

ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
ФИЗИКА-ТЕХНИКАЛЫҚ ФАКУЛЬТЕТІ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ
ЖӘНЕ ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА КАФЕДРАСЫ

«6B0504 – Физика» мамандығы үшін

(MF 1202) «Молекулалық физика» пәні бойынша
семинар жүргізуге арналған

ӘДІСТЕМЕЛІК НҰСҚАУ

I. Идеал газ заңдары

1. Негізгі формулалар

Бойль-Мариотт заңы: $PV = const.$ (1.1)

Гей-Люссак заңы: $\frac{V}{T} = const.$ (1.2)

Шарль заңы: $\frac{P}{T} = const.$ (1.3)

Газ күйінің біріккен заңы:

$$\frac{PV}{T} = const. \quad (1.4)$$

P - газдың қысымы, V - көлемі, ал T - оның абсолюттік температурасы.

Идеал газ күйінің негізгі теңдеуі:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT. \quad (1.5)$$

m - газдың массасы, μ - оның молярлық массасы,

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ - әмбебап (универсал) газ тұрақтысы.

Әртүрлі бір-бірімен химиялық әсерлеспейтін газ қоспасының қысымы Дальтон заңымен анықталады:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i. \quad (1.6)$$

$P_1, P_2 \dots P_n$ - қоспаны құрайтын газдардың парциаль қысымдары. Қоспа газ үшін идеал газ күйінің негізгі теңдеуі мына түрде өрнектеледі:

$$PV = \left\{ \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right\} RT$$

немесе

$$PV = \frac{m}{\bar{\mu}} RT, \quad (1,7)$$

мұндағы $m = m_1 + m_2 + \dots + m_n$ газдың массасы. Ол қоспаны құрайтын компоненттердің массаларының қосындысымен анықталады. Қоспаның мольдік массасы $\bar{\mu}$ мына формуламен сипатталады:

$$\bar{\mu} = \left\{ \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n} \right\} = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\mu_i}}. \quad (1.8)$$

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер.

1.1. Идеал газ заңдарына арналған есептерді шартты түрде мынадай үш топқа бөліп қарастыруға болады:

a) біртекті идеал газдардың күйін сипаттайтын параметрлердің берілгендері арқылы белгісіздерін анықтау. Мұндай есептерді шығаруда идеал газ күйінің негізгі теңдеуі (Клапейрон-Менделеев теңдеуі) мен заңдары тікелей қолданылады.

b) өзара әсерлеспейтін идеал газ қоспаларындағы белгісіз параметрлерді, газдардың кинетикалық теориясының негізгі теңдеулерін, Клапейрон-Менделеев және Дальтон заңдарын пайдаланып анықтауға арналған есептер.

с) берілген параметрлері арқылы идеал газдың термодинамикалық коэффициенттерін анықтауға арналған есептер. Бұл кезде жоғарыда келтірілген физикалық шамалардың, яғни, күй параметрлерінің (P, V, T, m, μ) өзгерістерінің арасындағы өзара байланыстар пайдаланылады.

1.2. Жоғарыдағы формулалар (1.1) - (1.5) тек сиретілген, яғни, ($P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}; T = 273 \text{ К}$) қалыпты күйдегіден айырмашылықтары онша көп болмайтын газдар үшін ғана қолданылады.

1.3. Газ күйінің негізгі теңдеуі (1.5), оның күйін сипаттайтын мынадай бес физикалық шамаларды (P, V, T, m, μ) байланыстырады және олардың берілген төртеуі арқылы бесіншісін анықтауға мүмкіндік береді. Ескерте кету керек:

$\nu = \frac{m}{\mu}$ моль санын береді, ал $\rho = \frac{m}{V}$ газдың тығыздығын

сипаттайды. Олай болса, газ күйінің негізгі теңдеуінен (1.5) оның тығыздығын анықтайтын өрнек алынады:

$$\rho = \frac{\mu \cdot P}{RT}.$$

1.4. Оқулықтарда, физикалық есептер шығару барысында жиі пайдаланатылатын қысымның халықаралық жүйе және одан тыс өлшем бірліктері арасындағы қатынастар мына түрде жазылады.

$$1 \text{ атм.} = 760 \text{ мм с.б.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$1 \text{ ат} = 1 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2} = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Көп жағдайда, есептеулер барысында 1 атм. (физикалық атмосфера) мен 1 ат. (техникалық атмосфера) арасындағы аз ғана айырмашылықты ескермеуге болады.

3. Есеп шығару үлгілері.

1.1. Ішіндегі ауа $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ температураға дейін қыздырылған, көлемі $8 \cdot 10^{-6}\text{ м}^3$ шыны ыдыстың температурасын $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ға төмендететін болса, оған қанша сынап сыйған болар еді?

Берілгені:

$$V_1 = 8 \cdot 10^{-6}\text{ м}^3, T_1 = 673\text{ К},$$

$$T_2 = 289\text{ К}, \rho_c = 13,6 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$T/\text{К}.. \quad m - ?$$

Шешімі: Шыны ыдыстың салқындауы оның ішіндегі қысымның төмендеуіне әкеледі. Бұл сынаптың ыдысқа, ондағы газ қысымы сыртқы, яғни, бастапқы қысыммен теңескенше, енуін қамтамасыз етеді. Аталған процесс изобарлық процесс болғандықтан, оның ішіне енген сынаптың массасы мына формула бойынша анықталады.

$$m = \rho \cdot \Delta V, \quad (1)$$

мұндағы ρ - сынаптың тығыздығы, ал $\Delta V = V_1 - V_2$ - ыдыстағы газ көлемінің өзгерісі. Шыны ыдыстағы ауаның Кельвин шкаласы бойынша өрнектелген бастапқы және соңғы температуралары белгілі. Олай болса, белгісіз шаманы анықтау үшін, изобарлық процесті сипаттайтын Гей-Люссак заңы пайдаланылады:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2)$$

(2) формуланы, $V_2 = V_1 - \Delta V$ екендігін ескеріп шешу арқылы, ΔV көлем айырмашылығы анықталады:

$$\Delta V = V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right), \quad (3)$$

ал (3) өрнекті (1) формулаға қою арқылы ыдысқа құйылған сынаптың массасын анықтайтын өрнек алынады:

$$m = \rho \cdot V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (4)$$

Осы алынған формулаға кіретін шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу арқылы ізделініп отырған масса анықталады:

$$m = 13.6 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{289}{673} \right) = 0.062 \text{ кг}.$$

1.2. Бір ұшы тұйықталған, ұзындығы 70 см шыны түтіктің ішіндегі ауаны, биіктігі 20 см сынап бағанасы жауып тұр (1.1-сурет). Шыны түтікті ашық жағымен вертикаль төмен аударған кездегі онда қалған сынаптың биіктігін анықтаңдар. Ауаның атмосфералық қысымын 690 мм с. б. тең деп санаңдар.

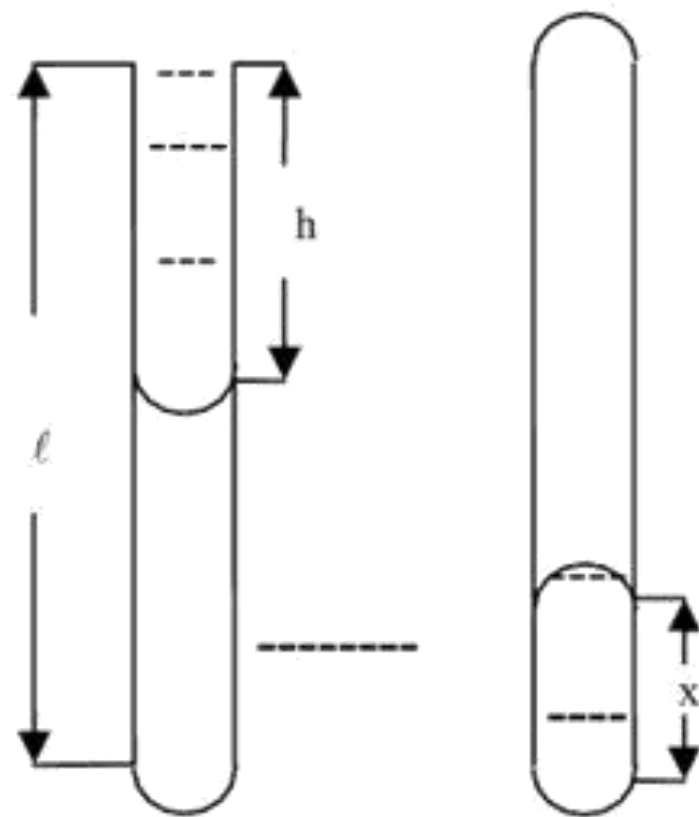
Берілгені:

$$h = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}.$$

$$l = 70 \text{ см} = 0,7 \text{ м}.$$

$$H = 690 \text{ мм. с. б.} = 0,69 \text{ м}.$$

$$\text{Т/к.: } x - ?$$



1.1- сурет.

Шешімі: Түтіктің ашық жағы жоғары қарап тұрған жағдайда, оның ішіндегі ауаның алып тұрған көлемі V_1 мен қысымы P_1 былай анықталады:

$$V_1 = (l - h)S, \quad P_1 = H + h, \quad (1)$$

мұнда S - түтіктің көлденең қимасының ауданы, ал H - атмосфералық қысым.

Түтіктің ашық жағы төмен қараған жағдайда, оның ішінде қалған ауаның алатын көлемі V_2 және оның қысымы P_2 мына өрнектер арқылы табылады:

$$V_2 = (l - x)S, \quad P_2 = H - x. \quad (2)$$

Бойль-Мариотт заңы бойынша

$$P_1 V_1 = P_2 V_2. \quad (3)$$

(3) теңдеудегі физикалық шамалардың орнына олардың (1) және (2) формулалардағы мәндерін қою арқылы түтікте қалған сынаптың биіктіктің x табуға мүмкіндік беретін өрнек алынады:

$$(l - h)S \cdot (H + h) = (l - x)S(H - x), \quad (4)$$

және

$$x = \frac{H + l}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(H + l)^2 - 4h(H + h - l)}, \quad (5)$$

мұндағы екінші түбір еленбейді, себебі, $x > l$ болған жағдайда оның физикалық мағынасы болмайды. (5) формулаға кіретін шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер ізделіндіні береді:

$$\begin{aligned} x &= \frac{0,69 + 0,7}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(0,69 + 0,7)^2 - 4 \cdot 0,2(0,69 + 0,2 - 0,7)} = \\ &= 0,03 \text{ м.} \end{aligned}$$

1.3. Көлденең қимасының ауданы 5 см^2 газ құбыры арқылы қысымы $4 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температурасы 7°C көмір қышқыл газы (CO_2) ағып тұр (1.2-сурет). Құбырдан 8 минут ішінде ағып өткен 2 кг газдың жылдамдығын анықтаңдар.

Берілгені:

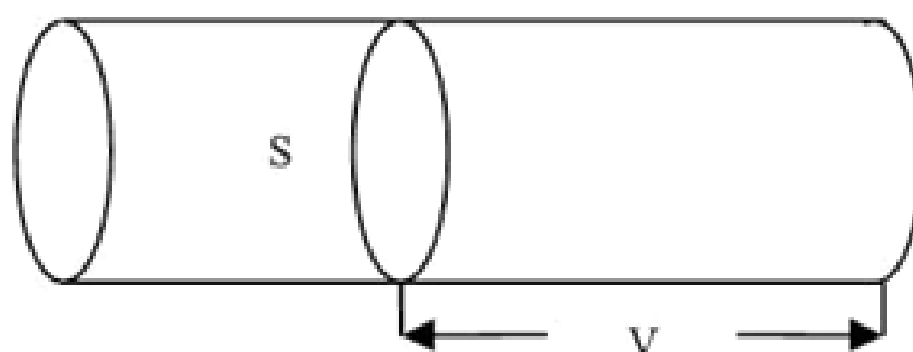
$$P = 4 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$T = 300 \text{ К},$$

$$m = 2 \text{ кг}, \quad \tau = 480 \text{ с}.$$

$$S = 5 \text{ см}^2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$T/\text{к}: \mathcal{G} - ?$$



1.2- сурет

Шешімі: 1 с ішінде, көлденең қимасының ауданы S құбыр арқылы, көлемі V көмір қышқыл газы ағып өтеді. Олай болса, 1.2 -суретке сәйкес, оның жылдамдығы \mathcal{G} мына формуламен анықталады:

$$\mathcal{G} = \frac{V}{S}. \quad (1)$$

Ал, дәл сол уақыт ішіндегі ағып өткен газдың көлемі Клапейрон-Менделеев теңдеуі арқылы анықталады:

$$V = \frac{mRT}{\mu P \tau}. \quad (2)$$

Мұнда $\mu = 0,044 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ - көмірқышқыл газының мольдік массасы. (2) формуланы (1) теңдеуге қою арқылы құбырдағы газ жылдамдығын анықтайтын өрнек алынады:

$$\mathcal{G} = \frac{mRT}{\mu P S \tau}. \quad (3)$$

Соңғы формулаға кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер ізделіндіні береді:

$$g = \frac{2 \cdot 8.31 \cdot 280}{0.044 \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 480} \approx 1,1 \text{ м/с.}$$

1.4. Қоспа газ 160 г оттектен және 80 г азоттан тұрады деп есептеп, оның мольдік массасын анықтаңдар?

Берілгені:

$$m_1 = 160 \text{ г} = 0,16 \text{ кг},$$

$$\mu_1 = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}},$$

$$m_2 = 80 \text{ г} = 0,08 \text{ кг},$$

$$\mu_2 = 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

$$T/\text{к}: \mu - ?$$

Шешімі: Идеал газдарға, химиялық біртекті, сиретілген газдар ғана емес, бірнеше әртүрлі газдардан құралған қоспалар да жатады. Мұндай араласқан газ қоспаларының күйін Клапейрон-Менделеев теңдеуі арқылы анықтау үшін, физикалық тұрғыда мағынасы жоқ, салыстырмалы молекулалық масса ұғымы пайдаланылады. Қоспаның, осы салыстырмалы молекулалық массаға тең граммен алынған мөлшері, оның мольдік массасы μ деп аталады. Сонда, қоспа газдар үшін Клапейрон - Менделеев теңдеуі былай жазылады:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{немесе} \quad P = \frac{mRT}{\mu V}. \quad (1)$$

Берілген есепті шығару үшін, қоспа орналасқан көлемдегі әрбір газ компоненті үшін, жеке-жеке күй теңдеуі жазылады. Біздің жағдайда, қоспа екі газдан құралған, олай болса, берілген оттектен пен азоттың парциал қысымдары (1) теңдеу арқылы табылады:

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu_1} RT, \quad P_1 = \frac{m_1 RT}{\mu_1 V}, \quad (2)$$

$$P_2 V = \frac{m_2}{\mu_2} RT, \quad P_2 = \frac{m_2 RT}{\mu_2 V}. \quad (3)$$

Дальтон заңы бойынша қоспа газдың қысымы P оны құрайтын оттегі мен азоттың парциаль қысымдарының (P_1 және P_2) қосындысына тең:

$$P = P_1 + P_2, \quad (4)$$

(1), (2), (3) теңдеулердің соңғыларын (4) теңдеуге қою арқылы мынадай өрнек алынады:

$$\frac{mRT}{\mu V} = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right) \frac{RT}{V}. \quad (5)$$

(5) теңдеуден қоспа газдың жалпы массасы $m = m_1 + m_2$ екендігі ескеріліп, оның салыстырмалы мольдік массасы анықталады:

$$\frac{m_1 + m_2}{\mu} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}, \quad (6)$$

немесе

$$\mu = \frac{\mu_1 \mu_2 (m_1 + m_2)}{\mu_1 m_2 + \mu_2 m_1}. \quad (7)$$

(7) формулаға кіретін шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу қоспаның мольдік массасын береді:

$$\mu = \frac{0.032 \cdot 0.028(0.16 + 0.08)}{0.032 \cdot 0.08 + 0.028 \cdot 0.16} \approx 0.031 \text{ кг/моль}.$$

1.5. Температурасы T және қысымы P газ құйылған, сыйымдылығы V баллонды өлшегенде, оның салмағы F шамаға тең болған. Содан кейін, тұрақты температурада, баллондағы газды сору арқылы, оның қысымын P_1 - ге дейін төмендеткен. Бұл кездегі оның салмағы F_1 -ге теңелген. Газдың қалыпты жағдайдағы ($T_0 = 273K$, $P_0 = 10^5 Pa$) тығыздығын анықтаңдар?

Берілгені:

$$V, T, P, F, P_1, F_1, T_0, P_0.$$

$$T/\text{к}: \rho_0 - ?$$

Шешімі: Газ күйінің негізгі теңдеуінен P_0 қысым мен T_0 температурадағы газдың тығыздығы былай анықталады:

$$P_0 V = \frac{m}{\mu} RT_0, \quad \rho_0 = \frac{P_0 \cdot \mu}{RT_0} \quad (1)$$

Бос баллонның салмағы F_0 - ге тең болсын. Бұл кезде газдың бірінші күйдегі массасы $(F - F_0)/g$, ал оның екінші жағдайдағы массасы $(F_1 - F_0)/g$ формулаларымен анықталады. Бұл күйлер үшін Клапейрон-Менделеев теңдеуі мына түрде жазылады:

$$PV = \frac{F - F_0}{\mu g} RT, \quad P_1 V = \frac{F_1 - F_0}{\mu g} RT, \quad (2)$$

осыдан

$$(P - P_1)V = \frac{F - F_1}{\mu g} RT, \quad \text{ал} \quad \frac{\mu}{R} = \frac{F - F_1}{P - P_1} \frac{T}{gV}. \quad (3)$$

(3) теңдеудің соңғысын (1) теңдеуге қойып түрлендіру арқылы газдың қалыпты жағдайдағы тығыздығын анықтайтын өрнек былай сипатталады:

$$\rho_0 = \frac{F - F_1}{P - P_1} \frac{P_0 T}{g V T_0} \quad (4)$$

1.6. Сынаппен ластанған, температурасы 20°C бөлмедегі ауаның 1 см^3 көлемінде қанша сынап молекуласы бар? Ауадағы сынап буының парциаль қысымы $0,645\text{ Па}$ шамаға теңдеп санаңдар.

Берілгені.

$$T = 293\text{ К},$$

$$V = 1\text{ см}^3 = 10^{-6}\text{ м}^3,$$

$$P_c = 0,645\text{ Па}.$$

Т/к: $n - ?$

Шешімі: Есептің мазмұнында берілген шарттан бөлмедегі ауаның температурасы мен қысымы, оның қалыпты жағдайдағы мәндеріне жақын екендігі көрінеді. Олай болса, ауаны жуық түрде, Дальтон заңын қолдануға болатын, идеал газ қоспасы деп санауға болады.

Енді берілген V көлемдегі сынап буының жалпы массасы m , ал мольдік массасы μ . Осылардан сынап буы құралатын молекулалар саны N мына формуламен анықталады:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A \quad (1)$$

$\frac{m}{\mu}$ - қатынасы сынаптың буы үшін жазылған газ күйінің негізгі

теңдеуі арқылы табылады:

$$P_c \cdot V = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{немесе} \quad \frac{m}{\mu} = \frac{P_c V}{R \cdot T} \quad (2)$$

(1) және (2) теңдеулерді біріктіріп шешу бөлмедегі сынап буын құрайтын молекулалардың жалпы санын анықтайтын формуланы береді:

$$N = \frac{m}{\mu} N_A = \frac{P_c V N_A}{RT} = \frac{P_c V}{kT}.$$

(3) Осыдан, бірлік көлемдегі сынап молекулаларының саны, оның концентрациясы, (3) өрнекті бөлменің көлеміне бөлу арқылы анықталады. Яғни:

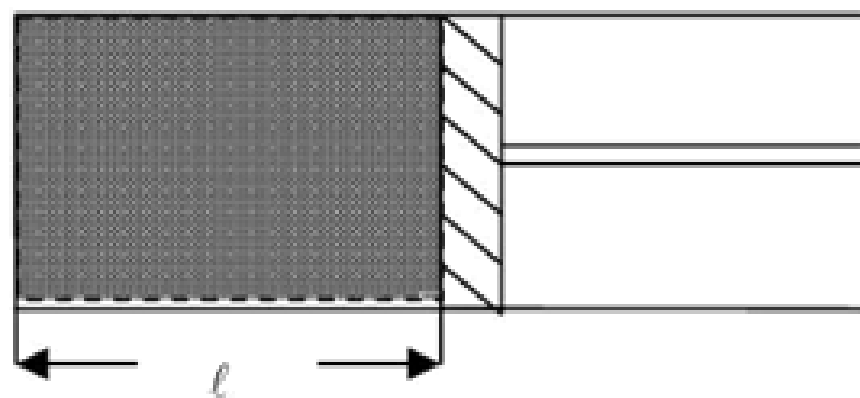
$$n = \frac{N}{V} = \frac{P_c}{kT}. \quad (4)$$

(4) формуладағы физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер арқылы бөлменің бірлік көлемдегі сынап молекулаларының саны табылады:

$$n = 1,78 \cdot 10^{14} \text{ см}^3 = 1,78 \cdot 10^{20} \text{ м}^3.$$

4. Жаттығуға арналған есептер.

1.1. Цилиндрдегі поршеньді сол жаққа $\frac{1}{5} l$ қашықтыққа жылжытқан кезде, оның ішіндегі қысым қанша есе өзгереді? Оңға қарай $\frac{1}{3} l$ ұзындыққа жылжытқан жағдайда ше? (1.3 - сурет).



1.3- сурет.

Жауабы: 1,25 есе артады; 1,33 есе кемиді.

1.2. Газды жайлап сығу арқылы оның көлемін 6 литрден 4 литрге дейін кеміткен кезде оның қысымы $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ шамаға артқан. Газдың бастапқы қысымы қанша болғанын анықтаңдар?

Жауабы: $P = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.3. Цилиндрдегі көлемі 240 см^3 , ал қысымы 10^5 Па ауа, табанының ауданы 12 см^2 жылжымалы поршеньмен тепе-теңдікте тұр. l (1.3 -сурет). Поршенді солға қарай 4 см, ал оңға қарай 2 см жылжытқан кездегі оны қозғалтпай ұстап тұратын күштер неге тең?

Жауабы: $F_1 = 30 \text{ Н}; F_2 = 11 \text{ Н}$.

1.4. Көл түбінен су бетіне қалқып шыққан газ көпіршігінің көлемі 2 есе артқан. Көлдің тереңдігі неге тең?

Жауабы: $l = 10 \text{ м}$.

1.5. Көлемі 500 см^3 электр шамы қысымы $0,8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ азотпен толтырылған. Шамды өте аз тереңдікте суға батырып тесетін болса, оған судың қанша көлемі енетінін анықтаңдар. Атмосфералық қысым $P_0 = 1,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Жауабы: $V_c = 120 \text{ см}^3$.

1.6. Ұзындығы 60 см екі жағы да ашық шыны түтіктің $\frac{1}{8} l$ бөлігі сынапқа батырылған. Егер, түтікті, үстіңгі жағын жауып, сынаптан шығаратын болса, оның ішінде қалған сынап бағанасының биіктігі қаншаға тең болар еді? Атмосфералық қысымды 760 мм с. б. тең деп санаңдар.

Жауабы: $h = 12,3 \text{ см}$.

1.7. Көлемі 4 есе артуы үшін, тұрақты қысымдағы ($P = \text{const}$), температурасы 7°C ауаны қандай температураға дейін қыздыру керек?

Жауабы: $T = 1120 \text{ К}$.

II. Газдардың молекулалы-кинетикалық теориясы

1. Негізгі формулалар

Газдардың молекулалы-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі:

$$P = \frac{2}{3} n_0 \bar{W}. \quad (2.1)$$

Мұнда n_0 – молекулалардың концентрациясы - бірлік көлемдегі молекулалардың саны, $\bar{W} = \frac{m \bar{g}_{кв}^2}{2}$ - молекулалардың ілгерілемелі қозғалысының орта кинетикалық энергиясы.

Газ қысымының температураға және молекулалар концентрациясына байланыстылығы мына формуламен өрнектеледі:

$$P = nkT. \quad (2.2)$$

Молекулалардың орта квадрат жылдамдығы мына формуламен анықталады:

$$\bar{g}_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (2.3)$$

Бұл жерде $k = \frac{R}{N_A} = \frac{8,31}{6,02 \cdot 10^{23}} \text{ Джс / К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Джс}}{\text{К}}$ -

Больцман тұрақтысы, ал N_A - Авогадро саны, бір моль затты құрайтын молекулалар саны, R - әмбебап газ тұрақтысы.

Молекулалардың ілгерілемелі және айналмалы қозғалыстарының орта кинетикалық энергиясы мына өрнек арқылы сипатталады:

$$\bar{W} = \frac{i}{2} \kappa T . \quad (2.4)$$

Кезкелген газ массасының ішкі энергиясын анықтайтын формула былай жазылады:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT . \quad (2.5)$$

Мұнда i - молекулалардың еркіндік дәрежелер саны.

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер

2.1. Бұл тақырыпқа арналған есептер мынадай топтарға бөлінеді:

a) газдардың кинетикалық теориясының негізгі теңдеуін пайдалануға және молекулалардың концентрациясын анықтауға арналған есептер. Бұл кезде, ішкі еркіндік дәрежелер санын ескеретін, берілген молекулалық сипаттамалар арқылы газдың температурасы мен қысымы анықталады ;

b) молекулаларының орта квадрат жылдамдығын және соның негізінде, газдың қысымын, тығыздығын анықтауға арналған есептер;

c) газдың толық ішкі кинетикалық энергиясын, оның молекулаларының ілгерілемелі және айналмалы қозғалыстарының энергиясын анықтауға арналған есептер. Бұл есептерді шығару барысында идеал газдарға арналған молекулалы-кинетикалық теорияның негізгі теңдеуі, еркіндік дәрежелеріне сәйкес энергияның тепе-тең таралу заңы және т.б. пайдаланылады.

2.2. Кинетикалық теория, газдарды бейберекет қозғалыстағы өте көп бөлшектердің-молекулалардың жиыны ретінде қарастырады, сондықтан, ол статистикалық теория болып саналады.

2.3. Газдың кинетикалық теориясының негізгі теңдеуі идеал газдар үшін ғана дұрыс, себебі, оны қорытып шығару барысында молекулалардың өзара әсерлесу күштері есепке алынбаған.

2.3. Дененің немесе бөлшектің еркіндік дәрежелер саны деп, олардың кеңістіктегі орнын анықтауға мүмкіндік беретін тәуелсіз координаталар санын айтады. Бір атомды газ молекулалары үшін $i = 3$, екі атомды газдар үшін $i = 5$, ал үш және көп атомды газдар үшін $i = 6$.

2.2. Орта квадрат жылдамдық, қайсыбір квадрат жылдамдыққа пропорционал физикалық шамаларды, мысалы, газ қысымын, молекулалардың ілгерілмелі қозғалысының орта кинетикалық энергиясын есептеулер кезінде пайдаланылады.

3. Есеп шығару үлгілері.

2.1. Көлемі 10^{-4} м^3 ыдыста оттектің $4 \cdot 10^{20}$ молекуласы бар. Егер оттек молекулаларының орта квадрат жылдамдығы $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ болса, олар ыдыс қабырғасына қанша қысым түсіреді?

Берілгені:

$$V = 10 \text{ м}^3, N = 4 \cdot 10^{20} \text{ молекула},$$

$$\bar{g}_{\text{кв}} = 500 \text{ м/с}.$$

$$\text{T/к: } P - ?$$

Шешімі: Идеал газдардың молекулалы-кинетикалық теориясының негізгі теңдеуін (2.1) пайдаланамыз:

$$P = \frac{2}{3} n \bar{W} = \frac{1}{3} m_0 \bar{g}_{\text{кв}}^2 \cdot n. \quad (1)$$

Мұндағы m_0 - бір молекуланың массасы.

Заттың мольдік массасы мен Авогадро санының негізінде оттектің бір молекуласының массасы былай анықталады:

$$m_0 = \frac{\mu}{N_A}. \quad (2)$$

Мұнда $\mu = 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ - оттектің мольдік массасы. Ал ыдыстағы молекулалардың жалпы саны мына өрнек арқылы табылады:

$$N = n \cdot V, \quad (3)$$

бұл жерде $n = \frac{N}{V}$ - бірлік көлемдегі молекулалар саны, яғни, концентрациясы.

Осы табылған m_0 және n мәндерін (1) формулаға қою арқылы газ қысымын анықтайтын өрнек алынады:

$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{\mu \bar{\mathcal{E}}_{\text{кв}}^2}{N_A} \cdot \frac{N}{V}. \quad (4)$$

Соңғы формулаға кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып, есептеулер оттектің ыдыс қабырғасына түсіретін қысымын береді:

$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{0,032 \cdot 25 \cdot 10^4}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{4 \cdot 10^{20}}{10^{-4}} = 1,77 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

2.2. Ішкі диаметрі $d = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м}$, формасы сфера тәріздес шыны ыдыста қысымы $0,1 \text{ мм с.б.}$, температурасы 187°C азот бар және оның ішкі бетінде адсорбцияланған азоттың мономолекулалық қабаты бар. Адсорбцияланған азоттың

III. Идеал газдың статистикасы.

1. Негізгі формулалар.

Молекулалардың жылдамдықтары бойынша таралу заңы (Максвелл заңы): салыстырмалы жылдамдықтары u мен $u + \Delta u$ аралығында жататын газ молекулалардың саны ΔN мына формуламен анықталады:

$$\Delta N = N \cdot f(u) \Delta u, \quad (3.1)$$

мұнда N - газды құрайтын молекулаларының жалпы саны, ал олардың жылдамдықтары бойынша Максвелл тағайындаған таралу функциясы мына формуламен сипатталады:

$$f(u) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot u^2 e^{-u^2} \quad (3.2)$$

Бұл жерде $u = \frac{g}{g_{\text{ык}}}$ - молекулалардың салыстырмалы жылдамдығы,

g - молекулалардың берілген жылдамдығы,

$g_{\text{ык}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$ - газ молекулалардың ықтимал жылдамдығы.

Есептеулерде, молекулалардың орта арифметикалық және орта квадрат жылдамдықтары анықталатын төмендегі формулалар да жиі пайдаланылады:

$$\bar{g} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad \bar{g}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}. \quad (3.3)$$

Таралу функциясын (3.1) өрнекке қою арқылы берілген жылдамдықтар аралығында қозғалатын газ молекулаларының санын анықтайтын формула алынады:

$$\Delta N = N \cdot 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \bar{g}^2 \exp\left(-\frac{m\bar{g}^2}{2kT} \right) \Delta \bar{g}, \quad (3.4)$$

бұл өрнекті молекулалардың салыстырмалы жылдамдықтары арқылы мына түрге келтіріп жазуға болады:

$$\Delta N = N \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} u^2 e^{-u^2} \Delta u. \quad (3.5)$$

Жер бетінен жоғарылаған сайын биіктікке байланысты газ қысымының кему заңдылығын сипаттайтын формула Лапластың барометрлік формуласы деп аталады:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT} \right) = P_0 \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT} \right). \quad (3.6)$$

Мұнда P - жер бетінен h биіктіктегі газдың қысымы, ал P_0 оның теңіз деңгейі бойынша есептелген, $h = 0$ биіктіктегі қысымы, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ - еркін түсу үдеуі.

Жердің тартылыс өрісінде молекулалардың потенциалдық энергияларына сәйкес таралуы, яғни, Больцман заңы мына формуламен өрнектеледі:

$$n = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{m_0 g h}{kT} \right) = n_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT} \right). \quad (3.7)$$

Бұл жерде n - газдың Жердің бетінен h , ал n_0 - оның $h = 0$ биіктіктердегі концентрациялары.

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер

3.1. Бұл тақырыпқа арналған есептерді шартты түрде мынадай топтарға бөлуге болады:

a) молекулалардың орта квадрат, ықтимал және арифметикалық жылдамдықтарын анықтауға арналған есептер.

b) молекулалардың жылдамдықтары бойынша Максвеллше таралу заңын пайдаланып шығаруға арналған есептер.

c) биіктікке байланысты атмосфералық қысымның кему заңдылығын сипаттауға арналған есептер.

d) Жердің тартылыс өрісіндегі молекулалар қозғалысының сипаттамаларын Больцманның таралу заңының негізінде анықтауға арналған есептер.

3.2. Орта арифметикалық жылдамдық, газдың қасиеттерін сипаттайтын физикалық шамалардың орта шамасын анықтайтын жылдамдықтың бірінші дәрежесі кіретін, мысалы, молекулалардың орташа импульсын анықтайтын формулаларда қолданылады. Ықтимал жылдамдықты молекулалар жылдамдықтарының таралып орналасу заңдарын пайдаланатын есептерде қолданады. Бұл жылдамдыққа таралып орналасу функциясының ең жоғары мәні, яғни, (3.2) формула сәйкес келеді.

3.3. Жердің тартылыс өрісіндегі ауа молекулалардың Больцманша таралу заңы негізінде потенциалды күш өрісінің сипаттамаларын анықтауға болады.

3.4. Максвелл заңы, тек қана идеал газдар үшін дұрыс, себебі, оны қорытып шығаруда молекулалардың ара қашықтықтарына сәйкес өзара әсерлесу күштері есепке алынбаған және олар серпімді шарлар сияқты соқтығысады деп қарастырылған. Сондықтан, (3.4), (3,5) және соған қатысты формулалар онша қатты сығылмаған, сирек газдар мен булар үшін қолданылады.

3.5. Максвеллше таралу заңы молекулаларының жылдамдықтары кіші интервалмен ΔU сипатталатын газдар үшін, яғни,

$\Delta v \ll v$ теңсіздігі орындалғанда ғана дұрыс нәтиже береді. Молекулалардың жылдамдықтарының үлкен аралықтары үшін (3.4) формула дифференциалдық түрге келтіріліп жазылады, содан кейін оның оң жағынан u_1 - ден u_2 - ге дейін интеграл алынады. Осыдан жылдамдықтары $\Delta u = u_2 - u_1$ аралығында жататын молекулалардың жалпы саны анықталады.

$\Delta u = \frac{\Delta \mathcal{G}}{\mathcal{G}_{\text{ык}}}$ - салыстырмалы жылдамдықтың өзгерісі.

3. Есеп шығару үлгілері

3.1. Қысымы 500 мм с.б. , тығыздығы $0,4 \frac{\text{г}}{\text{л}}$ газ молекулаларының орта арифметикалық және ықтимал жылдамдықтарын табыңдар?

Берілгені:

$$P = 500 \cdot 133,3 \text{ Па.}$$

$$\rho = 0,4 \frac{\text{г}}{\text{л}} = 0,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

$$\text{T/K: } \bar{\mathcal{G}} - ?, \mathcal{G}_{\text{ык}} - ?$$

Шешімі: орта арифметикалық және ықтимал жылдамдықтар мына өрнектер арқылы анықталады:

$$\bar{\mathcal{G}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad \mathcal{G}_{\text{ык}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}. \quad (1)$$

Бұл жылдамдықтарды табу үшін газдың температурасы белгілі болуы тиіс. Ол үшін газ күйінің негізгі тендеуі пайдаланылады:

$$PV = \frac{m}{\mu}RT, \quad T = \frac{\mu \cdot P}{\rho \cdot R}. \quad (2)$$

Мұндағы $\rho = \frac{m}{V}$ - газдың тығыздығы. (1)

формулаларға температураның өрнегін (2) және оған кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу іздеген жылдамдықтарды береді:

$$\bar{g} = \sqrt{\frac{8P}{\pi\rho}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 500 \cdot 133,3}{3,14 \cdot 0,4}} = 650 \frac{M}{c};$$

$$\bar{g}_{\text{ык}} = \sqrt{\frac{2P}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 500 \cdot 133,3}{0,4}} = 579 \frac{M}{c}.$$

3.2. Температурасы $127^{\circ}C$ -дағы сутек молекулаларының қанша бөлігінің орта арифметикалық жылдамдықтары $2184 \frac{M}{c}$ және $2190 \frac{M}{c}$ аралықтарында жатады. Сутектің

мольдік массасы $\mu = 2 \cdot 10^{-3} \frac{Kz}{\text{моль}}$.

Берілгені:

$$T = 127^{\circ}C = 400K.$$

$$\bar{g}_1 = 2184 \frac{M}{c}, \quad \bar{g}_2 = 2190 \frac{M}{c}.$$

$$T/K: \quad \Delta N / N - ?$$

Шешімі: Жылдамдық интервалы аз шама болғандықтан Максвеллдің таралу заңын (3.4) пайдалануға болады:

$$\Delta N = N \cdot \frac{4}{\sqrt{\pi}} u^2 e^{-u^2} \Delta u \quad (1)$$

IV. Газдардағы тасымалдау құбылыстары.

1. Негізгі формулалары.

Бір өлшем уақыт ішіндегі әр молекуланың басқа молекулалармен орта соқтығысу саны:

$$\bar{z} = \sqrt{2} \pi \sigma^2 n \bar{g}, \quad (4.1)$$

σ - молекуланың эффективті диаметрі, n - молекулалардың концентрациясы, $\bar{g} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$ - молекулалардың орта арифметикалық жылдамдығы. Бірлік көлемдегі барлық молекулалардың бір өлшем уақыттағы жалпы соқтығысу саны:

$$Z = \frac{1}{2} \bar{z} n. \quad (4.2)$$

Молекуланың орта еркін жол ұзындығы мына формуламен өрнектеледі:

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{g}}{\bar{z}} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n}. \quad (4.3)$$

Диффузия есебінен X осі бағытымен ΔS аудан арқылы Δt уақыт ішінде ауысатын заттың массасы былай табылады (Фик заңы):

$$\Delta M = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \Delta S \Delta t, \quad (4.4)$$

мұнда $D = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{g}$ - диффузия коэффициенті, $\frac{\Delta \rho}{\Delta x}$ - тығыздық градиенті.

Газ арқылы Δt уақыт мезетінде ауысатын импульс, оның екі әртүрлі жылдамдықпен қозғалып келе жатқан қабаттарының арасындағы ішкі үйкеліс күшін (F) анықтауға мүмкіндік береді:

$$F = -\eta \frac{\Delta \mathcal{G}}{\Delta x} \Delta S. \quad (4.5)$$

$\eta = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{\mathcal{G}} \rho$ - ішкі үйкеліс коэффициенті (динамикалық тұтқырлық), $\frac{\Delta \bar{\mathcal{G}}}{\Delta x} - \Delta S$ ауданға перпендикуляр бағыттағы газ ағынының жылдамдық градиенті.

Фурье заңы бойынша ΔS аудан арқылы Δt уақыт ішінде ауысатын жылу мөлшерін мына өрнек арқылы анықтауға болады:

$$\Delta Q = -\chi \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \Delta t. \quad (4.6)$$

$\chi = \frac{1}{3} \bar{\lambda} \bar{\mathcal{G}} \rho c_V$ - газдардың жылу өткізгіштік коэффициенті. ρ - газдың тығыздығы, c_V - оның меншікті жылу сыйымдылығы, ал $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ - температуралық градиент.

2. Әдістемелік нұсқаулар мен есептеулер.

4.1. Бұл тақырыпқа арналған есептерді шартты түрде мынадай топтарға бөлуге болады:

а) молекулалардың өзара соқтығысу санын және еркін жол ұзындығын, яғни, молекулалардың газокинетикалық параметрлерін анықтауға арналған есептер.

б) $\Delta M, \Delta F, \Delta Q$ шамаларын немесе нақты тасымалдау процестерінің белгісіз сипаттамаларын анықтауға арналған есептер.

с) диффузия D , жылу өткізгіштік χ , тұтқырлық η коэффициенттерін және олардың арасындағы байланыстарды анықтауға арналған есептер.

d) қиыстырылған есептер.

4.2. Диффузия, ішкі үйкеліс (динамикалық тұтқырлық) және жылу өткізгіштік коэффициенттерінің арасындағы байланыстар мына өрнектер арқылы анықталады:

$$\eta = \rho \cdot D, \quad \chi = D \rho c_v = \eta c_v, \quad \frac{\chi}{\eta} = c_v.$$

4.3. Жоғарыдағы тасымалдау құбылыстарын сипаттайтын формулалардың барлығында орта арифметикалық жылдамдық \bar{v} пайдаланылады.

4.4. Молекулаларының өлшемдері әртүрлі, екі газдың (мысалы, оттегі мен азоттың) арасында диффузия құбылысы орын алғандағы жүргізілген есептеулерде олардың молекулаларының, төмендегі өрнекпен анықталатын, орта эффективті диаметрі пайдаланылады:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}.$$

4.5. $\Delta M, \Delta F, \Delta Q$ мәндерін анықтайтын формулалардың алдындағы минус (-) таңбалар масса - тығыздықтың, импульс – жылдамдықтың және жылу мөлшері - температураның кему бағытымен тасымалданатындығын көрсетеді.

3. Есеп шығару үлгілері

4.1. Көлемі $0,25 \text{ л}$ ыдыстағы оттегі қалыпты жағдайда тұр. Осы көлемдегі 1 с ішіндегі оттегі молекулаларының арасындағы жалпы соқтығысу санын анықтаңдар. Оттегі молекуласының эффективті диаметрі $3 \cdot 10^{-10} \text{ м}$.

Берілгені: $V = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3, t = 1 \text{ с}$.

$\sigma = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}, T = 273 \text{ К}, P = 10^5 \text{ Па}$.

Т/к: $Z = ?$

Шешімі: Газ молекуласының 1с. ішіндегі басқа молекулалармен соқтығысу саны (4,1) формуламен анықталады. Олай болса, 1 м^3 көлемдегі молекулалар санын n деп белгілесек, онда берілген көлемдегі 1 с ішіндегі жалпы соқтығысу саны мына формуламен анықталады: $Z = \frac{1}{2} \bar{z} n$.

Бұл өрнектің оң жағындағы бөлшектің бөліміндегі 2 саны әр соқтығысу екі молекула арқылы жүзеге асатынын көрсетеді. Осыдан, (4,1) формуланы пайдалану арқылы жалпы соқтығысу санын анықтайтын өрнек мына түрде жазылады:

$$Z = \frac{\bar{g} \cdot n}{2\bar{\lambda}} V = 2 \sqrt{\frac{\pi RT}{\mu}} \cdot \left(\frac{\sigma P}{kT} \right)^2 \cdot V, \quad (1)$$

мұнда

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{g}}{\bar{z}} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n}, \quad \bar{g} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$$

және, сонымен қатар, $n = \frac{P}{kT}$ екендіктері ескерілген.

(1) формулаға кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу арқылы молекулалардың жалпы соқтығысу саны анықталады:

$$Z = 2 \sqrt{\frac{3,14 \cdot 8,31 \cdot 273}{0,032}} \left(\frac{3 \cdot 10^{-10} \cdot 10^5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273} \right)^2 = 1,5 \cdot 10^{31} \frac{1}{\text{с}}$$

4.2. Диффузия құбылысының негізінде 5 минут ішінде 150 см^2 аудан арқылы ауысатын азоттың массасын табу керек. Ауданға перпендикуляр бағыттағы газдың тығыздық градиентін $1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$, температурасын 27°C , ал оның молекулаларының орта еркін жол ұзындығын 10^{-7} м деп санаңдар.

V. Термодинамиканың бірінші бастамасы.

1. Негізгі формулалар.

1. Термодинамиканың бірінші бастамасы – энергияның сақталу және айналу заңы - жүйеге берілген жылу мөлшері оның ішкі энергиясын өсіруге және өзін қоршаған сыртқы күштерге қарсы жұмыс жасауға жұмсалады:

$$Q = \Delta U + A. \quad (5.1)$$

Q - жүйеге берілген жылу мөлшері, $\Delta U = C_V dT$ – оның ішкі энергиясының өзгерісі, $A = P \Delta V$ – жүйенің сыртқы күштерге қарсы жасайтын жұмысы.

2. Бір моль және кезкелген масса идеал газдың ішкі энергиялары:

$$U_\mu = \frac{i}{2} RT = C_V T, \quad (5.2)$$

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT = \frac{m}{\mu} C_V T. \quad (5.3)$$

Мұнда i – газ молекулаларының орнын анықтауға мүмкіндік беретін координаталар жиыны, бөлшектің еркіндік дәрежелер саны деп аталады.

3. Молярлық жылу сыйымдылық бір моль затты бір кельвинге қыздыруға қажетті жылу мөлшерімен анықталады:

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{dQ}{dT} = \frac{\mu}{m} \frac{dQ}{dT}, \quad (5.4)$$

Бұл жерде $\nu = \frac{m}{\mu}$ - мольдер саны.

4. Заттың бірлік массасын бір кельвинге қыздыруға қажетті жылу мөлшері, оның меншікті жылу сыйымдылығы деп аталады:

$$c = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} = \frac{C}{\mu}. \quad (5.5)$$

5. n компоненттен құралатын қоспа газдың мольдік және меншікті жылу сыйымдылықтары мынаған тең:

$$C_{\kappa} = \frac{C_1 \nu_1 + C_2 \nu_2 + \dots + C_n \nu_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n},$$

$$c = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n m_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}. \quad (5.6)$$

6. Газдың тұрақты көлемдегі мольдік және меншікті жылу сыйымдылықтары мына формулалармен өрнектеледі:

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_V = \frac{i}{2} R; \quad c_V = \frac{C_V}{\mu} = \frac{i}{2} \frac{R}{\mu}. \quad (5.7)$$

7. Газдың тұрақты қысымдағы мольдік және меншікті жылу сыйымдылықтары мына өрнектермен сипатталады:

$$C_P = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_P = \frac{i+2}{2} R; \quad c_P = \frac{C_P}{\mu} = \frac{i+2}{2} \frac{R}{\mu}. \quad (5.8)$$

8. Газдың тұрақты қысымдағы мольдік жылу сыйымдылығы оның тұрақты көлемдегі мольдік жылу сыйымдылығынан әмбебап газ тұрақтысына тең шамаға артық. Ол былай өрнектеледі және Майер формуласы деп аталады:

$$C_P - C_V = R. \quad (5.9)$$

9. Газдың ұлғая отырып сыртқы күштерге қарсы атқаратын жұмысы:

a) изобаралық процесте ($P = const, dP = 0$) мына өрнек арқылы анықталады:

$$A = P(V_2 - V_1), \quad (5.10)$$

b) изотермиялық процесс кезінде ($T = const, dT = 0$), газдың ішкі энергиясы өзгермейдіктен, төмендегі формуламен сипатталады:

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (5.11)$$

c) изохоралық процесте ($V = const, dV = 0$) газдың ұлғая отырып атқаратын жұмысы нөлге тең ($A = 0$). Бұл кезде газға берілген жылу мөлшері түгелде $Q = dU$ және оның ішкі энергиясын өсіруге жұмсалады ($Q = dU$).

10. Пуассон теңдеулері:

$$PV^\gamma = const; \quad TV^{\gamma-1} = const; \quad TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}, \quad (5.12)$$

бұл жерде $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{c_P}{c_V}$ - газдың адиабаталық көрсеткіші деп аталады.

11. Адиабаталық процесте, қоршаған ортамен жылу алмасу жүрмейтіндіктен, идеал газдың сыртқы күштерге қарсы атқаратын жұмысы оның ішкі энергиясының кемуі есебінен жасалады және мына формулалармен есептеледі:

$$a) \quad A = -\Delta U = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2); \quad (5.13)$$

$$b) \quad A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]. \quad (5.14)$$

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер.

5.1. Бұл тақырыпқа арналған есептерді шартты түрде төрт топқа бөлуге болады:

a) әртүрлі процестердегі газдардың мольдік және меншікті жылу сыйымдылықтарын, сонымен қатар, берілген газдың жылу сыйымдылықтарының C_V мен C_P қатынастарының негізінде, газдың қайсыбір сипаттамаларын анықтауға арналған есептер;

b) әртүрлі айнымалыларда аналитикалық түрде берілген процестердің графигін тұрғызуға, осы кездегі идеал газдың ішкі энергиясының өзгерісі, ұлғаю жұмысын, оның алған немесе оған берілген жылу мөлшерлерін анықтауға арналған есептер. Бұл кезде берілген квазистатикалық процестің ауысуын сипаттайтын аналитикалық теңдеулер, идеал газ күйінің негізгі теңдеуі, ішкі энергияның температураға тәуелділігі және т.б. пайдаланылады.

c) PV диаграммада берілген циклдың сипаттамаларын табуға арналған есептер. Мұнда: жұмыстық дененің күй теңдеуінің; циклдың бөліктеріне жазылған теңдеулердің; термодинамиканың бірінші бастамасын изопрцестерге қолдану арқылы циклдың бөлігінде жасалатын жұмысты, ішкі энергия өзгерісін, берілген жылу мөлшерін анықтайтын формулалардың негізінде жасалатын энергетикалық есептеулер әдісі қолданылады.

d) адиабаталық процестерде атқарылатын жұмысты анықтауға және Пуассон теңдеулерін қолдануға арналған есептер;

5.2. Есеп шығаруды бастамас бұрын газдағы жүріп жатқан процестің сипаты, яғни, оның изобаралық, изохоралық, изотермиялық немесе адиабаталық процестердің қайсысына жататыны анықталуы тиіс.

5.3. Изотермиялық ұлғаю және сығылу процестерінде газ бен оны қоршаған орта арасында жылу алмасу мейлінше қарқынды жүреді. Сондықтан, біріншіден, газы бар ыдыстың

қабырғалары жылуды өте жақсы өткізуі керек және процесс өте баяу жүруі тиіс. Адиабаталық ұлғаю мен сығылуларда жылу алмасу болмайды. Бұл кезде газбен толтырылған ыдыстың қабырғалары жылуды өте нашар өткізуі керек немесе процесс мейлінше тез жүруі тиіс.

5.4. Изохоралық және изобаралық процестерде газға берілетін жылу мөлшері барлық уақытта температура өзгерісімен қабат жүреді. Бұл екеуі де оң шамалар болғандықтан жылу мөлшері мен температураның өзгеру таңбалары үнемі сәйкес келіп отырады, яғни:

1. $dT > 0$ болса $dQ > 0$;
2. $dT < 0$ болса $dQ < 0$.

5.5. Изотермиялық және адиабаталық процестер кезінде температура мен жылу мөлшерінің арасында байланыс жоқ. Бірінші жағдайда, процесте газға жылу берілгенімен, немесе одан жылу алынғанымен, жүйеде температураның өзгерісі болмайды ($dT = 0$). Ал екіншісінде, газдың температурасы өзгергенімен, ол сыртқы ортамен жылу алмаспайды ($dQ = 0$).

3. Есеп шығару үлгілері

5.1. 5 кмоль көп атомды газ 13°C -дан 163°C -ға дейін қыздырылған. Еркін ұлғаяды деп санап, газға берілген жылу мөлшерін, оның ішкі энергиясының өзгерісі мен ұлғаю кезіндегі атқарған жұмысын анықтаңыздар.

Берілгені:

$$\frac{m}{\mu} = 5 \text{ кмоль. } i = 6.$$

$$T_1 = 286 \text{ K, } T = 436 \text{ K.}$$

$$\text{T/к: } Q - ?, \Delta U - ?, A - ?$$

Шешімі: 1. Газдың ішкі энергиясының өзгерісі

$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$ формуласын пайдалану арқылы анықталады.

Мұндағы $\Delta T = T_2 - T_1$ екенін ескеріп және өрнекке кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер ізделіндіні табуға мүмкіндік береді:

$$\Delta U = \frac{6}{2} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 8,31 \cdot (436 - 286) \approx 1,87 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

2. Газдың ұлғаю жұмысы $A = P \Delta V$ формуласымен сипатталады. Осыған сәйкес, изохоралық процесс үшін Клапейрон-Менделеев теңдеуі былай жазылады:

$$P \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T .$$

Олай болса, ұлғаю кезіндегі газдың атқаратын жұмысы мына формуламен анықталады:

$$A = \frac{m}{\mu} R \Delta T .$$

Соңғы өрнекке кіретін шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу арқылы газдың ұлғаю жұмысы табылады:

$$A = \frac{m}{\mu} R \Delta T = 5 \cdot 10^3 \cdot 8,31 \cdot 150 \approx 6,23 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

3. Термодинамиканың бірінші заңы бойынша газға берілген жылу мөлшері, оның ішкі энергиясының өзгерісі мен ұлғаю жұмысының қосындысына тең:

$$Q = \Delta U + A = 1,87 \cdot 10^7 + 6,23 \cdot 10^6 \approx 2,49 \cdot 10^7 \text{ Дж.}$$

VI. Термодинамиканың екінші бастамасы.

1. Негізгі формулалар.

Жылу машинасының пайдалы әсер коэффициенті

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}. \quad (6.1)$$

Мұнда A - жұмыстық заттың бір цикл ішіндегі жасаған жұмысы, Q_1 – қыздырғыштан алынған жылу мөлшері, Q_2 – суытқышқа берілген жылу мөлшері.

Идеал жылу машинасының пайдалы әсер коэффициенті мынаған тең:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6.2)$$

T_1 және T_2 - қыздырғыш пен суытқыштың абсолюттік температуралары.

Энтропия қазіргі ғылымдағы ең іргелі, әмбебап ұғым. Ол нақты процестерде сақталмайды, не өседі, не кемиді. Термодинамикада энтропия дифференциалы мына өрнекпен анықталады:

$$dS = \int \frac{dQ}{T} = \frac{dU + A}{T}. \quad (6.3)$$

Бұл формула тұйықталған жүйелер үшін дұрыс. Термодинамикалық теорияда, дене бір күйден екіншісіне өткенде, энтропия өзгерісі Клаузиус теңсіздігімен сипатталады:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \geq 0. \quad (6.4)$$

Бір моль және кезкелген масса жүйе үшін термодинамиканың негізгі теңдеуі былай өрнектеледі:

$$dS = \frac{C_V dT + PdV_\mu}{T} = \frac{\frac{m}{\mu} C_V dT + PdV}{T}. \quad (6.5)$$

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер.

1. Термодинамиканың екінші бастамасына арналған есептерді шартты түрде төрт топқа бөлуге болады.

a) идеал және реал жылу машиналарының пайдалы әсер коэффициентін анықтауға арналған есептер;

b) изопроцестер мен адиабаталық процесс кезіндегі энтропияның өзгерісін табуға арналған есептер;

c) бірінші түрдегі фазалық айналулар кезіндегі энтропияның өзгерісін табуға негізделген есептер;

d) PV және TS диаграммаларда кескінделген циклдердің сипаттамаларын, тиімділіктерін және термодинамикалық қатынастарды анықтауға арналған есептер.

2. (6.2) формуласымен сипатталатын теңдік Карноның идеал циклімен жұмыс істейтін машиналар үшін дұрыс.

3. Егер жүйе бастапқы күйден соңғы күйге бірнеше, тізбектеле жүретін процестер арқылы көшсе, онда толық энтропия, оның жеке процестердегі өзгерістерінің алгебралық қосындысына тең болады.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots + \Delta S_i. \quad (6.5)$$

4. Карно циклымен жұмыс жасайтын идеал жылу машинасы мен реал циклдың пайдалы әсер коэффициенттерінің арасында мынадай қатынас бар:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6.6)$$

Бұл жерде теңдік қайтымды процестер үшін, ал теңсіздік қайтымсыз процестер үшін дұрыс. Демек, идеал Карно циклының ПӘК-і реал циклдікінен барлық жағдайда жоғары болады.

5. Циклдің сипаттамаларын табуға арналған есептерді шығаруда мынадай алгоритмді ұстанған тиімді:

a) есептің мазмұнында берілмесе, машинаның түрін (жылу, тоңазытқыш) анықтап алу керек;

b) толық цикл ішінде жұмыстық дененің қыздырғыштан қанша жылу мөлшерін алғанын, осы кездегі оның атқарған жұмыстың толық мәні анықталуы тиіс;

c) циклдің әр сатысындағы жұмыстық дененің қанша жылу алғанын немесе бергенін білу қажет;

d) толық цикл ішіндегі жұмыстық денеден қыздырғыштан суытқышқа ауысқан жылу мөлшері анықталуы тиіс;

e) машинаның пайдалы әсер немесе тоңазытқыш коэффициенттері қандай?

3. Есеп шығару үлгілері

6.1. Карно циклы арқылы жұмыс істейтін идеал жылу машинасының бір цикл ішінде атқаратын жұмысы $7,35 \cdot 10^4$ Дж. Егер оның қыздырғышының температурасы 100°C , ал тоңазытқышыныңкі 0°C болса, машинаның пайдалы әсер коэффициенті (П.Ә.К.) неге тең? Осы кездегі қыздырғыштан алынған және тоңазытқышқа берілген жылу мөлшерлерін анықтаңдар.

Берілгені:

$$A = 7,35 \cdot 10^4 \text{ Дж} .$$

$$T_1 = 100^\circ \text{C} = 373 \text{ K} .$$

$$T_2 = 0^\circ \text{C} = 273 \text{ K} .$$

$$T/\text{к}: \quad \eta - ?, Q_1 - ?, Q_2 - ?$$

Шешімі: 1. Карно циклымен жұмыс істейтін идеал жылу машинасының П.Ә.К.-тің (6.1) формуласына сәйкес төмендегі өрнекпен сипаттауға болады:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (1)$$

Осы формулаға кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер арқылы машинаның П.Ә.К.-ті табылады:

$$\eta = \frac{373 - 273}{373} = 26,8\%.$$

2. Жалпы түрде реал жылу машиналарының П.Ә.К.-ті мына формуламен сипатталаы:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1}. \quad (2)$$

Осыдан

$$Q_1 = \frac{A}{\eta} = \frac{7,35 \cdot 10^4}{0,268} \approx 2,735 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

3. (2) формуладан $A = Q_1 - Q_2$ екендігі көрінеді. Бұдан

$$A = 2,735 \cdot 10^5 - 0,735 \cdot 10^5 = 2 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

6.2. Қуаты $14,7 \cdot 410^3 \text{ Вт}$ бу машинасы бір сағат ішінде жылу шығарғыштық қабілеті $q = 3,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, массасы $8,1 \text{ кг}$ көмір пайдаланады. Қазанда пайда болған будың температурасы 473 К , ал тоңазытқыштың температурасы 331 К . Осы бу машинасының пайдалы әсер коэффициентін, берілген температуралар аралығында Карно циклымен жұмыс істейтін, идеал бу машинасының П.Ә.К.-мен салыстырыңдар.

Берілгені:

$$N = 14,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}, \quad m = 8,1 \text{ кг.}$$

$$q = 3,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}, \quad t = 3600 \text{ с.}$$

$$T_1 = 473 \text{ К}, \quad T_2 = 331 \text{ К.}$$

$$T/\text{к}: \quad \eta_1 - ?, \quad \eta_2 - ?$$

Шешімі: Бу машинасының пайдалы әсер коэффициенті (6.1) формулаға сәйкес былай жазылады:

$$\eta_1 = \frac{A}{Q} = \frac{N \cdot \tau}{q m}. \quad (1)$$

Мұнда атқарылған жұмыс, қозғалтқыштың қуаты мен уақыттың көбейтіндісі арқылы анықталады, ал толық энергия 8,1 кг көмір жанған кездегі бөлініп шығатын жылу мөлшеріне тең.

(1) формулаға кіретін шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу бу машинасының пайдалы әсер коэффициентін береді:

$$\eta_1 = \frac{N \cdot \tau}{q m} = \frac{14,7 \cdot 10^3 \cdot 3600}{8,1 \cdot 3,3 \cdot 10^7} = 0,2 \cdot 100\% = 20\%.$$

Идеал бу машинасының пайдалы әсер коэффициенті мына өрнек арқылы анықталады:

$$\eta_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{473 - 331}{473} = \frac{142}{473} = 0,3 \cdot 100\% = 30\%.$$

Алынған нәтижелерді салыстырудан Карно циклімен жұмыс істейтін бу машинасының пайдалы әсер коэффициентінің көп болатыны байқалады.

6.3. Массасы 12 кг тас 36 м биіктен жерге бастапқы жылдамдықсыз құлаған. Қоршаған орта мен тастың

VII. Реал газдар

1. Негізгі формулалар

Реал газдардың ішкі энергиясы мына өрнек арқылы анықталады:

$$U = C_V T - \frac{a}{V}. \quad (7.1)$$

Бір моль реал газға арналған Ван-дер-Ваальс теңдеуі былай өрнектеледі:

$$\left(P + \frac{a}{V_\mu^2} \right) (V_\mu - b) = RT, \quad (7.2)$$

мұнда V_μ - бір моль газдың көлемі, a - газ молекулаларының арасындағы өзара тартылыс күшін ескеретін тұрақты, ал b - молекулалардың арасындағы, олардың алып тұрған көлемдеріне сәйкес, тебіліс күштерін есепке алатын тұрақты. Кезкелген, массасы m газға арналған Ван-дер-Ваальс теңдеуі былай анықталады:

$$\left(P + \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT. \quad (7.3)$$

Бұл жерде $\frac{m}{\mu}$ - мольдер саны, $V = \frac{m}{\mu} V_\mu$ - газдың көлемі.

Газдардың тегіне байланысты әртүрлі мәндерге ие болатын Ван-дер-Ваальстың b тұрақтысы мына формуламен сипатталады:

$$b = 4\nu N_A = \frac{2}{3} \pi \sigma^3 N_A. \quad (7.5)$$

Мұнда ν - бір молекуланың көлемі, N_A - Авогадро тұрақтысы, σ - газ молекуласының эффективті диаметрі.

Бір моль газ үшін кризистік күй параметрлерінің Ван-дер-Ваальс тағайындаған a және b тұрақтыларымен, байланысы мына формулалармен өрнектеледі:

$$T_k = \frac{8a}{27bR}; \quad V_k = 3b; \quad P_k = \frac{a}{27b^2}. \quad (7.5)$$

Мұндағы V_k - бір моль газдың, кризистік қысымдағы (P_k) және кризистік температурадағы (T_k) көлемі.

Бір моль газ үшін келтірілген түрдегі Ван-дер-Ваальс теңдеуі мына формуламен сипатталады:

$$\left(\pi + \frac{3}{\omega^2} \right) (3\omega - 1) = 8\tau. \quad (7.6)$$

$$\pi = \frac{P}{P_k}, \quad \omega = \frac{V_0}{V_k}, \quad \tau = \frac{T}{T_k} \quad - \text{реал газдың қысымының,}$$

көлемінің, температурасының келтірілген мәндері. Соңғы кездері реал газдың күйі қысым $1/V$ жіктелетін бейсызық теңдеумен сипатталады:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{B}{V^2} + \frac{C}{V^3} + \dots \quad (7.7)$$

Бұл жерде $B, C \dots$ эксперимент арқылы анықталатын тұрақтылар боып табылады.

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер

1. Реал газдар тақырыбына арналған есептерді шартты түрде мынадай топтарға бөлуге болады:

a) реал газ күйлерін сипаттайтын параметрлердің берілгендері арқылы белгісіздерін Ван-дер-Ваальс теңдеуін пайдаланып анықтауға және оларды, осы шарттарда, идеал газ күйінің негізгі теңдеуін қолданып табылған мәндермен салыстыруға және талдауға арналған есептер;

в) Ван-дер-Ваальс газының ұлғаюы (сығылуы) кезіндегі атқарылған жұмыстарды, бөлінген (жұтылған) жылу мөлшерін және оның бос кеңістікке ұлғаюындағы температурасының өзгерісін анықтауға арналған есептер. Сонымен қатар, мұнда берілген күй параметрлерінің негізінде Ван-дер-Ваальс газының жылу сыйымдылықтары мен ішкі энергияларын табуға бағытталған есептер де қарастырылады;

с) Ван-дер-Ваальс тұрақтылары мен кризистік күйге сәйкес параметрлерін анықтауға арналған есептер. Бұл кезде келтірілген шамалармен өрнектелген газ күйінің теңдеуі және кризистік параметрлер мен Ван-дер-Ваальс тұрақтыларының арасындағы байланысты сипаттайтын формулалар пайдаланылады;

д) Джоуль-Томсон құбылысы кезіндегі газ күйін сипаттайтын параметрлердің белгісіздерін анықтауға арналған қиыстырылған есептер. Мұнда жоғарғы топтарға кіретін есептерді шығаруда қолданылатын барлық әдіс-тәсілдер, заңдар мен заңдылықтар түгелімен пайдаланылады.

2. Тығыздығы аз - сиретілген газдар үшін, яғни, мынадай $V_{\mu} \gg b$ шарт орындалғанда, Ван-дер-Ваальс теңдеуі мына түрде жазылады:

$$PV_{\mu} = \frac{RTV_{\mu} - a}{V_{\mu}}.$$

3. Бұл бөлімде температурасы, оның кризистік температурасынан біршама жоғары, реал газдарда жүретін процестер қарастырылады.

4. Газда жүретін құбылыстарды және процестерді зерттеуге арналған есептердің мазмұнында қандай газдың қарастырылатыны көрсетілуі тиіс. Егер, ол көрсетілмеген жағдайда, газдың идеал немесе реал газға жататынын анықтап алудың мынадай жолдары бар: *а*) есепте қарастырылатын газдың тығыздығын, қысымы мен температурасын оның қалыпты жағдайдағы мәндерімен салыстыру арқылы анықталады. Егер аталған параметрлердің (ρ, P, T) сан мәндері бір-біріне жақын болса, ол идеал газ деп саналады және

есептегі белгісіз шамаларды анықтау үшін Клапейрон-Менделеев теңдеуі пайдаланылады. Кері жағдайда, яғни, аталған екі газдың күйін анықтайтын параметрлердің айырмашылықтары көп болса, оны реал газға жатқызады, ал есепті шығаруда Ван - дер - Ваальс теңдеуін пайдаланады; *b*) газдың идеал немесе реал газға жататындығын, оның қарастырылатын есептің мазмұнында келтірілген көлемі мен қалыпты жағдайдағы молярлық көлемдерін салыстыру арқылы да анықтау онша қиындық келтірмейді. Ескерте кетейік, қалыпты жағдайдағы бір моль газдың көлемі $V_{\mu} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

3. Есеп шығару үлгілері

7.1. Бір моль аргонның $T = 300 \text{ К}$ температурадағы көлемі $V = 1 \text{ л}$. Осы газдың қысымын мынадай шарттарда анықтаңдар: *a*) берілген күйде аргонды идеал газ ретінде қарастырыңдар; *b*) молекулалар көлемін ескеретін Ван-дер-Ваальс тұрақтысы $b = 0$ болсын; *c*) газ молекулаларының арасындағы өзара әсерлесу күшін ескеретін Ван-дер-Ваальс тұрақтысы $a = 0$ болсын; *d*) осы екі тұрақтыны да ескеріңдер. Аргон үшін

$$a = 0,13 \frac{\text{м}^6 \text{Па}}{\text{моль}^2}, \quad b = 0,03 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}.$$

Берілгені:

$$\frac{m}{\mu} = 1 \text{ моль},$$

$$T = 300 \text{ К},$$

$$V = 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$T/\text{к} \quad P_1 - ?, P_2 - ?, P_3 - ?, P - ?$$

Шешімі: *a)* бірінші жағдайда, газ қысымын анықтау үшін, есепте қойылған шартқа байланысты идеал газ күйінің негізгі теңдеуі пайдаланылады:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{немесе} \quad P = \frac{mRT}{\mu V}. \quad (1)$$

Жоғарыдағы формуланың соңғысына, ондағы физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулерден, идеал газ ретінде саналған, аргонның қысымы анықталады:

$$P_1 = \frac{mRT}{\mu V} = \frac{8,31 \cdot 300}{10^{-3}} = 24,93 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

b) Екінші жағдай үшін молекуланың көлеміне қатысты түзеткіш $b = 0$. Олай болса, Ван-дер-Ваальс теңдеуі (7.3), қарастырылатын газдың мөлшері $\frac{m}{\mu} = 1 \text{ моль}$ екендігі ескеріліп, мына түрге келтіріліп жазылады:

$$\left(P + \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT$$

немесе

$$\left(P_2 + \frac{a}{V^2} \right) V = RT$$

осыдан

$$P_2 = \frac{RT}{V} - \frac{a}{V^2}. \quad (2)$$

(2) формулаға кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер арқылы іздеген қысым табылады:

$$P_2 = \frac{RT}{V} - \frac{a}{V_2} = \frac{8,31 \cdot 300}{10^{-3}} - \frac{0,13}{10^{-6}} =$$

$$= (2,49 - 0,13) \cdot 10^6 = 23,6 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

с) Есептің үшінші шарты бойынша, молекулалардың өзара әсерлесу күшін ескеретін түзеткіш $a = 0$. Бұл жағдайға сәйкес Ван-дер-Ваальс теңдеуі мына түрге келтіріледі:

$$P \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT. \quad (3)$$

Мұнда қысым $P = P_3$. Олай болса, $\frac{m}{\mu} = 1 \text{ моль}$ екендігін ескерсек

$$P_3 = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V - (m/\mu)b}$$

немесе

$$P_3 = \frac{RT}{V - b}.$$

Жоғарғы теңдеулердің соңғысына кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулерден іздеген қысым анықталады:

$$P_3 = \frac{RT}{V - b} = \frac{8,31 \cdot 300}{(1 - 0,03) \cdot 10^{-3}} = 25,7 \text{ Па};$$

d) Төртінші шарт бойынша екі түзеткіште есепке алынады, себебі, олар $a \neq 0$, $b \neq 0$. Бұл кезде Ван-дер-Ваальстың жалпы теңдеуінен (7.3) қысым $P = P_4$. Ол мына формула арқылы сипатталады:

$$P_4 = \frac{(m/\mu)RT}{V - (m/\mu)b} - \frac{m^2}{\mu^2} \frac{a}{V^2}$$

Немесе

$$P_4 = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}, \quad (4)$$

(4) теңдеудің соңғысында $\frac{m}{\mu} = 1 \text{ моль}$ екендігі ескерілген.

Осы теңдеуге кіретін физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер жүргізу соңғы қысымды анықтауға мүмкіндік береді:

$$P_4 = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2} = \frac{8,31 \cdot 300}{(1 - 0,03) \cdot 10^{-3}} - \frac{0,13}{V^{-6}} = 24,4 \text{ Па.}$$

7.2. Азот үшін кризистік температура $t_K = 147 \text{ }^\circ\text{C}$, ал кризистік қысым $P_{кр} = 33,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Осы кездегі, оның молекулаларының эффективті диаметрін анықтаңдар.

Берілгені:

$$T_K = 420 \text{ К,}$$

$$P_K = 33,5 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

$$T / \text{К} : \sigma - ?$$

Шешімі: Газды құрайтын молекулалардың көлемін ескеретін Ван-дер-Ваальс тұрақтысы b (7.5) формула бойынша анықталады:

$$b = 4\nu N_A = \frac{2}{3} \pi \sigma^3 N_A,$$

(1) мұндағы $\nu = \frac{4}{3} \pi \sigma^3$ - бір молекуланың көлемі. Осыны

жоғарғы формулаға қою арқылы оның эффективті диаметрін анықтайтын өрнек алынады:

$$\sigma = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{b}{\pi N_A}}. \quad (2)$$

Бұл жерде b тұрақтысы $T_K = \frac{8a}{27\epsilon R}; \quad P_K = \frac{a}{27\epsilon^2}$

VIII. Беттік керілу құбылыстары

1. Негізгі формулалар

1. Қыздырған кездегі сұйық көлемінің салыстырмалы өзгерісі:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T. \quad (8.1)$$

Мұнда β – сұйықтың көлемдік ұлғаю коэффициенті. $\Delta V = V - V_0$ - сұйықтың соңғы V және бастапқы V_0 көлемдерінің айырмашылығы.

2. Сұйық бетіне түсірілген қысымға байланысты, оның көлемінің салыстырмалы өзгерісі мына формуламен анықталады::

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -k \Delta P. \quad (8.2)$$

k - сұйықтың сығылу коэффициенті, (8.2) теңдіктің оң жағындағы $(-)$ таңба сұйық сығылғанда, оның көлемі кемитінгін білдіреді.

3. Сұйықтың беттік керілу коэффициенті деп сұйық бетіндегі қабыршақ жиегінің бірлік ұзындығына түсірілген күш (F) аталады:

$$\alpha = \frac{F}{l}. \quad (8.3)$$

4. Сұйықтың беттік керілу коэффициентін, оның бетінің ауданын (ΔS) бірлік өлшемге өзгертетін еркін энергияның мөлшерімен де анықтауға болады:

$$\Delta E = \alpha \Delta S. \quad (8.4)$$

$$\Delta E = \alpha \Delta S. \quad (8.4)$$

5. Сұйық иілген бетінің астына қосымша қысым түсіреді. Ол төменде келтірілген Лаплас формуласымен анықталады:

$$\Delta P = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (8.5)$$

R_1, R_2 – сұйық бетінің өзара перпендикуляр екі нормаль қималарының қисықтық радиустары. Сұйық беті дөңес болса, аталған қосымша қысым P оң, ал ойыс болғанда теріс мәндерге ие болады.

6. Сұйықтың, радиусы r капилляр түтік бойымен көтерілу биіктігі, мына формула арқылы есептеледі:

$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}, \quad (8.6)$$

мұнда θ – жиектік бұрыш, ρ – сұйықтың тығыздығы, ал

$g = 9,8 \frac{M}{c^2}$ – еркін түсу үдеуі.

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер

1. Бұл тақырыпқа арналған есептерді шартты түрде мынадай үш топқа бөлуге болады:

a) беттік керілу коэффициентін α , қабыршақтың бетінің ауданын өзгерту кезіндегі жасалатын жұмыс пен еркін энергияның өзгерісін анықтауға арналған есептер.

b) кезкелген формадағы иілген сұйық бетінің астына түсіретін қосымша қысымын ΔP анықтауға және капиллярлық құбылыстарға арналған есептер.

c) сұйық көлемінің салыстырмалы өзгерістерін, соған сәйкес коэффициенттерді және, сонымен қатар, жоғарғы топтардағы есептерді шығаруға пайдаланылған әдіс-тәсілдер мен

заңдылықтардың барлығы қолданылатын қиыстырылған есептер.

2. Есептеулерде беттік керілу күштерінің сұйық бетіндегі кезкелген контурдың бойымен әсер ететінін ескеру керек. Бұл күштер контурдың кез-келген элементіне перпендикуляр және осы бетке жүргізілген жанама бойымен бағытталады. Егер, контур ретінде еркін сұйық бетінің, өзі жұғатын қатты денемен жанасу шекарасы алынса, онда сәйкес беттік керілу күшін, сұйықтың беттік қабатының қатты денеге әсері деп қарастырады.

3. Сұйықтардың беттік қабаты қаншалықты жұқа болғанымен (мысалы, сабын көпіршігі) оның екі – сыртқы және ішкі беттері болады және олардың әрқайсының бойымен беттік керілу күші әсер етеді.

4. Иілген беттің астына түсіретін қосымша қысымды (8.5) өрнекпен есептеулерде жіберілетін қателіктерден құтылу үшін, оны сұйық пен қоршаған орта шекарасындағы қысымның секірмелі өзгерісі деп қарастырады. Қарапайым сфералық беттерді қарастыруда, сұйықтың иілген беттерін (кішігірім тамшы, сұйықтағы ауа көпіршігі және т.б.), шартты түрде, өзі қоршаған газды сығып тұрған, керілген күйдегі серпінді қабыршақ деп санауға болады.

5. Қатты денеге (мысалы, шыныға) толық жұғатын ($\theta = 0$) сұйықтың, радиусы r капилляр түтік бойымен көтерілу биіктігі мынаған тең:

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g r}.$$

6. Қайсыбір жағдайларда, жұғатын сұйықтың капилляр түтік бойымен көтерілу биіктігін (8.6) формуланы қолданып табуға мүмкіндік болмағанда, сұйықтың табанына түсіретін қысымы мен оның бетіне түсетін қысымның айырымымен, яғни, гидростатикалық қысым арқылы анықталады. Ол мына формуламен сипатталады:

$$\Delta P = \rho g h$$

3. Есеп шығару үлгілері

8.1. Температурасы $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – дан $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ға көтерілгенде бу қазанындағы массасы 2000 кг су қандай көлем алады.

Судың көлемдік ұлғаю коэффициенті $\beta = 1,8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{K}}$.

Берілгені:

$$T_1 = 283\text{ K},$$

$$T_2 = 373\text{ K},$$

$$m = 2000\text{ кг}.$$

$$\text{T/к: } V - ?$$

Шешімі: Қайсыбір температураға дейін қыздырылған сұйықтың көлемін анықтау мына өрнек арқылы жүзеге асырылады:

$$\Delta V = \beta \Delta T \cdot V_0, \quad (1)$$

мұнда $\Delta V = V - V_0$ - көлем өзгерісі. Сұйықтың бастапқы

көлемі мына өрнекпен арқылы сипатталады: $V_0 = \frac{m}{\rho}$. Мұнда

$\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – судың тығыздығы, ал m - оның массасы. (1)

формулаға ΔV – ны қойып түрлендіру арқылы сұйықтың $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ K}$ температурадағы көлемі V анықталатын өрнек алынады:

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta T). \quad (2)$$

немесе

$$V = \frac{m}{\rho} (1 + \beta \Delta T). \quad (3)$$

Мұнда $\Delta T = T_2 - T_1$. (3) формулаға, ондағы физикалық шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер судың соңғы көлемін береді:

$$V = \frac{2000}{1000} (1 + 1,8 \cdot 90) = 2,03 \text{ м}^3.$$

8.2. Қысым өзгерісінің үлкен интервалы үшін қайсыбір сұйықтың сығылғыштық коэффициенті $\gamma = \gamma_0 (1 + aP)$ заңы бойынша өзгереді. a – тұрақты шама. Сұйық бетіне түсірілген қысым P_0 – ден P_1 – ге дейін өзгергенде, оның соңғы көлемі қандай заңдылықпен кемиді?

Берілгені:

$$\gamma = \gamma_0 (1 + aP)$$

$$a, P_0, P_1,$$

$$\text{Т/к: } V_1 - ?$$

Шешімі: Сығылған кездегі сұйық көлемінің салыстырмалы өзгерісі мына өрнекпен сипатталады:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = -k \Delta P. \quad (1)$$

Мұнда k - сұйықтың көлемдік сығылу коэффициенті, V_0 – сұйықтың бастапқы көлемі. Берілген шектерде (1) формула мына түрге келтіріліп жазылады:

$$\frac{dV}{V_0} = -k dP. \quad (2)$$

Алынған теңдеуді берілген шектерде интегралдау мынаны береді:

$$\int_{V_0}^{V_1} -\frac{dV}{V} = \int_{P_0}^{P_1} k_0 (1 - aP) dP, \quad (3)$$

Осыдан

ІХ. Фазалық айналулар. Ертінділер.

1. Негізгі формулалар.

Меншікті булану жылуы r деп, тұрақты температурада сұйықтың бірлік массасын буға айналдыруға қажетті жылу мөлшері аталады. Ол мына формуламен сипатталады:

$$r = \frac{Q}{m}, \quad (9,1)$$

мұндағы Q – сұйыққа берілген жылу мөлшері, ал m – оның массасы. Осыдан, мольдік булану жылуы r_0 мына өрнек арқылы анықталады: $r_0 = \mu \cdot r$.

Жылу бөлінетін немесе жұтылатын фазалық айналулар үшін Клапейрон-Клаузиус теңдеуі пайдаланылады. Ол қаныққан бу қысымының P_n температураға тәуелділігін сипаттайды:

$$\frac{\partial P_n}{\partial T} = \frac{r_0}{T(v_{\text{бу}} - v_c)}, \quad (9,2)$$

$v_{\text{бу}}$ - бір моль будың көлемі, ал v_c - бір моль сұйықтың көлемі. Яғни, бірінші және екінші фазалардың (мысалы, су мен оның буының) меншікті көлемдері, T – берілген P қысымдағы ауысудың абсолюттік температурасы.

Сұйықтың ойыс беті үстіндегі қаныққан будың қысымы P_1 , оның тегіс беті үстіндегі қаныққан буының қысымынан P_0 аз, және, керісінше, дөңес беті үстіндегіден көп болады. Олай болса, қосымша қысым мына өрнек арқылы анықталады:

$$\Delta P = P_1 - P_0 = \frac{\pm 2\alpha \rho_0}{\rho R}, \quad (9,3)$$

Бұл жерде ρ - сұйықтың тығыздығы болса, ρ_0 - оның қаныққан буының тығыздығы, ал R - сұйықтың иілген бетінің қисықтық радиусы деп аталады..

Ауаның бірлік көлеміндегі су буының массасы, яғни, тығыздығы немесе оның парциаль қысымы абсолют ылғалдылық деп аталады.

Берілген температурадағы абсолют ылғалдылықтың сол температурадағы ауаны қанықтыратын су буының парциаль қысымына немесе серпімділігіне қатынасы салыстырмалы ылғалдылық ω деп аталады:

$$\omega = \frac{P}{P_n}, \quad (9,4)$$

мұнда P - температурасы T ауадағы су буының серпімділігі (абсолют ылғалдылығы), ал P_n - сол температурадағы ауаны қанықтыруға қажетті су буының серпімділігі. Әдетте, ауаны қанықтыратын су буының парциаль қысымы, әртүрлі температура мәндері үшін, арнайы кесте арқылы есеп кітаптардың соңында келтіріліп қойылады.

Көптеген заттар сұйықтарда, (мысалы, суда) ериді, яғни, жеке молекулаларға ыдырайды, сөйтіп сұйық ертінділер түзіледі. Ертінділер еріткіштер мен және ерігіштерден құралады. Қоспалы газдар сияқты, ертінділер бір фазалы жүйелер ретінде қарастырылады.. Сұйық ертінділерде еріген заттың молекулалары, қоспалы идеал газдардағы оның жеке компоненттерінің парциаль қысымына ұқсас, осмостық деп аталған қысым тудырады. Осы ерігіш молекулалары тундыратын осмостық қысымның ертіндінің абсолюттік температурасымен байланысы Вант-Гофф формуласымен сипатталады:

$$P_{oc} = CRT.$$

(9.5) Мұнда $C = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{1}{V}$ - ертіндінің бірлік көлеміндегі ерігіш

молінің саны (мольдік концентрациясы), $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ -

эмбебап газ тұрақтысы.

Молекулалары диссоцияланбаған сұйық ертінділердің молдік концентрациясы былай анықталады:

$$C = \frac{M}{\mu \cdot V} = \frac{N}{N_A} \quad (9.6)$$

N - ертіндінің бірлік көлеміндегі еріген заттың молекулаларының саны.

Ертіндінің үстіндегі қаныққан будың қысымы таза еріткіштің үстіндегіден аз болады. Әлсіз ертінділерде, оның үстіндегі қаныққан бу қысымының салыстырмалы кемуі Рауль заңымен анықталады:

$$\frac{P_0 - P}{P_0} = \frac{z'}{z + z'} \quad (9.7)$$

P_0 - таза еріткіштің үстіндегі қаныққан будың қысымы, P - ертіндінің үстіндегі қаныққан бу қысымы, z' - еріген заттың молінің саны, z - сұйық молінің саны.

2. Әдістемелік нұсқаулар мен ескертулер

Бұл тақырыпта 1-ші түрдегі фазалық ауысуға арналған есептер қарастырылады.

1. Аталған тақырыпқа арналған есептерді шартты түрде мынадай үш топқа бөлуге болады:

а) ауысу нүктесіне және фазалық ауысудың қайсыбір аумағына сәйкес берілген сипаттамалар мен параметрлер арқылы белгісіз физикалық шамаларды анықтау. Бұл есептерді шығарудың негізгі әдісі, есептің мазмұнында берілген шарттарды, Клапейрон-Клаузиус теңдеуін шешуге пайдалану.

б) есептің мазмұнында берілген шарттардың негізінде, фазалық тепе-теңдік қисығының бойындағы әртүрлі термодинамикалық параметрлердің өзгеру заңдылығы мен ерекшеліктерін зерттеуге арналған есептер. Көп ретте аталған типтес есептерді шығару термодинамикалық түрлендірулерді Клапейрон-Клаузиус теңдеуіне қолдануға негізделген.

с) будың қасиеттерін, ауаның абсолюттік және салыстырмалы ылғалдылықтарын, сонымен қатар, ертінділердің осмос-тық қысымын $P_{ос}$ анықтауға арналған есептер.

2. Ертіндінің кризистік температурадан төменгі күйі бу деп аталады. Егер будың тығыздығы аз болса, оны идеал газ ретінде қарастырады, сөйтіп, оның күйін Клапейрон-Менделеев теңдеуінің негізінде сипаттайды. Керісінше, будың тығыздығы көп болса, оның күйі, реал газ үшін тағайындалған, Ван-дер-Ваальс теңдеуі арқылы анықталады.

3. Изотермиялы түрде сығылса, будың қысымы мен тығыздығы орта қаныққанға дейін өседі. Егер будың көлемін одан әрі азайта беретін болса, ол конденсациялана бастайды да қалған будың қысымы мен тығыздығы өзгермейді, тұрақты болып қалады. Сондықтан, берілген температурада жүргізілетін есептеулерде, оларды, есептің жауабы ретінде алуға болады.

4. Кестелерде қаныққан бу қысымның температураға байланыстылығы берілмейді. Себебі, егер газдың қысымы белгілі болса, күй теңдеулері арқылы оның тығыздығын оңай тауып алуға болады.

5. Есеп шығаруды жеңілдету мақсатында мынадай белгілеулер енгізілген. Мысалы, қатты, сұйық және газ тәрізді фазалар сәйкес 1, 2, 3 индекстерімен белгіленген. Егер, $v_1 = \frac{1}{\rho_1}$ - қатты

фазаның меншікті көлемі, ρ_1 - оның тығыздығы болса қатты фазадан сұйық фазаға ауысу кезіндегі оның көлемінің өзгерісі былай өрнектеледі:

$$\Delta v_{12} = v_2 - v_1 = \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1}.$$

Мұнда v_2 және ρ_2 - сұйықтың меншікті көлемі мен тығыздығы. Дәл осы сияқты, v_3 және ρ_3 - газдың меншікті көлемі мен тығыздығы. Көп ретте, жуық түрде $\Delta v_{23} = v_3 - v_2 \approx v_3$ деп саналады. L_{23} - жасырын булану жылуы. Мұнда $\Delta v_{12} = -\Delta v_{21}$ және $\Delta L_{23} = -\Delta L_{32}$ процестің ауысу бағытына тәуелді болатынын, ал бірақ мына теңдік орындалатынын естен шығармау керек

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{23} = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{32}.$$

3. Есеп шығару үлгілері

9-1.Клапейрон-Клаузиус теңдеуін пайдаланып 5°C температурадағы судың меншікті булану жылуын табыңдар.

Берілгені:

$$T = 278\text{ K}$$

$$T/\text{к}: q - ?$$

Шешімі: Бұл жерде Клапейрон-Клаузиус теңдеуі мына түрде жазылады:

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{q_0}{T} = \frac{q_0}{T}(v_3 - v_1). \quad (1)$$

Мұнда v_6 - будың, ал v_2 - судың меншікті көлемдері. Бұл жерде қаныққан буды идеал газ деп санауға болады. Демек, 1 моль бу үшін газ күйінің негізгі теңдеуі былай жазылады:

$$v_3 = \frac{RT}{P_n}. \quad (2)$$

Мұндағы $P = 6,54 \text{ мм.с.б.}$ - 5°C температура үшін кестеден анықталған, қаныққан будың серпімділігі, яғни, қысымы.

Алдымен (2) теңдеуге кіретін шамалардың сан мәндерін қойып есептеулер арқылы будың мольдік меншікті көлемі анықталады:

$$v_3 = 8,31 \cdot \frac{278}{6,54} \cdot 133,3 = 2,65 \text{ м}^3 / \text{моль}.$$

Содан кейін, $v_c = \frac{\mu}{\rho_c}$ өрнегінен судың меншікті көлемі табылады:

$$v_2 = \frac{\mu}{\rho_2} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{моль}.$$

Бұл жерде $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$ - судың мольдік массасы, ал

$\rho_2 = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ - оның тығыздығы. Бұдан $v_3 \gg v_2$ екендігі

көрінеді, яғни, будың көлеміне қарағанда судың көлемі өте аз. Олай болса, бірінші теңдеу мына түрге келтіріліп жазылады:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{dP}{dT^2} \text{ немесе } \frac{dP}{P} = \frac{q}{R T^2} dT. \quad (3)$$

Кішігірім температуралық интервал $T_2 - T_1$ үшін булану жылуын тұрақты деп алып, (2) теңдеуді интегралдаудан мынадай өрнек шығады:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{q_0 (T_2 - T_1)}{R \cdot T_1 \cdot T_2}, \quad (4)$$

(4) формуладан, берілген температурада, судың мольдік булану жылуын анықтауға мүмкіндік беретін өрнек алынады.

$$q_0 = \frac{R T_1 \cdot T_2 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1}}{T_2 - T_1}. \quad (5)$$

(3) формуладағы P_1 және P_2 қысымыдары T_1 және T_2 температураларға сәйкес. Есептің мазмұнында 5°C температурадағы булану жылуын табу керек. Сондықтан, температуралар интервалы үшін 4°C және 6°C деп алуға болады. Осы температураларға сәйкес қаныққан бу серпімділіктері мынаған тең: $P_1 = 6,1 \text{ мм с.б.}$, ал $P_2 = 7,01 \text{ мм с.б.}$, яғни,

$$\frac{P_2}{P_1} = 1,15.$$

Осыны және (5) формулаға кіретін физикалық шамалардың сандық мәндерін орындарына қойып есептеулер жүргізу судың мольдік булану жылуын береді:

$$q_0 = \frac{8,31 \cdot 277 \cdot 279 \cdot \ln 1,15}{2} = 45 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

Бұдан, меншікті булану жылуы мына формуламен анықталады:

$$q = \frac{q_0}{\mu}$$

немесе

$$q = \frac{45 \cdot 10^3}{18 \cdot 10^{-3}} = 2,5 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}.$$

9-2. Температурасы 30°C ауаның салыстырмалы ылғалдылығы 75% болған. Осы кездегі ауаның 1 м^3 көлеміндегі су буының мөлшерін анықтаңдар.

Берілгені:

$$\omega = 75\% = 0,75.$$

$$T = 303 \text{ К}, V = 1 \text{ м}^3.$$

Т/к: $m - ?$

Ауа	1,2 9	1,02	0,74	1,40	-193	2,09	2,37
Сутек	0,0 9	1,41	1,00	1,41	-252,7	4,61	16,0
Гелий	0,1 8	2,08	1,25	1,67	-	-	1,41
Су буы	0,0 048	1,82	1,38	1,31	-	-	1,58
Оттек	1,4 3	0,91	0,912	1,40	-183	2,14	2,39
Көмір қыш-л газы	1,9 8	0,65	0,65	1,30	-78,5	5,95	2,39

2. Негізгі физикалық тұрақтылар

1. Идеал газ молінің қалыпты жағдайдағы көлемі

$$V_{\mu} = 22,42 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

2. Авогадро саны

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}.$$

3. Универсал газ тұрақтысы

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

4. Больцман тұрақтысы

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

5. Лошмид саны

$$n_0 = 2,687 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}.$$

6. Массаның атомдық бірлігі
(көміртек атомының массасы)

$$1(\text{м.а.б.}) = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

3. Газ молекулалардың орта эффективті диаметрлері, σ (м) мен орта еркін жол ұзындықтары λ (м).

Қалыпты күйлерде ($P = 760$ мм с.б., $T = 273$ К).

4 кесте

Заттар	σ (м)	λ (м)
Азот	$3,75 \cdot 10^{-10}$ м.	$0,59 \cdot 10^{-7}$
Ауа	$3,74 \cdot 10^{-10}$ м.	$0,60 \cdot 10^{-7}$
Сутек	$2,75 \cdot 10^{-10}$ м.	$1,10 \cdot 10^{-7}$
Гелий	$2,18 \cdot 10^{-10}$ м.	$1,75 \cdot 10^{-7}$
Оттек	$3,64 \cdot 10^{-10}$ м.	$0,63 \cdot 10^{-7}$
Көмір қышқыл газы	$4,65 \cdot 10^{-10}$ м.	$0,39 \cdot 10^{-7}$

5. Кейбір заттардың кризистік қысымдары мен температуралары

5 кесте

Заттар	T_k, K	$P_k \cdot 10^{-6}, Па$
Азот	126	33,9
Бензол	562	47,7
Сутек	33	13,0
Гелий	5,8	2,29
Су буы	647	22,0
Оттек	154	50,3
Көмір қышқыл газы	304	73,9

4. Қаныққан су буының әртүрлі температурадағы серпімділігі мен тығыздығы

6 кесте

t°, C	$P, \text{мм с.б.}$	$\rho, \text{г/м}^3$	t°, C	$P, \text{мм с.б.}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-5	3,01	3,22	15	12,79	12,8
0	4,58	4,84	16	13,63	13,6
1	4,83	5,22	17	14,53	14,5
2	5,29	5,60	18	15,48	15,4
3	5,69	5,98	19	16,48	16,3
4	6,10	6,40	20	17,54	17,3
5	6,54	6,84	21	18,65	18,3
6	7,01	7,30	22	19,83	19,4
7	7,51	7,80	23	21,07	20,6
8	8,05	8,30	24	22,38	21,8
9	8,61	8,80	25	23,76	23,0
10	9,21	9,40	26	26,21	24,4
11	9,84	10,0	27	26,74	25,8
12	10,52	10,7	28	28,35	27,2
13	11,23	11,4	29	30,04	28,7
30	31,82	30,3	80	355	293,6
40	55,3	51,18	90	526	421,9
50	92,5	83,20	100	760	597,4

Ван-дер-Ваальс тұрақтылары

7 кесте

Газдар	$a, \frac{H \cdot M^4}{\text{моль}^2}$	$b \cdot 10^5, \frac{M^3}{\text{моль}}$
Су буы	0,556	3,06
Көмір қышқыл газы	0,364	4,26
Оттегі	0,136	3,16
Аргон	0,136	3,22
Азот	0,136	3,85
Ауа	0,136	3,58