өскендегі молекулалар жылдамдығы қалай өзгереді?
4. Жылдамдықтар бойынша молекулалардың Максвеллдік үлестірім функциясы
5. Қай суретте әртүрлі температурадағы Максвеллдік функцияның графигі дұрыс?



6. Максвелл функциясы қандай нормировкаға бағынады?
7. Егер максвеллдік функция  $f(v)$  бірге нормаланған болса, штрихтелген аймақтың мағынасы неде?
8. Максвеллдік функция арифметикалық орташа жылдамдық үшін қандай формуланы береді . . .
9. Молярлық массасы  $M$  тепе-теңдіктегі газ молекулаларының орташа квадраттық жылдамдығы неге тең?
10. Ең ықтимал жылдамдық – қандай жылдамдық ...
11. Газ молекулаларының сипаттама орташа жылдамдықтары қандай қатынаста?
12. Оттегі молекуласының  $27^\circ\text{C}$  температурадағы орташа арифметикалық жылдамдығы неге тең?
13. Азот молекуласының  $27^\circ\text{C}$  температурадағы орташа арифметикалық жылдамдығы неге тең?
14. Идеал газ молекулаларының орташа энергиясы:
15. Газдардың кинетикалық теориясының негізгі формуласы тығыздық арқылы өрнектелуі:
16. Идеал газдар үшін кинетикалық теорияның теңдеулері
17. Температура үшін, кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі.
18.  $i$  - еркіндік дәрежелері бар газ молекулаларының орташа энергиясы .
19. Қатты байланыстағы екі атомды молекулалардың  $i$  еркіндік дәрежелер саны неге тең?

#### Ұсынылатын әдебиеттер

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
3. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
8. Ә.С.Асқарова., М.С.Молдабекова Молекулалық физика: Жоғары оқу орындарына арналған оқулық.-Алматы, 2006ж,245бет.

#### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

## 5-ші Лекция

Тақырып: Термодинамиканың алғашқы бастамасы. Термодинамиканың бірінші бастамасы және оның физикалық мазмұны.

Лекцияның мақсаты студенттердің термодинамиканың алғашқы және бірінші бастамалары туралы кәсіби білім мен білікті меңгеру.

Негізгі қолданылатын сөздер. ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ АЛҒАШҚЫ БАСТАМАСЫ. ТЕМПЕРАТУРА, ЖҰМЫС, ІШКІ ЭНЕРГИЯ, ЖЫЛУ, ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ БІРІНШІ БАСТАМАСЫ, ЖЫЛУСИЫМДЫЛЫҚ.

Термодинамиканың зерттеу кешені. Термодинамиканың құрылымы. Күй функциялары. Термодинамиканың алғашқы бастамасы. Температура. Термодинамиканың бірінші бастамасы және оның физикалық мазмұны. Ішкі энергия. Термодинамикадағы жұмыс - ішкі энергияның өзгеріс түрі. Жылу ішкі энергияның жылулық түрі.

Бір моль газ үшін термодинамиканың бірінші бастамасы:

$$\delta Q = dU + pdV.$$

Жылу сыйымдылық анықталады

$$C = \frac{\delta Q}{\partial T}.$$

Молярлық жылу сыйымдылық  $C$  және меншікті жылу сыйымдылық келесі қатынаспен байланысқан:

$$C = cM,$$

Мұндағы  $M$  - молярлық масса.

Молекулалардың жылулық қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы температура арқылы байланысқан түрі:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = 3/2kT.$$

Бір моль бөлшектердің ішкі энергиясын анықтау үшін,  $i$  еркіндік дәрежелері бар бір бөлшектің орташа энергиясын Авагадро тұрақтысына көбейтеміз:

$$U = i/2RT.$$

Идеал газдың молярлық жылу сыйымдылығы молекулалардың  $i$  еркіндік дәрежелері санымен анықталады.

Көлем тұрақты болғанда  $V = const$  изохорлық жылу сыйымдылық енгізіледі:

$$C_V = \left( \frac{\delta Q}{\partial T} \right)_V = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_V. \quad C_V = \frac{i}{2} R$$

Қысым тұрақты болғанда  $p = const$  изобарлық жылу сыйымдылық енгізіледі (яғни молярлық жылу сыйымдылық):

$$C_p = \left( \frac{\delta Q}{\partial T} \right)_p, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R.$$

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Температура дегеніміз не?
2. Термодинамиканың алғашқы бастамасын тұжырымдаңыз?
3. Термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясы дегеніміз не?
4. Жылу дегеніміз не?
5. Термодинамикадағы жұмыс дегеніміз не?

6. Термодинамиканың бірінші бастамасы келесі түрде:  $dU = \delta Q - \delta A$  не туралы ...
7. Неліктен  $\delta Q$  жылу мөлшері толық дифференциал емес?
8. Неліктен  $\delta A$  элементар жұмыс толық дифференциал емес?
9. Неліктен  $dU$  толық дифференциал емес?
10. Неліктен белгілі-бір денеде қанша жылу бар екенін анықтауға болмайды?
11. Неліктен жүйеде қанша жұмыс бар екенін анықтауға болмайды?
12. Қайтымды процестердегі күй функцияларының өсімшесін қалай табуға болады?
13. Қайтымсыз процестердегі күй функцияларының өсімшесін қалай табуға болады?
14. Молярлық жылу сиымдылықтың өлшем бірлігі қандай?
15. СИ жүйесінде меншікті жылу сиымдылықтың өлшем бірлігі қандай?
16. Тұрақты көлемдегі гелийдің (He) молярлық жылу сиымдылығы неге тең?
17. Тұрақты көлемдегі газ күйдегі аргонның (Ar) меншікті жылу сиымдылығы неге тең?
18. Гелийдің (He) молярлық жылу сиымдылықтарының қатынасы неге тең?
19. Оттегінің ( $O_2$ ) молярлық жылу сиымдылықтарының қатынасы неге тең?
20. Тұрақты көлемдегі 3 моль аргонды (Ar) 10 К қыздыруға керекті жылу мөлшері неге тең?

Ұсынылатын әдебиеттер

5. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
6. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
8. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. Доцент Айтқожаев Абдуает Заитович

#### 6 - шы Лекция

Тақырыбы: Идеал газдардағы процестер.

Лекцияның мақсаты идеал газдардағы процестер туралы кәсіби білімдерді меңгеру.

Негізгі қолданылатын сөздер. ТЕРМОДИНАМИКА, ТЕМПЕРАТУРА, ЖҰМЫС, ІШКІ ЭНЕРГИЯ, ЖЫЛУ, ИЗОТЕРМДІК ПРОЦЕСС, АДИАБАТТЫҚ ПРОЦЕСС, ПОЛИТРОПТЫҚ ПРОЦЕСС, ЖЫЛУСИЫМДЫЛЫҚ.

Идеал газдардағы процестер. Қайтымды және қайтымсыз процестер. Нақты процестердің қайтымсыздығы мен механика заңдарының қайтымдылығы. Молекулалық физика мен термодинамикадағы қайтымсыздық проблемасы. Идеал газдардағы изопараметрлік процестерге термодинамиканың бірінші бастамасын қолдану.

Изотермдік процесс:

$$T = const, \quad pV = const.$$

Жұмыс:

$$A = \int_1^2 p dV = \int_1^2 RT \frac{1}{V} dV = RT \int_1^2 \frac{dV}{V} = RT(\ln V_2 - \ln V_1) = RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Адиабаталық процесс

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

$$\delta Q = 0$$

$$C_V dT + p dV = 0$$

$$C_V \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dV = 0$$

Идеал газ үшін (бір моль қарастырылады)

$$T = \frac{pV}{R} = \frac{pV}{C_p - C_V}$$

$$\frac{dT}{T} + \left( \frac{C_p}{C_V} - 1 \right) \frac{dV}{V} = 0$$

$$\int \frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \int \frac{dV}{V} = 0$$

$C_p / C_V = \gamma$  - адиабата көрсеткіші

$$\ln T + \ln V^{(\gamma-1)} = \text{const}$$

$$\ln(T V^{(\gamma-1)}) = \text{const}$$

$$T V^{(\gamma-1)} = \text{const}$$

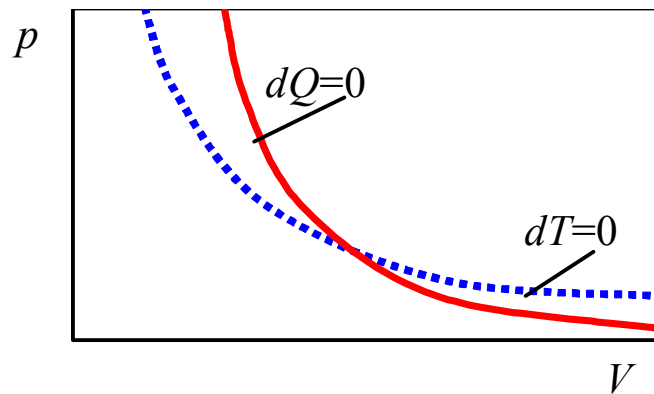
$$p V^\gamma = \text{const}$$

Адиабаттық процестегі жұмыс:

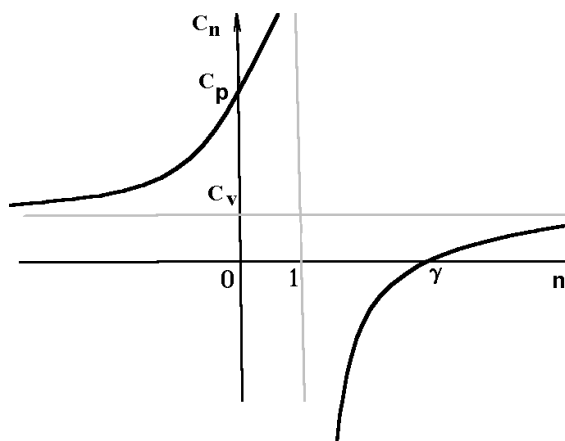
$$A = \int_1^2 p dV = p_1 V_1^\gamma \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} = \frac{p_1 V_1^\gamma}{1-\gamma} (V_2^{-\gamma+1} - V_1^{-\gamma+1})$$

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

$$A = \frac{R}{\gamma-1} (T_1 - T_2).$$



Адиабата және изотерманы салыстыру.



### Политроптық процестегі жылусиымдылық

Политроптық процесс – тұрақты жылусиымдылық кезіндегі процесс:  $C = \text{const}$ .

#### Политропа теңдеуі.

Термодинамиканың бірінші бастамасы:

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

Бір моль идеал газ үшін, термодинамиканың бірінші бастамасы молярлық политроптық жылусиымдылық  $C$  арқылы жазылады:

$$C dT = C_V dT + p dV$$

Бұл теңдеуді түрлендіреміз:

$$(C - C_V) R dT = R p dV$$

$$R dT = p dV + V d p$$

$$(C - C_V) (p dV + V d p) = R p dV$$

$$(C - C_V - R) p dV + (C - C_V) V d p = 0$$

$$(C - C_V - C_p + C_V) p dV + (C - C_V) V d p = 0$$

$$(C - C_p) p dV + (C - C_V) V d p = 0$$

$$(C - C_p) / (C - C_V) p dV + V d p = 0$$

Политроптық көрсеткішті енгіземіз:

$$n = (C - C_p) / (C - C_V)$$

Тұрақты политропа көрсеткіші арқылы  $p$  және  $V$  айнымалыларына арналған дифференциальдық теңдеу келесі түрде жазылады:

$$n dV / V + d p / p = 0$$

Егер теңдеуді интегралдау арқылы:

$$n \ln V + \ln p = \text{const}$$

$$\ln(p V^n) = \text{const}$$

Бұл өрнекті потенциалға арқылы  $p$ ,  $V$  айнымалыларына арналған политропа теңдеуін аламыз:

$$p V^n = \text{const}$$

Бұл теңдеу идеал газдың адиабаттық теңдеуінен айырмашылығы, адиабаттық көрсеткіштің орнына политроптық көрсеткіш қойылған. Яғни, адиабата және басқа изопараметрлік процестер политропаның дербес жағдайы болып табылады. Күй теңдеуін пайдаланып басқа айнымалыларға көшуге болады. Политропа теңдеуіндегі  $T$ ,  $V$  айнымалыларын қысымның орнына келесі қатысты қою арқылы алуға болады:

$$p = RT/V$$

Политропаның теңдеуіне қойсақ:

$$T V^{n-1} = \text{const}$$

Политропа көрсеткішінің өрнегінен политроптық процестің жылусиымдылығының формуласын аламыз:

$$C = (n C_V - C_p) / (n - 1)$$

Политроптық процестегі жұмысты адиабаттық процестегі жұмыстың өрнегіне политропа көрсеткішін қою арқылы алуға болады:

$$A = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]; \quad A = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2).$$

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

- 1 Термодинамикадағы процесс дегеніміз не?
- 2 Термодинамикалық цикл дегеніміз не? Изохорлық процесті сипаттаңыз.
- 3 Изобарлық процесс.
- 4 Изотермдік процесс.
- 5 Адиабаттық процесс.
- 6 Политроптық процесс.
- 7 Гелийдің (He) молярлық жылусиымдылықтарының қатынасы неге тең?
- 8 Оттегі (O<sub>2</sub>) молярлық жылусиымдылықтарының қатынасы неге тең?
- 9 Тұрақты көлемдегі 3 моль аргонды (Ar) 10 К –ге қыздыру үшін қанша жылу керек?
10. Изотермдік процестегі ішкі энергияның өзгерісі . . .
- 11 Адиабаталық процестегі жүйенің алатын жылу мөлшері
- 12 Екі атомды қатты молекуладан тұратын бір моль идеал газдың температурасы  $T_1=300\text{K}$  нен  $T_2=400\text{K}$  өзгергендегі ішкі энергиясының өсімшесі неге тең?
- 13 Үш атомды қатты молекуладан тұратын бір моль идеал газдың температурасы  $T_1=400\text{K}$  нен  $T_2=500\text{K}$  өзгергендегі ішкі энергиясының өсімшесі неге тең?

Ұсынылатын әдебиеттер

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
2. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
3. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
4. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
5. Термодинамика. Терминология. Вып. 85. М.: Наука, 1973.- 56с.
6. Радченко И.В. Молекулярная физика. М.: Наука, 1965.- 479 с.
7. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544с.
8. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
9. Штрауф Е.А. Курс физики. Для высш. техн. учеб. заведений. Т. 1.- Физические основы механики, термодинамики и молекулярная физика. Л.: Судпромиздат, 1960.- 484 с.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. Доцент Айтқожаев Абдуает Заитович

#### 7- ші Лекция

Тақырып: Циклдік процестер. Карно циклі.



*Лекцияның мақсаты* студенттерді идеал газдардағы циклдық процестер, Карно циклі, Энтропия және термодинамиканың екінші бастамасы туралы кәсіби білімдерді меңгеруге үйрету.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ТЕРМОДИНАМИКА, ТЕМПЕРАТУРА, ЖҰМЫС, ШКІ ЭНЕРГИЯ, ЖЫЛУ, ИЗОТЕРМДІК ПРОЦЕСС, АДИАБАТАЛЫҚ ПРОЦЕСС, ПОЛИТРОПТЫҚ ПРОЦЕСС, КАРНО ЦИКЛІНІҢ ЖЫЛУСИЫМДЫЛЫҒЫ, ЭНТРОПИЯ, ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ ЕКІНШІ БАСТАМАСЫ, ПӘК.

Циклдық процестер. Карно циклі. Карно циклінің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК). Карно теоремасы. Клаузиус теңсіздігі. Энтропия. Термодинамиканың екінші бастамасы.

Қайтымды және қайтымсыз циклға арналған жылу машинасының пайдалы әсер коэффициентін жалпы анықталуы:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

мұндағы  $Q_1$  - жылу бергіштен  $T_1$  температурадағы алынған жылу мөлшерінің модулі,

мұндағы  $Q_2$  - жылу қабылдағышқа  $T_2$  температурадағы берілген жылу мөлшерінің модулі.

Карно теоремасына сәйкес қайтымды Карно циклінің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) тек қыздырғыштың температурасымен анықталады,

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Егер қайтымсыз циклдің ПӘК – ін қайтымды цикл ПӘК –мен салыстыру арқылы:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

Мұнда сол жақта қайтымды циклға арналған өрнек (бұл жағдайда теңдік белгісі), ал қайтымсыз циклға (бұл жағдайда теңсіздік белгісі).

Соңғы өрнекті түрлендіруге болады:

$$1 - \frac{Q_2}{Q_1} \leq 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

Теңсіздіктің екі жағына  $\frac{T_2}{T_1} - 1$  шамасын қосу арқылы келесі өрнекті аламыз:

$$-\frac{Q_2}{Q_1} + \frac{T_2}{T_1} \leq 0.$$

Теңсіздікті оң шамаға көбейтсек,

$$\frac{Q_1}{T_2} \left(-\frac{Q_2}{Q_1} + \frac{T_2}{T_1}\right) \leq 0,$$

аламыз:

$$-\frac{Q_2 Q_1}{Q_1 T_2} + \frac{T_2 Q_1}{T_1 T_2} \leq 0$$

$$-\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} \leq 0.$$

Жоғарыдағы өрнектегі  $Q_2$  мұздатқышқа берілген жылу мөлшері, ал мұздатқыштан алынған жылу мөлшері минус  $Q_2$  белгіленіп, циклдағы жұмыстық дене алған жылу мөлшерін ескеріп келесі түрде жазамыз:

$$\frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_1}{T_1} \leq 0.$$

Бұл өрнек Клаузиус теңсіздігі: қайтымды циклдағы келтірілген жылу мөлшерлерінің қосындысы нөлге тең, ал қайтымсыз циклда нөлден кіші болады. Теңсіздік циклда екі термостат болған жағдай үшін алынған. Күрделі циклдарды көптеген қарапайым циклдарға бөліп, Клаузиус теңсіздігін келесі түрде жалпылауға болады:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} + \dots \leq 0.$$

Егер циклды өте кішкентай жылу мөлшерлерін  $\delta Q$  берілетін және алатын элементар циклдарға бөлетін болсақ, келтірілген жылу мөлшерлерінің қосындысы тұйық контур бойынша интегралға көшеді:

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

Қайтымды циклдар үшін бұл қатынас теңдік ретінде жазылады:

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

Белгілі-бір функцияның өсімшесінен тұйық контур бойынша алынған интеграл нөлге тең, себебі интеграл астындағы өрнек толық дифференциал. Термодинамикада интеграл астындағы өрнек белгілі-бір күй функциясының дифференциалы. Клаузиус жаңа күй функциясын энтропия деп атады. Осы жаңа күй функциясы арқылы соңғы теңдік келесі түрде жазылады:

$$\oint dS = 0.$$

Сонымен Клаузиус енгізген энтропия күй функциясы ретінде анықталады да, қайтымды процесс кезіндегі өсімшесі келтірілген жылуға тең болады:

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

Термодинамиканың екінші бастамасының бірнеше тұжырымдамасы бар. Энтропия арқылы екінші бастама оқшалуланған жүйенің энтропиясы әрқашанда өседі:

$$dS \geq 0.$$

#### Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Изохора мен изобарадан қалай қайтымды цикл алуға болады?
2. Бірінші текті мәңгілік қозғалтқыш дегеніміз не?
3. Екінші текті мәңгілік қозғалтқыш дегеніміз не?
4. Карно жылу машинасының жұмыс принципін қалай сұлба ретінде көрсетуге болады?
5. Кельвин тұжырымдамасына сәйкес термодинамиканың екінші бастамасы бойынша қандай процесс мүмкін емес?
6. Қайтымды Карно циклі бойынша жұмыс жасайтын мұздатқыш машинаның және динамикалық қыздырғыштың (жылулық насостың) жұмыс істеу принциптері (мұнда  $T_1 > T_2$ ):
7. Карно циклінің жұмыстық диаграммасы қалай суреттеледі?
8. Карно циклінің жылулық диаграммасы:
9. Карно циклінде қандай процестер қолданылады?
10. Карно циклін жасау үшін қанша қыздырғыш керек?
11. Бір мұздатқышпен және бір қыздырғышпен қандай қайтымды цикл алуға болады?
12. Энтропия дегеніміз не?
13. Карно циклінде қолданылатын қыздырғыштың жылу сиымдылығы қандай?
14. Карно циклінде қолданылатын жылу қабылдағыштың жылу сиымдылығы қандай?
15. Практикада жылу машиналарында мұздатқыш ретінде не қолданады?
16. Мұздатқыш ретінде қоршаған ортаны қолданғанда қандай процестер туындайды?

17. Қайтымды цикл бойынша жұмыс жасайтын жылу машинасы практикада қалай қолданылады?
18. Карно жылу машинасының пайдалы әсер коэффициенті қалай енгізіледі?
19. СИ жүйесінің қандай бірлігінде ПӘК өлшенеді?
20. ПӘК – нің өлшем бірлігі қандай?

Ұсынылатын әдебиеттер

10. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
11. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
12. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
13. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
14. Термодинамика. Терминология. Вып. 85. М.: Наука, 1973.- 56с.
15. Радченко И.В. Молекулярная физика. М.: Наука, 1965.- 479 с.
16. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544 с.
17. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

### 8 - ші Лекция

Тақырыбы: Оқшауланған жүйелердегі энтропияның өсу заңы. Термодинамиканың екінші бастамасының статистикалық сипаттамасы.

*Лекцияның мақсаты* термодинамиканың екінші бастамасы мен энтропияны статистикалық тұжырымдау туралы кәсіби білімдерді меңгеру.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ТЕРМОДИНАМИКА, ЖЫЛУ, ТЕМПЕРАТУРА, ЖҰМЫС, ІШКІ ЭНЕРГИЯ, ЭНТРОПИЯ, ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ ЕКІНШІ БАСТАМАСЫ, СТАТИСТИКАЛЫҚ САЛМАҚ, ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ БЫҚТИМАЛДЫЛЫҚ, ЭНТРОПИЯ ҮШІН БОЛЫЦМАН ФОРМУЛАСЫ.

Оқшауланған жүйелердегі энтропияның өсу заңы:  $\Delta S \geq 0$ . Термодинамиканың екінші бастамасының статистикалық сипаттамасы. Температураның термодинамикалық шкаласы.

Өте кіші жылу мөлшері  $\delta Q$  процестің функциясы, ал оны  $\frac{1}{T}$  жіктегішіне көбейтсек, көбейтінді толық дифференциалға айналады, яғни бұл шамадан интеграл алуға болады:

$$\int \frac{\delta Q}{T} = \int dS = \Delta S .$$

Сонымен  $\frac{1}{T}$  жіктегіші интегралдаушы жіктегіш деп аталады.

Клаузиус және Кельвин  $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$  теңдігін бір уақытта алған. В. Кельвин осы теңдіктің негізінде температураның термодинамикалық шкаласын енгізді. Температура бұл шкалада қайтымды процестердегі жүйе алатын жылу мөлшерімен өлшенеді. Р.Клаузиус қайтымсыз процестердегі жаңа сипаты бар, осы теңдіктің негізінде жаңа күй функциясы энтропияны енгізді: оқшауланған жүйелерде қайтымсыз процестер жүретін болса, ол өседі. Оқшауланған жүйелердегі энтропияның өсуі термодинамиканың екінші бастамасының тұжырымдамасы себебі ол процестердің бағытын көрсетеді. Энтропияның бұл қасиеті (12) теңсіздігінен көрініп тұр.

Статистикалық физикада Больцманның кинетикалық теңдеуінің негізінде энтропия үшін Больцман формуласы алынған:

$$S = k \ln W + const,$$

мұндағы  $W$  – статистикалық салмақ немесе термодинамикалық ықтималдылық.

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. СИ жүйесінде энтропия қандай бірлікте өлшенеді?
2. СИ жүйесіндегі энтропияның өлшемі қандай?
3. Бір моль идеал газдың 1-ші күйден 2 –ші күйге өткендегі энтропияның өзгерісі:
4. Изотермдік процестегі 1 моль идеал газдың энтропиясының өзгерісі:
5. Екі атомдық молекулалардан құралған 1 моль идеал газдың энтропиясының өзгерісі:
6. Термодинамиканың екінші бастамасына сәйкес оқшауланған жүйенің энтропиясының қандай қасиеттері бар?
7. Оқшауланған жүйенің энтропиясы қалай өзгереді?
8. Денелер жүйесінің энтропиясы қалай анықталады?
9. Екі ыдыста әрқайсысында 100г су бар. Бір ыдыстағы судың температурасы 5 °С, ал екіншісіндегі температура 92 °С . Екі ыдыстағы суды қабырғалары адиабаттық ыдысқа құямыз. Судың температурасы тұрақталған кездегі энтропияның өзгерісін табыңыз.
10. Тұрақты температурада көлемнің қайтымды 2 есе кеміген 1 моль идеал газдың энтропия өсімшесі неге тең?
11. Қайтымды адиабаттық процесте энтропия қалай өзгереді?
12. Жылуалмасу кезінде энтропия қалай өзгереді?
13. Термодинамикалық ықтималдылық  $W$  арқылы өрнектелетін энтропияның формуласы:
14. Абсолюттік нөл кельвиндегі энтропия неге тең?

Ұсынылатын әдебиеттер

18. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
19. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
20. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
21. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
22. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544с.
23. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.

## «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

### 9 - шы Лекция

Тақырыбы: Термодинамикалық функциялар әдісі

*Лекцияның мақсаты* студенттердің термодинамикалық функциялар әдісі туралы кәсіби білімдерді алумен қатар, алған білімдерін есептерді шешуге қолдана білуі.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ЖҰМЫС, ІШКІ ЭНЕРГИЯ, ЖЫЛУ, ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ БІРІНШІ ЖӘНЕ ЕКІНШІ БАСТАМАСЫ, ГИББСТІҢ ЖАЛПЫЛАНҒАН ҚАТЫНАСТАРЫ, МАКСВЕЛЛ ҚАТЫНАСТАРЫ, ЭНТРОПИЯ, ЭНТАЛЬПИЯ, ЕРКІН ЭНЕРГИЯ.

Негізгі термодинамикалық теңдік (Гиббстің жалпыланған қатынасы). Термодинамикалық функциялар туралы түсініктер. Термодинамикалық функциялар әдісі (термодинамикалық потенциалдар).

Термодинамиканың бірінші және екінші бастамасының негізінде Гиббстің жалпыланған қатынастары немесе термодинамикалық теңдік келесі түрде жазылады:

$$dU = TdS - pdV . \quad (1)$$

Мұнда ішкі энергия энтропия-көлем айнымалыларымен берілген:  $U(S,V)$ , яғни толық дифференциал келесі түрде жазылады:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S dV .$$

(1) және (2) өрнектерді салыстырып, аламыз:

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V ; \quad p = -\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S .$$

Толық дифференциалдың қасиеттерін ескере отырып:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial S \partial V} = \frac{\partial^2 U}{\partial V \partial S} , \quad \text{яғни } S, V \text{ айнымалылары үшін келесі Максвелл қатынастарын}$$

береді:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V .$$

Көрнекілік үшін аралас туындылар үшін, өзара қатынастарды келесі түрде жазсақ:

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V}{\partial V}\right)_S = \left(\frac{\partial \left(-\frac{\partial U}{\partial V}\right)_S}{\partial S}\right)_V .$$

Термодинамикада көбінесе қолданылады (мысалы, Ван-дер-Ваальс газы үшін ішкі энергияның формуласын қорытқанда) келесі Максвелл қатынастары:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V .$$

Бұл Максвелл қатынастары Лежандр түрлендірулерін қолдану арқылы, термодинамиканың бірінші бастамасынан алынады, егер  $T, V$  айнымалыларына көшу арқылы:

$$dU = TdS - pdV ;$$

$$dU - d(TS) = TdS - d(TS) - pdV ;$$

$$d(U - TS) = -SdT - pdV ; \quad dF = -SdT - pdV ;$$

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV ; \quad \text{яғни, мұнда } S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V ;$$

$$p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T, \text{ келесі өрнекті ескере отырып } \frac{\partial^2 F}{\partial T \partial V} = \frac{\partial^2 F}{\partial V \partial T}, \text{ жазамыз:}$$

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T}{\partial T}\right)_V, \quad \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V.$$

Каноникалық статистикалық ансамбль аясында сипаттама функциялар әдісі төрт Максвелл қатынасын береді:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V, \quad U(S, V) \text{ сипаттама функциясы}$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V, \quad \text{еркін энергия } F(T, V)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p, \quad \text{энтальпия } H(S, p)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p, \quad \text{Гибсс потенциалы } G(T, p)$$

Кесте

	Сипаттамалық функция (потенциал)	Термодинамикалық теңдік	Максвелл қатынастары
1	$U(S, V)$ Ішкі энергия	$dU = TdS - pdV$	$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial p}{\partial S}\right)_V$
2	$F(T, V)$ Еркін энергия	$dF = -SdT - pdV$	$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$
3	$H(S, p)$ энтальпия	$dH = TdS + Vdp$	$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_p$
4	$G(T, p)$ Гибсс потенциалы	$dG = -SdT + Vdp$	$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$

Изотермдік жағдайда жұмыс еркін энергияның кемуі арқылы өтетінің көрсету үшін, термодинамиканың бірінші бастамасын келесі түрде жазамыз:

$$\delta A = TdS - dU = -d(U - TS), \text{ себебі } T = const, \text{ а } U - TS = F - \text{ еркін энергия.}$$

Көрініп тұр

$$\delta A = -dF.$$

Еркін энергия арналған формуланы талдау

$$F = U - TS .$$

Изотермдік жағдайда жұмыс еркін энергияның кемуі арқылы өтетінін Р.Клаузиус ескере отырып, Әлемнің еркін энергиясы уақыт бойынша жойылады деген тұжырымға келді. Әлемде денелердің орын ауыстыруына жұмыс жасалмайды, бұл күйді Клаузиус «Әлемнің жылулық өлімі» деп атады. Формуладан көрініп тұрғандай тұрақты ішкі энергия және температурада энтропияның өсуі еркін энергияның жойылуына әкеледі. Қарсылық ретінде энтропия тек оқшауланған жүйелерде ғана өсетінін айтуға болады. Келтірілген еркін энергияның қатынастары каноникалық ансамбльдер үшін ғана дұрыс, ал бұл қарастыруларда моль санының тұрақты еместігі, құрылымдардың болуы (мысалы, тірі ағзалар) екерілмейді. Күрделі жүйелерді өте жоғары иерархиялық деңгейдегі статистикалық ансамбльдермен сипаттау керек. Осындай ансамбльдер үшін, Гиббс қатынастары жазылады:

$$dU = \sum_k \sum_m p_{m_k} dq_{m_k} + \sum_m p_m dq_m , \quad (2)$$

мұнда  $U$  – термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясы;  $p_m$  - жалпыланған термодинамикалық потенциал;  $q_m$  - жалпыланған термодинамикалық координата,  $p_m$  потенциалымен байланысты, индексі  $k$  - яғни әрбір  $k$  жеке жүйелеріне арналған.

Қазіргі кезеңде статистикалық ансамбльдер иерархиясы келесі түрде дамыған: микроканоникалық ансамбль, каноникалық ансамбль, үлкен каноникалық ансамбль, ұлы жаһандық ансамбль, жаһандық статистикалық ансамбль.

Үлкен каноникалық ансамбль үшін, термодинамикалық теңдіктің түрі:

$$dU = TdS - pdV + \sum_k \mu_k dv_k , \quad (3)$$

мұнда  $\mu_k$  - химиялық потенциал, ал соңғы мүше моль санының айнымалығын ескереді.

Осы көзқарас бойынша теңдіктің пфаффова түрі теңдеудің оң жағындағы мүшелерді термодинамикалық жұмыстар деп атайды: жылулық жұмыс, механикалық, жұмыс. Температураны жылулық потенциал деуге болады, ал энтропияны онымен байланысты жылулық координата ретінде қарастыруға болады.

#### Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Термодинамикалық теңдіктерді жазу.
2. Потенциалдар әдісімен (сипаттамалық функциялар) Максвелдің 4 қатынасын алыңыз.  $T, p$  айнымалылары арқылы Максвелл қатынастары...  $T, V$  айнымалылары арқылы Максвелл қатынастарын алу...  $S, V$  айнымалылары арқылы Максвелл қатынастарын алу....
3. Қандай формуламен  $H$  энтальпия енгізіледі?
4. Еркін энергия немесе Гельмгольц функциясы:
5. Қандай тәуелсіз айнымалылармен салыстырғанда ішкі энергия термодинамикалық потенциал болады?
6. Қандай тәуелсіз айнымалылармен салыстырғанда энтальпия термодинамикалық потенциал болады?
7. Термодинамикада қысым анықталады . . .
8. Термодинамикада қысым еркін энергия арқылы қалай анықталады ...
9. Термодинамикада температура қалай анықталады . . .
10. Термодинамикада көлем қалай анықталады . . .

#### Ұсынылатын әдебиеттер

24. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.

25. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544 с.
26. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
27. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
28. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
29. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

### 10 - шы Лекция

Тақырыбы: Нақты газдар.

*Лекцияның мақсаты* студенттерді нақты газдардың қасиеттері және оларды сипаттау әдістері туралы кәсіби білімдерді бері.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ЭНДРИОС ИЗОТРМАЛАРЫ, НАҚТЫ ГАЗДАРДЫҢ КҮЙ ТЕҢДЕУІ, ҚЫСЫМ, ІШКІ ҚЫСЫМ, ТҮЗЕТУЛЕР, МАКСВЕЛЛ ҚАТЫНАСТАРЫ, ВАН-ДЕР-ВААЛЬС ТЕҢДЕУІ, ІШКІ ЭНЕРГИЯ, ДЖОУЛЬ-ТОМСОН ҚҰБЫЛЫСЫ.

Молекулааралық күштердің электромагниттік табиғаты. Күштер және молекулааралық әрекеттесулердің қарапайым эмпирикалық потенциалдары. Нақты газдар. Газдар қасиеттерінің идеал газдар қасиеттерінен ауытқуы. Нақты газдар изотермаларын талдау. Эндриос изотермалары. Нақты газдардың күй теңдеуі. Джоуль-Томсон құбылысы.

#### Бір моль нақты газ үшін Ван-дер-Ваальс теңдеуі.

Бір моль нақты газ үшін, идеал газ теңдеуіне түзетулер енгізу арқылы аламыз:

$$p = \frac{RT}{V_M - b} - p_i, \quad (4)$$

мұнда  $b$  - молекулалардың өзіндік көлемін ескеретін түзетулер,

$p_i$  - молекулалардың өзара тартылыс күштері тудыратын ішкі қысым.

Өзіндік көлемге арналған түзету: тұрақты шаманы молярлық көлемнің квадратына бөлеміз:

$$p_i = \frac{a}{V^2}. \quad (5)$$

Сонымен бір моль нақты газдың Ван-дер-Ваальс теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\left( p + \frac{a}{V_M^2} \right) (V_M - b) = RT \quad (6)$$

Бұл теңдеуді (2) теңдеу түріне келтіруге болады, ондағы газдың идеал газ қасиеттерінен ауытқуы сығылымдық факторы арқылы өрнектелген. Осы тұжырымды алу үшін келесі түрлендірулерді жүргіземіз:

$$pV_M + \frac{a}{V_M} - pb - \frac{ab}{V_M^2} = RT, \quad (7)$$

$$\frac{pV_M}{RT} + \frac{a}{V_M RT} - \frac{pb}{RT} - \frac{ab}{V_M^2 RT} = 1. \quad (8)$$



Сығылымдық факторы формуласын аламыз:

$$z = 1 + \frac{pb}{RT} - \frac{a}{V_M RT} + \frac{ab}{V_M^2 RT} . \quad (9)$$

Теңдеудегі мүшелерді бағалағанда идеал газ қатынастарын қолдану арқылы (сығылымдық факторы бірге тең, яғни келесі теңдеуді қолданамыз  $pV_M = RT$ ), соңында сығылымдық факторын келесі түрге келтіреміз:

$$z = 1 + \frac{pb}{RT} - \frac{ap}{R^2 T^2} + \frac{abp^2}{R^3 T^3} , \quad (10)$$

Мүшелердің өлшемдерінің белгілі қысымда температураға тәуелділігін аламыз. Белгілі қысымда жоғары температурада екінші мүше үлкен шама, сондықтан үшінші және төртінші мүшелер кішкентай болғандықтан ескермеуге болады. Бұл жағдайда сығылымдық факторы бірден үлкен:

$$z = 1 + \frac{pb}{RT} > 1 . \quad (11)$$

Теңдеуден көрініп тұрғандай аздау қысымдарда екінші мүше бірден едәуір кіші, сондықтан сығылымдық факторы бірге тең, яғни идеал газдың күй теңдеуін береді.

Төменгі температурада үшінші мүше екінші және төртінші мүшелерден үлкен болуы мүмкін, сол себепті сығылымдық факторы бірден кіші.

### Бірнеше моль нақты газдың күй теңдеуі

(1) теңдеуден  $\nu$  моль нақты газдың күй теңдеуін алуға болады:

$$pV = znV kT \frac{N_A}{N_A} . \quad (12)$$

Моль саны бөлшектер санының Авагадро санына қатынасын ескеріп,

$$\frac{nV}{N_A} = \nu ; \quad kN_A = R , \quad (13)$$

$\nu$  моль нақты газдың күй теңдеуін сығылымдық факторы арқылы жазуға болады:

$$pV = z\nu RT , \quad (14)$$

мұнда  $V$  - газ орналасқан ыдыс көлемі.

$\nu$  моль нақты газ орналасқан ыдыстың көлемін молярлық көлем арқылы өрнектеуге болады:

$$V = \nu V_M . \quad (15)$$

Ван-дер-Ваальстің  $\nu$  моль нақты газға арналған теңдеуін (6) теңдеуге (15) өрнегін қойып молярлық көлемді жою арқылы алуға болады:

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT . \quad (16)$$

Мұнда келесі түрлендірулер жүргізілген:

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) \left( \frac{V}{\nu} - b \right) = RT , \quad (17)$$

$$\left( p + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) \left( \frac{V - \nu b}{\nu} \right) = RT . \quad (18)$$

Сығылымдық факторын ыдыс көлемі  $V$  арқылы (9) өрнектен молярлық көлемнен ыдыстың көлемне көшу арқылы (15) қатынасты пайдаланып аламыз:

$$z = 1 + \frac{pb}{RT} - \frac{\nu a}{VRT} + \frac{\nu^2 ab}{V^2 RT} . \quad (19)$$

Осы нәтижені (16) теңдеуді түрлендіру арқылы алуға болады.

### Ван-дер-Ваальс теңдеуін талдау.

Метаустабильдік күйлер.

Критикалық параметрлер.

Критикалық изотерманың иілу нүктесіндегі жағдайда

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_T = 0$$

$$\frac{RT_c}{(V - vb)^2} = \frac{2va}{V_c^3}$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial V^2}\right)_T = 0$$

$$\frac{RT_c}{(V - vb)^3} = \frac{3va}{V_c^4}$$

$$V_c = 3vb, \text{ м}^3 / \text{моль} \quad T_c = \frac{8a}{27bR}, \quad p_c = \frac{a}{27b^2}$$

Гелий үшін  $a = 0.00346 \text{ Па м}^6 \text{ моль}^{-1}$ ,  $b = 2.38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{моль}$ .

Азот үшін  $a = 0.137 \text{ Па м}^6 \text{ моль}^{-1}$ ,  $b = 3.87 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{моль}$ .

Ван-дер-Ваальс газының жұмысы. Бір моль газдың изотермдік жағдайда кеңейгендегі жасайтын жұмысы,

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2}\right) dV = RT \ln\left(\frac{V_2-b}{V_1-b}\right) + a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)$$

Бір моль Ван-дер-Ваальс газының ішкі энергиясы.

$$U = C_V T - \frac{a}{V}$$

Бұл формуланы қорытуға басты термодинамикалық қатынас:

$$dU = C_V dT - \left[ p - T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V \right] dV,$$

Термодинамиканың бірінші бастамасынан Максвелл қатынастарын қолдану арқылы алынған:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_V$$

Максвелдің бұл қатынастары термодинамиканың бірінші бастамасынан Лежандр түрлендірулерін пайдалану арқылы алынған:

$$dU = TdS - pdV$$

$$dU - d(TS) = TdS - d(TS) - pdV$$

$$d(U - TS) = -SdT - pdV$$

$$dF = -SdT - pdV$$

$$dF = \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT + \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV; \quad \text{бұдан көрініп тұр } S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V$$

$$p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T, \text{ егер } \frac{\partial^2 F}{\partial T \partial V} = \frac{\partial^2 F}{\partial V \partial T} \text{ өрнегін ескерсек}$$

$$\left( \frac{\partial \left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_V}{\partial V} \right)_T = \left( \frac{\partial \left( \frac{\partial F}{\partial V} \right)_T}{\partial T} \right)_V, \quad \left( \frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_V$$

$$dU = C_V dT + \frac{a}{V^2} dV$$

$$U = \int_0^T C_V dT + \int_{\infty}^V \frac{a}{V^2} dV = C_V T - \frac{a}{V}$$

Van der Waals equation of State in reduced form

$$\omega := 334.17000 \quad \tau_1 := 1.1 \quad \tau_2 := 1.0 \quad \tau_3 := 0.9 \quad \tau_4 := 0.8$$

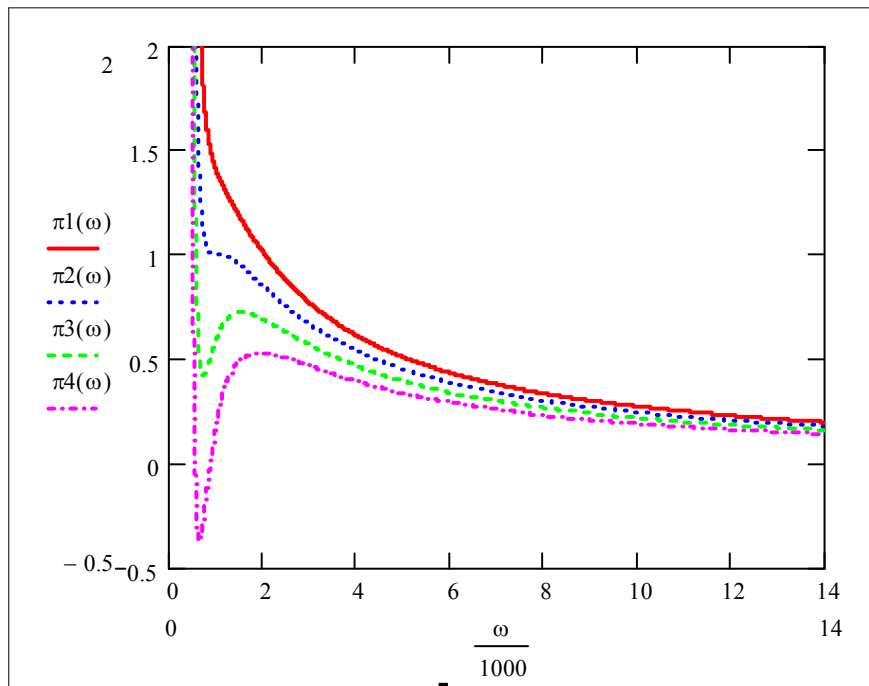
$$\left( \pi + \frac{3}{\omega^2} \right) \cdot (3 \cdot \omega - 1) - 8 \cdot \tau$$

$$\pi_1(\omega) := 8 \cdot \frac{\tau_1}{3 \cdot \frac{\omega}{1000} - 1} - \frac{3}{\left( \frac{\omega}{1000} \right)^2}$$

$$\pi_2(\omega) := 8 \cdot \frac{\tau_2}{3 \cdot \frac{\omega}{1000} - 1} - \frac{3}{\left( \frac{\omega}{1000} \right)^2}$$

$$\pi_3(\omega) := 8 \cdot \frac{\tau_3}{3 \cdot \frac{\omega}{1000} - 1} - \frac{3}{\left( \frac{\omega}{1000} \right)^2}$$

$$\pi_4(\omega) := 8 \cdot \frac{\tau_4}{3 \cdot \frac{\omega}{1000} - 1} - \frac{3}{\left( \frac{\omega}{1000} \right)^2}$$



Сурет. 1 Келтірілген айнымалылар және Ван-дер-Ваальс изотермалары.

Джоуль–Томсон эффектісі: кішкене санлаулардан өткендегі температура өзгерісінің изоэнтальпиялық құбылысы.

Дифференциальдық эффект тұрақты энтальпияда температураның қысым бойынша туындысымен сипатталады:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{1}{C_p} \left[ T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V \right].$$

Формуланы қорытуға бір моль газ энтальпиясының тұрақтылығы алынады:

$$dH = 0,$$

Формулаға кіретін айнымалылар қысым – температураны келесі түрде жазамыз:

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p dT = 0.$$

Осы қатынастардан келесі қатынастарды алуға болады:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = - \frac{\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T}{\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p}$$

Молярлық изобарлық жылуемділіктің анықтамасынан,

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = C_p.$$

Формуладағы алымын энтальпияның дифференциалын  $H(S, p)$  айнымалыларының функциясы ретінде туынды алу арқылы табамыз:

$$dH = TdS + Vdp.$$

Бұл өрнекті қысым бойынша тұрақты температурада дифференциалдау арқылы:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T + V$$

Максвелл қатынастарын пайдаланып:

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T = - \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p,$$

аламыз:

$$\left(\frac{\partial H}{\partial p}\right)_T = V - T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p.$$

Бұл қатынастар соңында береді:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_H = \frac{1}{C_p} \left[ T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - V \right].$$

Лежандр түрлендіруін пайдаланып келесі термодинамикалық теңдікті аламыз:

$$dU + d(pV) - d(TS) = TdS - pdV + d(pV) - d(TS)$$

$$d(U + pV - TS) = TdS - pdV + pdV + Vdp - TdS - SdT$$

Қарапайым түрлендірулерден кейін:

$$d(U + pV - TS) = Vdp - SdT$$

Сол жағында  $(p, T)$  айнымалыларының толық дифференциалы тұр, ол Гиббстің термодинамикалық потенциалы деп аталады  $G(p, T)$ :

$$dG = Vdp - SdT.$$

Гиббс функциясынан  $(p, T)$  айнымалылары арқылы алынған толық дифференциал келесі түрде жазылады:

$$dG = \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_T dp + \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p dT.$$

Бұл өрнекті салыстыра отырып келесі өрнектерді аламыз:

$$V = \left( \frac{\partial G}{\partial p} \right)_T ; \quad S = - \left( \frac{\partial G}{\partial T} \right)_p$$

Аралас туындыларды пайдаланып келесі өрнекті аламыз:

$$\frac{\partial^2 G}{\partial p \partial T} = \frac{\partial^2 G}{\partial T \partial p}.$$

Көлем мен энтропияға сәйкес өрнектерді пайдаланып, Гиббс функцияларының дербес туындылары арқылы Максвелл қатынастарын аламыз:

$$\left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = - \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T.$$

Кейбір жағдайларда құбылыстарды сипаттау үшін, Джоуль-Томсон дифференциальдық коэффициенті енгізіледі:

$$\mu = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_H.$$

Сонымен Джоуль-Томсон дифференциальдық коэффициентінің формуланы аламыз:

$$\mu = \frac{1}{C_p} \left[ T \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V \right].$$

Талдау барысында идеал газ үшін  $\mu = 0$ . Құбылыстың пайда болуын нақты газдар молекулаларының өзара әрекеттесуімен түсіндіріледі.

#### Өзін-өзі тексеру сұрақтары

- 1 Молекулааралық күштердің табиғаты қандай?
- 2 Ван-дер-Ваальс теңдеуі.
- 3 Келтірілген параметрлердегі Ван-дер-Ваальс теңдеуі.
- 4 Ван-дер-Ваальс теңдеуіндегі келтірілген қысымға өлшем ретінде қандай параметрлер қолданылады?
- 5 Ван-дер-Ваальс теңдеуіне келтірілген көлем қалай енгізіледі?
- 6 Ван-дер-Ваальс теңдеуіне келтірілген қысым қалай енгізіледі?
- 7 Ван-дер-Ваальс теңдеуіне келтірілген температура қалай енгізіледі?
- 8 Метастабильдік күй дегеніміз не?
- 9 Ван-дер-Ваальс түзетуі  $b = 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$  бір моль азоттың сындық көлемі неге тең?
- 10 Азоттың молярлық сындық көлемі  $11,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$  болса,  $b$  түзетуі неге тең?
- 11 Ван-дер-Ваальс түзетуі  $b = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$  бір моль оттегінің сындық көлемі неге тең?
- 12 Оттегінің сындық көлемі  $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$  болса,  $b$  түзетуі неге тең?
- 13 Ван-дер-Ваальс түзетуі  $b = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$  бір моль сутегінің сындық көлемі неге тең?
- 14 Джоуль-Томсон құбылысы қалай байқалады?

#### Ұсынылатын әдебиеттер

30. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.

31. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544с.
32. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
33. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
34. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
35. Сивухин Д.В. Общий курс физики, том 2 - Термодинамика и молекулярная физика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1979.- 552 с.: ил.
36. Курлапов Л.И. Физика кинетических явлений в газах. Монография. – Алматы, – 2001. 211 с. ISBN 9965-489-81-5.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Заитович

#### 11- ші Лекция

Тақырыбы: Сұйық күйдің ерекшеліктері.

**Лекцияның мақсаты:** студенттерді сұйықтардың қасиеттері және оларды сипаттау әдістері туралы кәсіби білімдерді алуға баулу.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* СҰЙЫҚ, ҚЫСЫМ, ІШКІ ҚЫСЫМ, БЕТТІК КЕРІЛУ, СҰЙЫҚ ЕРТІНДІЛЕР, РАУЛ, ГЕНРИ ЗАҢДАРЫ, ОСМОСТЫҚ ҚЫСЫМ.

Сұйық күйінің ерекшеліктері. Беттік құбылыстар. Жақыннан және алыстан әсерлесу реттілігі. Жылулық қозғалыс. Сұйықтардың қайнауы мен булануы. Сұйық ертінділер. Рауль, Генри заңдары. Осмостық қысым. Вант – Гофф заңы.

Еркін беттік энергия. Молекулалардың өзара тартылыс потенциалдық энергиясы абсолюттік шамасы бойынша кинетикалық энергиясынан өте көп болғанда сұйық күй пайда болады. Молекулалар арасындағы тартылыс күштері едәуір болғандықтан, молекулалар сұйықтың көлемінде ұстап қалады. Сонымен сұйықтарда оның көлемін шектейтін бет құрылады. Көлемді шектейтін бұл бет формаға байланысты. Геометриядан белгілі, минималь бетпен берілген көлем шар. Сұйық бетінің жұқа қабатындағы бөлшектерге, басқа бөлшектер тарапынан теңәсерлік бағыты сұйықтың ішіне қарай бағытталған және нормаль бойымен бетке бағытталған. Сұйықтың бетін үлкейту үшін, сұйық көлемінен біраз молекулалар саны беттік қабатқа көтерілуі тиіс. Бұл үшін жұмыс жасау керек, егер бет құрылымы изотермдік болса, беттік потенциалдық энергия оны құруға жұмсалатын энергияға қарама-қарсы бағытталған. Екінші жағынан изотермдік процестерде потенциалдық энергияның рөлін еркін энергия атқарады  $F$ . Беттің біртектілігіне байланысты еркін беттік энергия беттің ауданына  $S$  тура пропорциональ. Сондықтан жазуға болады

$$F = \sigma S,$$

мұнда  $\sigma$  — беттің еркін энергиясының меншікті тығыздығынемесе беттік керілу коэффициенті деп аталады. Механикада жүйе ең кіші потенциалдық энергияға жетуге ұмтылады және бұл күйлер орнықты болады. Сол себепті сұйықтың беті қысқаруға ұмтылады. Осыған сәйкес сұйық бетінің бойымен күштер әсер етеді. Беттік керілу

құбылысының механизмі. Еркін энергия  $\sigma$  сұйықтың кішкене беттік қабатында орналасқан, сондықтан беттік керілу күштері тек жұқа қабатта ғана әсер етеді. Бет бойымен әсер ететін беттік керілу күштерінің пайда болуы түсініксіз. Оны түсіну үшін тартылыс күштерінен басқа беттік қабаттың молекулаларына сұйықтың ішіне орын ауыстыруына кері басқа күштер әсер етеді. Осы күштердің теңәсерлі құраушысы беттік керілудің пайда болуын қамтамасыз етеді.

Беттік керілу сұйық жанасатын заттың қасиеттеріне тәуелді. Бұл дегеніміз беттік керілу өзгереді. Сондықтан беттік керілу туралы айтқанда сұйықты және онымен қатар сұйықпен жанасатын затты көрсету қажет.

Сұйықтың қисық бетінің астында қосымша пайда болатын қысымды Лаплас формуласы арқылы есептеуге болады:

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

мұнда  $R_1$  және  $R_2$  – негізгі беттік қисықтық радиустар (өзара перпендикуляр жазықтықтардың қилысу қималарының іздерінің радиустары).

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Беттік керілу.
2. Лаплас формуласы.
3. Беттік керілудің туындау механизмі қандай?
4. Сұйықтардағы молекулалар жылулық қозғалысының сипаттары қандай?
5. Беттік керілудің пайда болу себебі неде?
6. Беттік керілу коэффициенті қалай енгізіледі?
7. Капиллярлық түтікшедегі жұғатын сұйықтың жағдайын кескіндеңіз.
8. Толық жұқпайтын сұйық үшін, шектік бұрыш  $\theta$  неге тең?
9. Толық жұғатын сұйық үшін, шектік бұрыш  $\theta$  неге тең?
10. Қандай суретте жұқпайтын сұйықтың шектік бұрышы дұрыс көрсетілген?
11. Екі бірдей сфералық тамшы біріккен соң, сфераның ішіндегі қысым қандай?
12. Осмостық қысым дегеніміз не?

Ұсынылатын әдебиеттер

37. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
38. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544 с.
39. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
40. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
41. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
42. Радченко И.В. Молекулярная физика. М.: Наука, 1965.- 479 с.
43. Штрауф Е.А. Курс физики. Для высш. техн. учеб. заведений. Т. 1.- Физические основы механики, термодинамики и молекулярная физика. Л.: Судпромиздат, 1960.- 484 с.

**«Молекулалық физика» пәні бойынша**

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

## 12-ші Лекция

Тақырыбы: Қатты денелер физикасы.

*Лекцияның мақсаты* студенттердің қатты денелер және оларды сипаттау әдістері туралы кәсіби білімдерді алуы.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ҚАТТЫ ДЕНЕ, БАЙЛАНЫСТЫҚ КҮШТЕРІ, КРИСТАЛДАР, ЖЫЛУСИЫМДЫЛЫҚ, ДЮЛОНГ ЖӘНЕ ПТИ ЗАҢЫ.

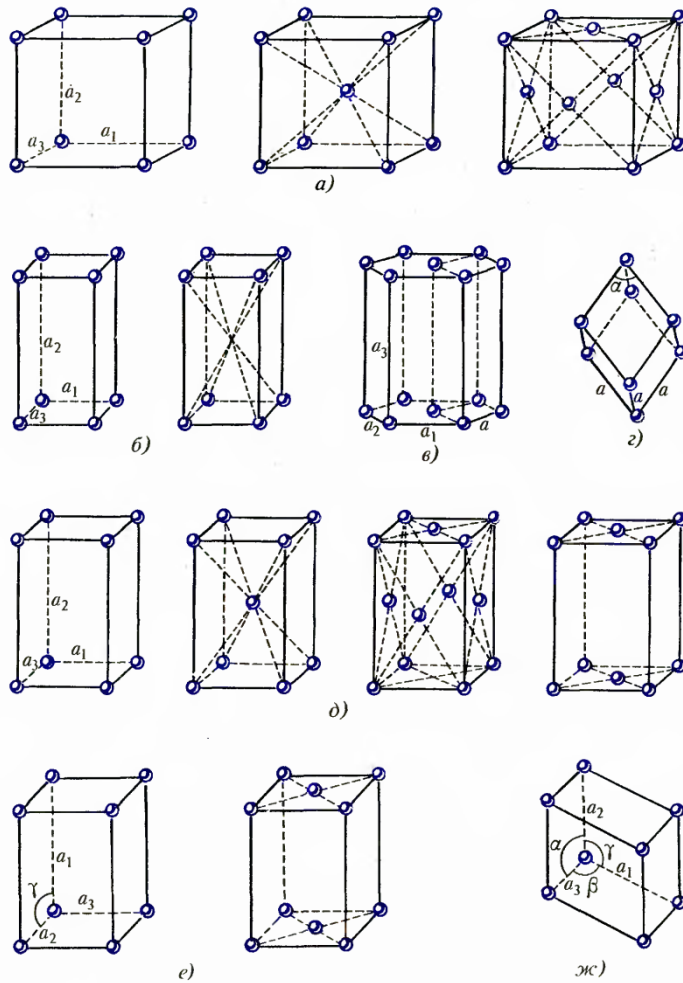
Қатты денелер физикасының негіздері. Заттың кристалдық және аморфтық күйлері. Кристалдардың физикалық түрлері. Қатты денелердің жылу сиымдылығы. Дюлонг және Пти заңы. Сұйық кристалдар.

Молекулалардағы байланыс күштері. Ядроның маңайындағы электрондар әр аттас зарядтардың өзара кулондық күштермен тартылуы арқылы орнықталады. Атом электрлік толығымен бейтарап.

Молекулалар атомдардан тұрады. Атомдарды молекулада бірге ұстап тұратын күштердің табиғаты электрлік, бірақ ол күштердің туындауы күрделі мәселе. Молекулалардағы атомдар байланысының екі түрі бар. Иондық байланыс. Байланыс күштері әртүрлі ол атомдардың құрылымына тәуелді. Атомдардың құрылымы және электрондардың қозғалыс заңдары кванттық физикада қарастырылады. Біз қарастырамыз кейбір жағдайларда электрон немесе бірнеше электрон сәйкес атомдармен әлсіз байланысқан. Бұл электрондар атомдардан оңай кеткен соң оң зарядталған ион пайда болады. Басқа жағдайларда электрондар қатты байланыста, ал кейбір жағдайларда атом электронды қосып алады да теріс зарядталған ионға айналады. Иондардың арасында молекулалар құрылатын кулондық тартылыс күштері әсер етеді. Мысалы, натрий хлордың молекуласы  $\text{NaCl}$ , иондардың құрылымы келесі түрде жазылады  $\text{Na}^+\text{Cl}^-$ , яғни  $\text{Na}^+$  оң ион, ал  $\text{Cl}^-$  — теріс ион. Кристалдық денелердің сипаттамалық ерекшеліктері. Физикалық ситуация: молекулалар арасындағы тартылыс күштері басымдау. Әрбір молекуланың маңайында молекулалар белгілі ретпен орналасқан жағдайда ғана орнықты тепе-теңдік орнайды. Бұл ереже дененің барлық көлемінде орындалады, яғни молекулалардың өзара орналасуы периодты түрде қайталанып кристалдық құрылым пайда болады. Құрылымдар санының шектеулігі: себебі кристалдық торлардың симметриялар саны шектеулі, қатты денелердің әртүрлі кристалдық құрылымдарының жалпы саны шектеулі.

Қатты денелердің ерекшелігінің бірі, басқа агрегаттық күйлерден айырмашылығы формасы мен көлемі сақталады. Осы қасиеттеріне қарай адам санасындағы кеңістік, геометриялық бейнелер және олардың арасындағы байланыстармен қатар кеңістікті өлшеу әдістері дамыды. Қатты денелердің қозғалысының негізінде механикалық қозғалыс және материалдық объектілердің орын ауыстыруы туралы түсініктерді қалыптастыруға көп септігін тигізді. Қатты денелердің маңызды геометриялық қасиеті симметрия. Мысалы жолда табылған тас кірпіштен айырмашылығы, тастың формасы дұрыс емес. Сөздер «дұрыс» және «дұрыс емес» формалар материалдық денелердің объективтік қасиеттерінің субъективті көрінісі, яғни олардың симметриясы. (оқулық. қараңыз Матвеевті А.Н.)





### Кристалдық кластар және торлар түрлері.

Жүйелер: а – кубтық, б – тетрагоналдық, в – гексагоналдық, г – ромбоэдрикалық, д – ромбылық, е – моноклиндік, ж – триклиндік.

Дюлонг және Пти заңы. Классикалық теорияда қатты денелердің молярлық жылу сыйымдылығы барлық денелер үшін бірдей:

$$C = 3R .$$

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Қатты денедегі құрылымдық элементтердің жылулық қозғалысының сипаты қандай?
2. Атомдық кристалдардағы кристалдық торлар түйіндерінде қандай бөлшектер болады?
3. Иондық кристалдардағы кристалдық торлар түйіндерінде қандай бөлшектер болады?
4. Молярлық  $C$ , меншікті  $c$  сыйымдылықтары мен молярлық  $M$  массаның байланысы.
5. Қатты дене үшін молярлық жылу сыйымдылықтың Дюлонг және Пти заңы:
6. Қатты денелердің меншікті жылу сыйымдылығын есептеу үшін, Дюлонг және Пти заңына негізделген формула.

7. Классикалық Дюлонг және Пти заңы бойынша темірдің ( $M = 56$  г/моль) меншікті жылу сыйымдылығының мәні қандай?
8. Классикалық Дюлонг және Пти заңы бойынша алтынның ( $M = 197$  г/моль) меншікті жылу сыйымдылығының мәні қандай?

Ұсынылатын әдебиеттер

44. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
45. Штрауф Е.А. Курс физики. Для высш. техн. учеб. заведений. Т. 1.- Физические основы механики, термодинамики и молекулярная физика. Л.: Судпромиздат, 1960.- 484 с.
46. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.- 544с.
47. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
48. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
49. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
50. Радченко И.В. Молекулярная физика. М.: Наука, 1965.- 479 с.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

### 13 - ші Лекция

Тақырыбы: Тасымалдау процестері.

*Лекцияның мақсаты* студенттерді тасымалдау процестері және оларды сипаттау әдістерімен таныстыра отырып, тасымалдау құбылыстары туралы түсініктерді толығымен меңгеруге машықтандыру.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ГАЗДАР, БІРТЕКТІ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕР, ТАСЫМАЛДАУ ПРОЦЕСТЕРІ, АҒЫНДАР, ФЕНОМЕНОЛОГТЫҚ, КОНСТИТУТИВТІК ҚАТЫНАСТАР, ТАСЫМАЛДАУ КОЭФФИЦИЕНТТЕРІ, ҚАТТЫ ДЕНЕЛЕР, БАЙЛАНЫС КҮШТЕРІ, ДИФFUЗИЯ, ТҰТҚЫРЛЫҚ, ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК, ЭНТРОПИЯ ӨНІМІ, АЙҚАС ҚҰБЫЛЫСТАР:

Біртекті емес жүйелердегі тасымалдау процестері. Ағындар. Феноменологтық конститутивтік қатынастар және тасымалдау коэффициенттері. Қайтымсыз процестер термодинамикасындағы жалпылаулар. Онзагердің феноменологтық сызықтық қатынастары. Айқас құбылыстар. Энтропияның өндірілуі.

Біртекті емес газдарда, сұйықтарда, және қатты денелерде масса, энергия, импульс алмасу арқылы тасымалдау процестері: диффузия, тұтқырлық және жылуөткізгіштікпен қоса термодиффузия, термоэффект және т.б. құбылыстары қатар жүреді. Бұл процестер табиғи және техникалық жүйелерде маңызды рөл атқарумен қатар, жаңа технологиялардың негізі болып табылады. Практикалық маңыздылығымен қатар, физикалық объектілерді зерттеуде және біртекті емес жүйелердегі қайтымсыздықтың туындауын ашуда көп септігін тигізеді. Тасымалдау процестерінің математикалық моделі конститутивтік феноменологтық қатынастар болып табылады, яғни ағындардың беттік тығыздығы тасымалдау коэффициенттерімен және біртекті емес сипаттамаларға сәйкес макропараметрлермен байланысады.

Тасымалдау процестерін феноменологтық сипаттау, осы құбылыстарды бақылауға негізделіп, негізгі конститутивтік қатынастарды тұжырымдауға мүмкіндік берді: Фик заңы, Ньютона-Рихман үйкеліс заңы, Фурье заңы.

Қозғалмайтын ортадағы диффузия үшін, мұндай қатынас Фиктің бірінші заңы болады:

$$\vec{j}_\alpha = -D_\alpha \vec{\nabla} n_\alpha ,$$

мұндағы  $\vec{j}_\alpha$  – қоспадағы  $\alpha$  компонентті бөлшектер ағынының беттік тығыздығы,

$D_\alpha$  - шын диффузия коэффициенттері,

$n_\alpha$  -  $\alpha$  - нөмірлі компоненттің сандық парциальдық тығыздық.

Тұтқырлықты сипаттауға арналған конститутивтік қатынас (ішкі үйкеліс) Ньютон-Рихман үйкеліс заңы болады. Бір өлшемді ағынға арналған (куэт ағыны) бұл заң келесі түрде жазылады

$$P_{xy} = -\eta \frac{dW_y}{dx} ,$$

мұнда  $P_{xy}$  - тұтқыр кернеулік тензорының құраушысы,

$\eta$  - тұтқырлық коэффициенті (нөлдік дәрежедегі тензор – скаляр),

$\frac{dW_y}{dx}$  - бір өлшемді жағдайдағы ағын жылдамдығы градиентінің компоненті.

Қозғалмайтын ортадағы жылуөткізгіштік процесінің конститутивтік феноменологтық қатынасы Фурье заңы болады:

$$\vec{Q} = -\lambda \vec{\nabla} T ,$$

мұнда  $\vec{Q}$  - жылу ағынының беттік тығыздығы,

$\lambda$  - жылуөткізгіштік коэффициенті минус таңбасы жылу ағыны және температура градиенті (бірінші дәрежедегі тензор) қарама-қарсы бағытталған.

Сызықты қайтымсыз термодинамиканың жуықтауы бойынша, қайтымсыз ағындар Онзагердің феноменологтық қатынастары арқылы анықталады:

$$J_q = \sum_r L_{qr} X_r , \quad L_{qr} = L_{rq} .$$

Энтропияның өндірілуі ағындардың қайтымсыз бөлігімен анықталады, ал бақыланатын ағындардың құрамында қайтымды сипаттағы мүшелер қосылады, сондықтан бақыланатын ағыннан қайтымсыз бөлікті айқындау қажет. Энтропиялық талдау аясында термодинамикалық күштер мен ағындарды таңдағанда энтропия өндірілу жағдайы орындалуы тиіс:

$$g = \frac{1}{T} \sum_q X_q J_q .$$

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Газдардың тұтқырлығы қалай туындайды?
2. Диффузия дегеніміз не?
3. Жылу ағынының пайда болу себептері?
4. Диффузиялық ағын үшін Фик заңы қалай жазылады?
5. Бір өлшемді процесс үшін  $q$  жылу ағынына арналған Фурье заңы қалай жазылады?
6. Тұтқыр кернеуліктердің пайда болу себептері?
7. Диффузиялық ағынның пайда болу себептері?

8. Термодиффузияның пайда болу себептері?
9. Термодиффузия дегеніміз не?
10. Практикада термодиффузияны қалай қолданады?
11. Тұтқыр кернеулік тензорының компоненттеріне арналған Ньютон-Рихман үйкеліс заңы:
12. Диффузия коэффициенті СИ жүйесінде қандай бірлікпен өлшенеді?
13. Динамикалық тұтқырлық коэффициент үшін кинетикалық теорияның формуласы:
14. Қимасы  $1 \text{ см}^2$  және ұзындығы  $10 \text{ см}$  металл біліктің екі жағында  $100 \text{ К}$  тұрақты температуралар айырымы берілген. Бір секундта білікшеден өтетін жылу мөлшері неге тең, егер тұрақты жылуөткізгіштік коэффициенті  $\lambda = 200 \text{ Вт/ (м К)}$  болса?
15. Қимасы  $1 \text{ см}^2$  және ұзындығы  $10 \text{ см}$  біліктің екі жағында тұрақты  $100 \text{ К}$  температуралар айырымы ұсталатын болса. Біліктен бір секундта қанша жылу мөлшері өтеді, егер білік материалының тұрақты жылуөткізгіштігі  $\lambda = 20 \text{ Вт/ (м К)}$  болса?
16. Қайтымсыз ағындарға арналған сызықтық феноменологтық теңдеулер қалай жазылады?
17. Онзагердің сызықтық теориясында энтропияның  $g$  өндірілуі?
18. Айқас феноменологтық коэффициенттерге Онзагер қатынасы қалай жазылады?
19. Табиғи процестердегі энтропияның өндірілуі?

Ұсынылатын әдебиеттер

51. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
52. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
53. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
54. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.– 544с.
55. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.

### «Молекулалық физика» пәні бойынша

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Зайтович

#### 14 - ші Лекция

Тақырыбы: Газдардағы тасымалдау процестерінің кинетикалық теориясы.

*Лекцияның мақсаты* студенттерді тасымалдау процестері және оларды сипаттайтын кинетикалық теориялар туралы кәсіби мағлұматтарды меңгеру.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ГАЗДАР, БІРТЕКТІ ЕМЕС ЖҮЙЕЛЕР, ТАСЫМАЛДАУ ПРОЦЕСТЕРІ, АҒЫНДАР, ФЕНОМЕНОЛОГТЫҚ, КОНСТИТУТИВТІК ҚАТЫНАСТАР, ТАСЫМАЛДАУ КОЭФФИЦИЕНТТЕРІ, ДИФФУЗИЯ, ТҰТҚЫРЛЫҚ, ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК, МОЛЕКУЛАЛАРДЫҢ ОРТАША ҰЗЫНДЫҒЫ ЖӘНЕ ЕРКІН ЖҮРУ ЖОЛЫН ЖҮРІП ӨТУ ОРТАША УАҚЫТЫ, ПАРЦИАЛЬДЫҚ ТЫҒЫЗДЫҚ.

Газдардағы тасымалдау процестерінің элементар кинетикалық теориясы. Орташа соқтығысу жиілігі. Молекулалар еркін жүру жолы және орташа уақыты, көлденең газкинетикалық қимасы. Зат, импульс, энергия тасымалдау процестерінің физикалық мағынасы. Жалпы тасымалдау теңдеуі. Өзіндік диффузия, тұтқырлық, жылуөткізгіштік.

Газдардың элементар кинетикалық теориясында молекулалар соқтығысусыз орташа еркін жүру жолына сәйкес жол жүреді. Молекулалардың хаосты қозғалысының әсерінен бақылау ауданшасын екі қарама-қарсы бағытта кесіп өтеді. Егер ауданшаның бір жағында газдың макропараметрлері әртүрлі болса, осы ауданша арқылы макроскоптық бақыланатын ағын пайда болады. Осындай модель арқылы Больцман тасымалдау коэффициенттеріне арналған құрылымдары бірдей формулаларды алды (Больцман формуласы). Өзіндік диффузия коэффициенті төменгі түрде өрнектеледі:

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

мұндағы  $\langle l \rangle$  – молекулалардың еркін жүру жолының орташа ұзындығы,

$\langle v \rangle$  – молекулалар жылулық қозғалысының орташа жылдамдығы,

Тұтқырлық коэффициенті:

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

Жылуөткізгіштік коэффициенті:

$$\lambda = \frac{1}{3} \langle l \rangle \langle v \rangle c_V \rho,$$

мұндағы  $\rho$  – газдың массалық тығыздығы,

$c_V$  – меншікті изохорлық жылусиымдылық.

Газ қоспаларындағы тасымалдау процестерін сипаттауға қоспадағы әрбір компоненттің еркін жүру жолы мен соқтығысудан кейінгі молекулалар жылдамдықтарының сақталуы қолданылады. Осындай сипаттаулар төменде келтірілген.

Қозғалмайтын газдағы молекулалар транспорттық еркін жүру жолына тең қашықтықтан ауданшаға  $\vartheta$  бұрышпен нормаль бағыттағы жылдамдықпен бақылау ауданшасына жететін  $\alpha$  компоненттің  $z$ -құраушыларының ағын тығыздығына арналған формуланы аламыз

$$\begin{aligned} j_{\alpha z} &= \int_{-\infty}^{+\infty} v_{\alpha} \cos \vartheta \left( f_{\alpha}^0 - f_{\alpha}^0 l_{\alpha}^D \cos \vartheta \frac{\partial \ln n_{\alpha}}{\partial z} \right) d^3 v_{\alpha} = \\ &= \int_{\vartheta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_0^{+\infty} v_{\alpha} \cos \vartheta f_{\alpha}^0 \left( 1 - l_{\alpha}^D \cos \vartheta \frac{1}{n_{\alpha}} \frac{\partial n_{\alpha}}{\partial z} \right) v_{\alpha}^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dv_{\alpha} = \\ &= -\frac{e}{3} l_{\alpha}^D \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_{\alpha}}} \frac{\partial n_{\alpha}}{\partial z}, \end{aligned}$$

$$d^3 v = v^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dv,$$

мұндағы  $e=1.051$  – молекулалардың еркін жүру жолы мен жылдамдықтарын байланыстыратын сандық коэффициент.

Мұндай қарастыруларды ағынның басқа құраушыларына жүргізіп, ағын тығыздығын векторлық түрде жазамыз. Алынған өрнекті Фик заңымен салыстырып (2.4) шын диффузия коэффициентінің формуласын аламыз:

$$D_{\alpha} = \frac{1.051 \langle v_{\alpha} \rangle}{3 \sum_{\beta=1}^s n_{\beta} \pi \sigma_{\alpha\beta}^2 Y_{\alpha\beta} (1 - \Theta_{\alpha\beta})} \sqrt{1 + \frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}}},$$

$$\langle v_\alpha \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_\alpha}}$$

Бұл формуламен есептелінген нәтижелер экспериментпен жақсы үйлеседі. Ағын және диффузия коэффициентін алу схемаларын қоспаның әрбір компонентіне немесе таза газға қолдануға болады.

Қоспаның тұтқырлық коэффициентін анықтайтын формула келесі түрде жазылады:

$$\eta = \sum_{\alpha=1}^s \frac{1.051 \rho_\alpha \langle v_\alpha \rangle}{3 \sum_{\beta=1}^s n_\beta \pi \sigma_{\alpha\beta}^2 Y_{\alpha\beta} (1 - \Theta_{\alpha\beta}^2) \sqrt{1 + \frac{m_\alpha}{m_\beta}}},$$

мұндағы  $\rho_\alpha$  - парциальдық тығыздық.

Конститутивтік қатынасы Фурье заңы болатын жылу ағынын өлшеу изобарлық жағдайда өтеді, яғни қысым барлық нүктелерде бірдей. Жылу ағынының  $z$  – құраушысын осындай жағдайда анықтау үшін,  $oz$  өсіне перпендикуляр бағытта бақылау ауданшысынан өтетін молекулалар тобының энергетикалық балансын қарастырамыз. Молекулалардың бақылау ауданшасынан өтуі меншікті көлемді өзгертеді, яғни қарастыратын молекулалар тобына сәйкес ішкі энергияның өзгеруі жылу мөлшерін немесе жұмыс жасау арқылы жүреді. Изобарлық жағдайда ішкі энергияның рөлін энтальпия атқарады, сондықтан жылу ағыны энтальпия бақылау ауданшасының координатасымен салыстырғандағы артықтығы. Жұмыс көлемді өзгертуге жұмсалады, өзгеру масштабы ретінде диффузиялық транспорттық еркін жүру жолының ұзындығы  $l^D$  алынады, ішкі энергияның өзгерісі температураның өзгерісіне байланысты, ал масштаб ретінде  $l^T$  термикалық еркін жүру жолының ұзындығы алынады, сондықтан жұмыс келесі түрде анықталады:

$$m_\alpha c_{\alpha p} l_\alpha^T \cos \vartheta \frac{\partial T}{\partial z} f_\alpha^0 d^3 v_\alpha - m_\alpha c_{\alpha V} l_\alpha^D \cos \vartheta \frac{\partial T}{\partial z} f_\alpha^0 d^3 v_\alpha.$$

Сонымен өлшенетін жылу ағынының  $z$ -құраушысы үшін жазамыз:

$$Q_{\alpha z} = -m_\alpha c_{\alpha V} \frac{\partial T}{\partial z} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_0^{+\infty} l_\alpha^T \cos \vartheta (v_\alpha \cos \vartheta + W_z) f_\alpha^0 v_\alpha^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dv_\alpha -$$

$$- m_\alpha (c_{\alpha p} - c_{\alpha V}) \frac{\partial T}{\partial z} \int_{\vartheta=0}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_0^{+\infty} l_\alpha^D \cos \vartheta (v_\alpha \cos \vartheta + W_z) f_\alpha^0 v_\alpha^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi dv_\alpha$$

Интегралдау арқылы жылу ағынының беттік тығыздығының қоспаның  $\alpha$  компонентіне арналған келесі өрнекті аламыз:

$$\bar{Q}_\alpha = -\frac{1}{3} l_\alpha^D \langle v_\alpha \rangle \rho_\alpha c_{\alpha V} (A_\alpha + \gamma_\alpha - 1) \bar{\nabla} T,$$

мұндағы  $\rho_\alpha$  - парциальдық массалық тығыздық,

$c_{\alpha p}$  -  $\alpha$  - компонентінің меншікті изобарлық жылусиымдылығы,

$c_{\alpha V}$  -  $\alpha$  - компонентінің меншікті изохорлық жылусиымдылығы,

$\gamma$  - жылусиымдылықтар қатынасы,

$A_\alpha \equiv \frac{l_\alpha^T}{l_\alpha^D} = \frac{l_\alpha^n}{l_\alpha^D}$ , мұнда термикалық еркін жүру жолының ұзындығы тұтқырлық

ұзындығымен теңестірілген.

Алынған ағынды Фурье заңымен салыстыру арқылы көпкомпонентті газ қоспаларындағы жылуөткізгіштік коэффициентінің формуласын алуға болады:

$$\lambda = \sum_{\alpha=1}^s \frac{1.051 \rho_{\alpha} \langle v_{\alpha} \rangle c_{\alpha V} (A_{\alpha} + \gamma_{\alpha} - 1)}{3 \sum_{\beta=1}^s n_{\beta} \pi \sigma_{\alpha\beta}^2 Y_{\alpha\beta} (1 - \Theta_{\alpha\beta}) \sqrt{1 + \frac{m_{\alpha}}{m_{\beta}}}}$$

Бұл формула қоспалардың жылуөткізгіштік коэффициентінің концентрацияға тәуелділігін жақсы сипаттайды, сонымен қатар эксперимент нәтижелерімен жақсы үйлеседі.

Сонымен біз қарастырған кинетикалық теория көпкомпонентті газ қоспаларындағы тасымалдау коэффициенттерін сенім дәлдікпен есептеуге мүмкіндік береді.

**Өзара диффузия.** Тұйық қондырғыларда тұрақталған процесте бөлшектер ағынының векторлық қосындысы нөлге тең:

$$\vec{\Gamma}_1 = -D_1 \vec{\nabla} n_1 + n_1 \vec{W}$$

$$\vec{\Gamma}_2 = -D_2 \vec{\nabla} n_2 + n_2 \vec{W}$$

$$\vec{\Gamma}_1 + \vec{\Gamma}_2 = 0.$$

Бұл жағдай қайтымды қозғалыстың жылдамдықтары үшін, келесі өрнектерді береді:

$$\begin{aligned} \vec{\Gamma}_1 &= -D_1 \vec{\nabla} n_1 + \frac{n_1}{n_1 + n_2} (D_1 - D_2) \vec{\nabla} n_1 = \\ \vec{W} &= \frac{1}{n_1 + n_2} (D_1 - D_2) \vec{\nabla} n_1 \\ &= -[D_1 n_1 + D_2 n_2 + D_2 n_1 - D_1 n_1] \frac{n_1}{n_1 + n_2} \vec{\nabla} n_1 = -D_{12} \vec{\nabla} n_1 \end{aligned}$$

Сонымен өзара диффузия коэффициенті Мейер формуласымен сипатталады.

$$D_{12} = \frac{n_1 D_2 + n_2 D_1}{n_1 + n_2}$$

Сандық концентрациялар арқылы бұл формула келесі түрде жазылады:

$$D_{12} = x_1 D_2 + x_2 D_1.$$

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Эффективті диаметрі  $d$  молекулалардың орташа еркін жүру жолының ұзындығына арналған газдардың кинетикалық теориясының формуласы.
2. Кнудсен саны қалай енгізіледі?
3. Газдардағы тұтқырлықты не тудырады?
4. Диффузия дегеніміз не?
5. Жылу ағынын тудыратын себептер?
6. Диффузиялық ағынға арналған Фик заңы қалай жазылады?
7. Бір өлшемді процестегі  $q$  жылу ағынына арналған Фурье заңы қалай жазылады?
8. Аздау қысымдар кезіндегі газдардағы тасымалдау процестеріне кинетикалық теорияны қолдану аясы?

9. Динамикалық тұтқырлық коэффициентіне арналған газдардың кинетикалық теориясының формуласы.
10. Жылу өткізгіштік коэффициентіне арналған газдардың кинетикалық теориясының формуласы.
11. Диффузия коэффициентіне арналған газдардың кинетикалық теориясының формуласы.
12. Өзара диффузия коэффициентіне арналған Майер формуласы:
13. СИ жүйесінде диффузия коэффициенті қандай бірлікте өлшенеді?
14. Газдардағы диффузия коэффициентінің қысымға тәуелділігі?
15. Газдардағы тұтқырлық коэффициентінің қысымға тәуелділігі?

Ұсынылатын әдебиеттер

56. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1987.- 360 с.: ил.
57. Савельев И.В. Курс физики: Учебник в трех томах. Том 1: Молекулярная физика. Механика.- М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.- 352 с. : ил.
58. Трофимова Т.И. Курс физики. Учебное пособие. 8-е изд. М.: Высшая школа, 2004.— 544с.
59. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями. Учебное пособие./Трофимова, Т.И., Павлов, З.Г. 4-е изд. - М.: Высшая школа, 2003. – 591 с.
60. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Общий курс физики. Молекулярная физика.- М.: Наука, 1976.- 480 с.: ил.
61. Курлапов Л.И. Физика кинетических явлений в газах. Монография. – Алматы, – 2001. 211 с. ISBN 9965-489-81-5.

### **«Молекулалық физика» пәні бойынша**

Авторы: физ.-мат. ғылым. канд. доцент Айтқожаев Абдуает Заитович

#### **15 - ші Лекция**

Тақырыбы: Бірінші және екінші текті фазалық ауысымдар. Үш фазалы жүйе күйінің диаграммасы. Үштік нүкте.

*Лекцияның мақсаты* студенттерді фазалық ауысымдар тақырыбы бойынша теориялық және экспериментальдық ғылыми зерттеулер әдістері туралы кәсіби білімдер мен машықтарды алу.

*Негізгі қолданылатын сөздер.* ФАЗА, ҚАТТЫ ФАЗА, СҰЙЫҚ, ГАЗ, ФАЗАЛЫҚ ДИАГРАММА, ФАЗАЛЫҚ АУЫСЫМ.

Бірінші және екінші текті фазалық ауысымдар. Сұйық және газ күйлерінің арасындағы өтулерді бірінші текті фазалық ауысым деп атаймыз.

Қарастырылған сұйық-қатты дене арасындағы өзгерістер бірінші текті фазалық ауысымдарға жатады. Бірінші текті фазалық ауысымдағы қысым мен температураның арасындағы байланыс Клапейрон-Клаузиус теңдеуімен сипатталынады.

Сұйытылған гелийді қарастырғанда фазалық ауысымдардың басқа түрі кездеседі —  $\lambda$ -ауысым немесе бірінші текті фазалық ауысым. Бірінші текті фазалық ауысымдардың ерекшеліктеріне меншікті ішкі энергияның секіріспен өзгеруі және онымен байланысты өту нүктесіндегі білінбейтін ауысым жылуының болуы. Ауысым белгілі температура мен қысымда өтеді және өту процесінде екі фаза көлемде бірдей болады.

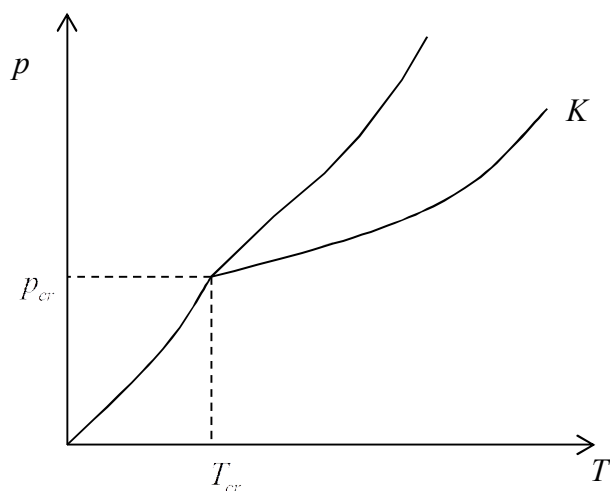
Екінші текті фазалық ауысымдар бірден барлық көлемде өтеді және міндетті түрде жүйенің симметриясының өзгеруімен байланысты. Фазалық ауысым өтетін температураны Кюри нүктесі деп аталады. Ауысым барлық көлемде өтетін болғандықтан фазалардың кеңістіктегі бөлінуі мен өзара тепе-теңдігін сақтау мүмкін емес. Екінші текті фазалық ауысым кезінде, фазалық өзгерістің жылу бөлуі немесе жұтуы жоқ. Ауысым



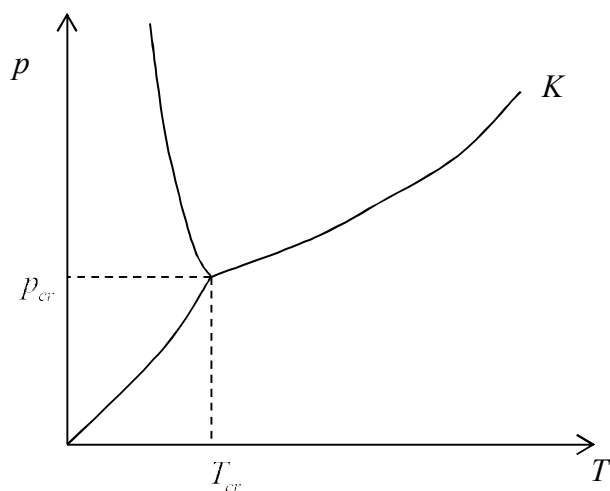
кезінде көлем өзгермейді, ал жүйенің симметриясы өзгеруіне байланысты жылусиымдылық өзгереді. Бұл дегеніміз  $\frac{dc_V}{dT}$  туындысы секіріспен өзгергенде, көлемдік ұлғаю коэффициенті қоса өзгереді.

Жүйенің симметрияның өзгеруі кристалдық симметрияны өзгертеді деп айтуға болмайды. Мысалы, ферромагниттің парамагниттік күйге көшуі кристалдық құрылымның трансформациясына әкелмейді, ал тек денедегі элементар магниттік моменттер бағдарларының кеңістіктегі өзгерумен байланысты. Металдың асқын өткізгіштік күйге өтуі және ауысым He I мен He II екінші текті ауысым түрлеріне жатады.

Заттың үш фазаларының тепе-теңдік сызығы қысым-температура координатасында фазалық диаграммалар арқылы сипатталынады. Барлық заттар нормальдық (олар өте көп) және аномальдық (оларға су жатады) түрлерге бөлінеді.



Нормальдық заттардың күй диаграммалары.



Аномальдық заттардың күй диаграммалары.

Судың көптеген маңызды ерекшеліктері фазалық ауысымдар қисығының ерекшеліктерімен байланысты.

Өзін-өзі тексеру сұрақтары

1. Клапейрон-Клаузиус теңдеуін қорыту.

2. Нормальдық заттар үшін газ-сұйық-қатты дене күй диаграммаларын суреттеу.
3. Бірінші текті фазалық ауысым дегеніміз не?
4. Аномальдық заттар үшін газ-сұйық-қатты дене күй диаграммаларын суреттеу.
5. Екінші текті фазалық ауысым.
6. Үштік нүкте дегеніміз не?
7. Термодинамикада қандай күйлер сындық күйлер деп аталады?
8. Сындық опаленценцияның туындау себебі?
9. Сұйық гелийдің ерекшеліктері қандай?