

## 2 Молекулалық физика мен термодинамика

### 2.1 Газдың молекулалық – кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі

Заттардың қасиеттерін олардың атомдардан, молекулалардан тұратындығымен және молекулалардың қозғалысын олардың өзара әсерлесуімен түсіндіретін, яғни газ молекулаларының қозғалысы жөніндегі ілім газдардың **кинетикалық теориясы** деп аталып, физиканың даму тарихындағы алатын орны үлкен. Газ молекулаларының жылдамдығына қарағанда, олардың бір - біріне тартылу күштері әлдеқайда аз болғандықтан, кинетикалық теория ол күшті ескермейді де, газ молекулаларын **еркін қозғалады** деп қарастырады.

Кинетикалық теорияның болжамында – **газ молекулалары абсолют серпімді**, олай болса молекулалардың өзара немесе ыдыс қабырғаларымен соқтығысуын серпімді соқтығысу заңымен түсіндіруге болады. Олай болса молекулалар бірқалыпты түзу сызықты қозғалады, оның жылдамдығы газдың табиғатына және температурасына тәуелді. Молекулалар өзара немесе ыдыс қабырғасымен соқтығысқанда алғашқы қозғалыс бағытын өзгертеді де, қайтадан түзу сызық бойымен қозғалады. Ол ілім бойынша газдардың молекулалары ретсіз қозғалыста болады. Газдардың тығыздығы сұйықтардың тығыздығынан мыңдаған есе аз, яғни газ молекулалары бір-бірімен соқтыққанға дейін біраз жер жүреді және соқтығысуы абсолютті серпімді.

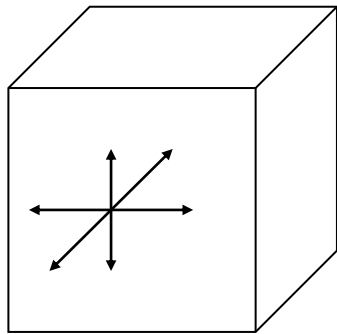
Кинетикалық теория газ молекулаларын нүкте деп есептеп, олардың көлемін ескермейді.

Молекулаларының арасындағы әсерлесу күші ескерілмейтін, молекулаларының сызықтық мөлшері шексіз аз газды **идеал** деп атайды.

Газдың ыдыс қабырғасына түсіретін қысымы молекулалардың үздіксіз өте тез соққылауынан болады. Газдың қысымы мен оның молекулаларының қозғалыс жылдамдығының арасындағы байланысты қарастырайық.

Газдың қысымы мен оның молекулаларының қозғалыс жылдамдығының арасындағы байланысты қарастырайық (2.1 - сурет).

Ол үшін қыры  $dl$  болатын текшені қарастырайық. Оның ішінде  $n$  молекула бар деп есептелсін.



2.1-сурет – Газ молекулаларының бейберекет қозғалысы

Газ молекулалары ретсіз, бейберекет қозғалатындықтан, барлық молекулалардың  $\frac{1}{3}n - i$  текшенің бергі және арғы беттері арасында, ал  $\frac{1}{3}n - i$  оң және сол беттері арасында, қалған  $\frac{1}{3}n - i$  жоғарғы және төменгі беттері арасында қозғалсын дейік.

Газдың ыдыс қабырғасына түсіретін орташа қысымын анықтау үшін белгілі бір уақыт ішіндегі барлық молекулалардың қабырғаны соққылауының импульстерін санау керек. Молекула қабырғаға перпендикуляр бағытта келіп соғылсын және соққы абсолют серпімді болсын. Сонда молекуланың қабырғаны соққандағы жылдамдағы  $\vartheta$  болса, қабырғадан кері серпілгендегі жылдамдығы  $-\vartheta$  болады. Ендеше молекуланың импульсінің өзгерісі  $m\vartheta - (-m\vartheta) = 2m\vartheta$  болады. Молекула текшенің бірінші қабырғасына қайта соғылған

кезде  $2\Delta l$  жол жүреді. Бір секундта молекула қабырғаны  $\frac{g}{2\Delta l}$  рет соққылайды. Сонда бір секунд уақыттағы импульстер қосындысы

$$\Delta f = 2m g \frac{g}{2\Delta l} = \frac{m g^2}{\Delta l} \quad (2.1)$$

Молекулалар әртүрлі жылдамдықтармен қозғалатындықтан, барлық молекулалардың текшенің бір жақ қабырғасын соққылау күші

$$f = \sum \Delta f = \frac{m g_1^2}{\Delta l} + \frac{m g_2^2}{\Delta l} + \dots + \frac{m g_n^2}{\Delta l} = \frac{m}{\Delta l} (g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_n^2)$$

(2.1) Бұл теңдіктің алымын да, бөлімін де  $n'$  көбейтіп жіберсе, онда

$$f = \frac{n' m}{\Delta l} \left( \frac{g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_n^2}{n'} \right)$$

мұндағы

$$\frac{g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_n^2}{n'} = \langle g^2 \rangle$$

орташа квадраттық жылдамдықтың квадраты, ал  $n' = \frac{n}{3}$  – ге тең.

Ендеше

$$f = \frac{nm\langle g^2 \rangle}{3\Delta l}$$

болады. Сол кезде молекулалардың қабырғаға түсіретін қысымы

$$P = \frac{f}{S} = \frac{f}{\Delta l^2} = \frac{nm\langle g^2 \rangle}{3\Delta l^3} \quad (2.2)$$

мұндағы  $\Delta l^3 = V$  – текшенің көлемі;

$\frac{n}{V} = n_0$  – бір өлшем көлемдегі молекулалардың саны.

Сонымен газ қысымы төмендегі теңдікпен анықталады:

$$P = \frac{n_0 m \langle g^2 \rangle}{3} \quad (2.3)$$

бұл өрнек молекулалық – кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі делінеді. (Бұл теңдеуді 1738 жылы Бернулли қорытып шығарды).

$\frac{m\langle g^2 \rangle}{2} = \langle E_k \rangle$  – молекулалардың орташа кинетикалық энергиясы, сондықтан (2.4) теңдікті мына түрде жазуға болады

$$P = \frac{2n_0}{3} \langle E_k \rangle \quad (2.4)$$

(2.5) теңдеудің екі жағын  $V_0$  молярлық көлемге көбейткенде

$$pV_0 = \frac{2n_0V_0\langle E_k \rangle}{3}$$

деп жазуға болады.

Газдың 1 моліндегі молекулалар саны  $N = n_0V_0$  – Авогадро саны делінеді. Ендеше

$$pV_0 = \frac{2}{3}N\langle E_k \rangle \quad (2.5)$$

Менделеев – Клапейперон теңдеуін ескеріп

$$\frac{2}{3}N\langle E_k \rangle = RT$$

бұдан

$$\langle E_k \rangle = \frac{3RT}{2N}, \quad (2.6)$$

мұндағы  $\frac{R}{N} = k$  – Больцман тұрақтысы делінеді.

$$\langle E_k \rangle = \frac{3kT}{2} \quad (2.7)$$

(2.5) формулаға (2.7) формуланы қойғанда

$$P = \frac{2n_0}{3} \frac{3kT}{2} = n_0 kT$$

(2. 7) формула бойынша

$$\frac{m\langle g^2 \rangle}{2} = \frac{3kT}{2} \quad (2. 8)$$

Бұл формуладан орташа квадраттық жылдамдықты анықтауға болады

$$\sqrt{g^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (2.9)$$

$$\sqrt{g^2} = \sqrt{\frac{3RT}{mN}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \quad (2.10)$$

Молекулалардың орташа квадраттық жылдамдығы абсолюттік температураға пропорционал болады. Молекулалардың орташа квадраттық жылдамдығының формуласы белгілі

$$\langle g^2 \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (2.11)$$

бірақ, әр жеке молекуланың жылдамдықтары әртүрлі. Сондықтан белгілі жылдамдықпен қозғалатын молекулалар санын көрсете алмаймыз.

**Идеал газ** деп молекулалардың өзара әсерлесуі ескерусіз аз шама болғанда айтады. Молекулалардың өзара әсерлесуі олардың соқтығысуы кезінде серпімді ұрылуы түрінде байқалады.

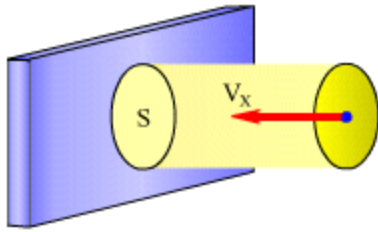
Газ молекулалары барлық уақытта ретсіз жылулық қозғалыста болады, оның мөлшерлік сипаттамасын молекуланың сызықты жылдамдығының орташа квадраты, дәлірек айтқанда, кинетикалық энергиясының орта мәні береді. Жеке молекулалардың жылдамдықтары бір-бірінен өзгеше болуы мүмкін, бірақ бұл жылдамдықтардың модулінің орташа мәні белгілі біршама. Жеке молекулалардың жылдамдықтарын  $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$  арқылы белгілейміз. Сонда, жылдамдықтардың квадратының орташа мәні келесі формуламен анықталады

$$\bar{v}^2 = \frac{\bar{v}_1^2 + \bar{v}_2^2 + \dots + \bar{v}_N^2}{N} \quad (2.12)$$

мұндағы  $N$  – газдағы молекулалардың жалпы саны.

Екінші жағынан  $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$ . Қозғалыстың бейберекеттігі әсерінен молекулалардың барлық бағыттарда орынауыстыруы тең мүмкіндікте. Сондықтан, жылдамдықтың проекциясының квадраттарының орташа мәндері өзара тең:  $\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$ . Бұны ескере отырып, алатынымыз

$$\bar{v}_x^2 = \frac{\bar{v}^2}{3} \quad (2.13)$$



2.2-сурет

Енді идеал газдың ыдыс қабырғасына әсер ететін күшін табайық. Қоршаған ортаның қандайда бір бетке әсерінің физикалық сипаттамасы – күш емес қысым болып есептеледі.

**Қысым** деп бірлік ауданға нормаль бойымен әсер ететін күшті айтады. Қысым  $p$  әрпімен белгіленіп, анықтамасы бойынша мынаған тең

$$p = F_n / S, \quad (2.14)$$

мұнда  $S$  – бет элементінің ауданы;

$F_n$  – бет элементіне перпендикуляр әсер ететін күш шамасы (2.2-сурет).

Идеал газ жағдайында  $F_n$  нормаль күштің шамасы келесі өрнекпен анықталады

$$F_n = m_0 \cdot n \cdot v_x^2 \cdot S \quad (2.15)$$



мұнда,  $n$  – газ молекуласының концентрациясы (бірлік көлемдегі молекулалар саны:  $n=N/V$ ),  $m_0$  – молекула массасы.

Бұл қатынастың қорытындысы.

Газдың барлық молекулаларда  $v_x$  жылдамдық мәні бірдей бола бермейді, олай болса қабырғаға әсер ететін күштің уақыт бойынша орта мәні  $v_x^2$  – қа емес, жылдамдықтарының орташа квадратына пропорционал:  $\bar{v}_x^2$ . (2.12)-ші формуланы ескере отырып, алатынымыз

$$F_n = n \cdot m_0 \cdot v_x^2 \cdot S / 3 \quad (2.16)$$

Анықтама бойынша

$$p = F_n / S \quad (2.17)$$

Бұдан шығатыны

$$p = n \cdot m_0 \cdot v_x^2 / 3 \quad (2.18)$$

Егер  $\bar{E}$  арқылы молекуланың ілгерлемелі қозғалысының орташа кинетикалық энергиясын белгілесек:  $\bar{E} = m_0 \bar{v}^2 / 2$ , онда (2.18) теңдеуін басқаша түрде жазуға болады

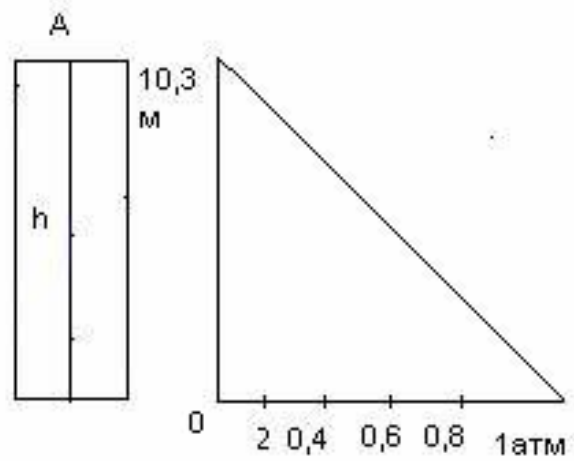
$$\bar{E} = m_0 \bar{v}^2 / 2 \quad (2.19)$$

(2.18) немесе (2.19) қатынастар газдардың молекулалық – кинетикалық теориясының негізгі теңдеулері болып табылады. Олар, тікелей өлшенетін, макроскоптық шама – **қысымды** қозғалыстағы молекулаларды сипаттайтын микро параметрлармен байланыстырады.

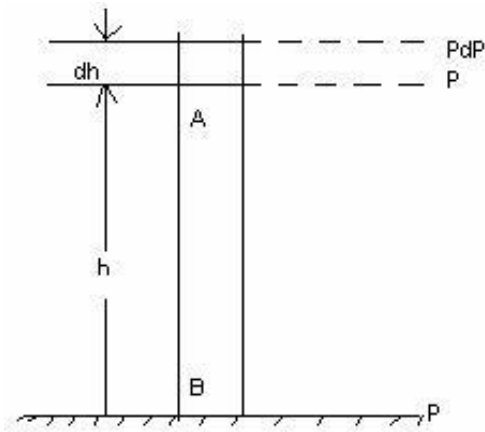
### **Барометрлік формула**

Газдардың молекула – кинетикалық теориясының негізгі теңдеуін қорытқанда газ молекуласына сыртқы күш әсер етпейді, сондықтан да газ молекулалары барлық көлемге біркелкі таралған деп қарастырдық. Бірақ кез-келген газдың молекуласын Жердің потенциалдық өрісі тартады. Осы тартылыстың, әрі молекулалардың жылулық қозғалысының салдарынан газ қысымы биіктік артқан сайын азаяды.

Тартылыс өрісін біртекті, температура тұрақты, барлық молекулалардың массалары бірдей деп алып, қысым мен биіктік арасындағы байланысты қорыталық, егер сұйықты (мысалы суды) тік цилиндр формалы ыдысқа құйсақ, онда оның ыдыс түбіне түсіретін қысымы сұйық бағанының биіктігіне пропорционал болады. Айталық су бағанының биіктігі  $h=10,3\text{м}$  болсын, онда сұйықтың еркін бетімен ( $A$ ) түбінің арасындағы қысым айырымы  $1\text{ атм.}$  тең (2.3-сурет).



2.3-сурет



2.4-сурет

Ал газдар үшін бұл орындалмайды. Газдардың сығылғыштығының салдарынан оның тығыздығы тереңдігіне пропорционал артады да, олай болса газ бағанының (биіктігінің) бойында тығыздық біркелкі болмайды. Сондықтан сұйықтарда қолданылатын қысымның биіктікке пропорционал таралуының сызықтық заңы газдарға қолданылмайды. Жер бетінен  $h$  биіктіктегі атмосфера қабатын қарастырайық; жер бетіндегі қалыпты қысым

$P_0 = 10330 \text{ кг/м}^2$  кезінде ауаның тығыздығы ( $0^\circ\text{C}$  кезінде)  $\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$  (2.4-сурет).

Ал  $h$  биіктікте қысым  $P_1$ , тығыздық  $\rho$ . Биіктік  $h$  – қа артқанда қысым  $dP$ -ға кемиді, оны

$$dP = -\rho g dh \quad (2.20)$$

Осы  $h$  биіктікте температура тұрақты деп санап *Бойль Мариотт* заңы бойынша

$\frac{P_k}{P_0} = \frac{V_0}{V_k} = \frac{\rho}{\rho_0}$ ,  $\rho = \frac{P_{hk}}{P_0} \rho_0$  жазамыз. Тығыздықтың осы мәні (2.19) формуласына қойсақ

$$dP = \frac{P_k}{P_0} \rho_0 g dh \quad \frac{dP}{P_k} = \frac{\rho_0 g}{P_0} dh \quad (2.21)$$

Соңғыны 0-ден  $P_{II}$  және 0-ден  $h$ -қа дейін интегралдасақ:

$$\int_0^{P_k} \frac{dP}{P_k} = -\frac{\rho_0 g}{P_0} \int_0^h dh \ln \frac{P_k}{P_0} = \frac{\rho_0 g}{P_0} h \quad \text{бұдан } P_k = P_0 e^{-\frac{\rho_0 g h}{P_0}} \quad (2.22)$$

Мұны барометрлік формула деп атайды, ол арқылы  $h$  биіктіктегі атмосфераның қысымын есептеуге болады.  $E$ -нің көрсеткіші тұрақты, есептесек онда  $P_h = P_0 e^{-0.127h}$  шығады.

Сөйтіп, барометрлік қысым мен биіктік арасындағы байланысты (2.22) формуласы арқылы есептейміз. Керісінше, барометрлік формула арқылы қысымның кемуіне қарап жер бетінен биіктіктің шамасын немесе биіктіктер айырымын табуға болады. Осы принципке негізделген құрал – альтиметрдің авиацияда ролі зор. Барометрлік формуланы қорытқанда  $T = const$  деп алдық, шындығында  $T = const$  олай болса қысымның өзгеруі температураға тәуелді.