Як виростити кристал?

Кристали широко використовуються в різних галузях народного господарства. Вчені розробили багато способів одержання або, як кажуть, вирощування кристалів. Найбільш поширеними є три способи вирощування кристалів: з розчину, з розплаву і з пари. Ми розповімо лише про те, як можна в домашніх умовах виростити кристали з розчину. Хоч ця робота трудомістка і потребує акуратності, все ж вона повна захоплюючого інтересу. В свій час відомий мінералог, спеціаліст по метеоритах і поет П. Л. Драверт (1879—1945 рр.) так писав про свої заняття кристалізацією:

«Виростив у склянці чудові кристали.
Радісний, прекрасний, благородний труд!
Як в південнім морі червоні корали,
Чудові кристали у мене ростуть...»

Для вирощування кристалів певної речовини треба приготувати насичений водний розчин цієї речовини. Для цього в хімічну склянку або колбу місткістю 0,5—0,8 *л* наливають не більше половини її об'єму дистильованої (або добре кип'яченої) води і нагрівають її до 60—70° С. Потім у воду обережно насипають відповідну сіль і помішують розчин доти, поки речовина не перестає розчинятися. Одержують насичений розчин. Його слід зразу ж профільтрувати в іншу посудину, де вирощуватимуть кристали.

У відфільтрований насичений розчин кидають маленький кристалик розчиненої речовини або підвішують його на нитці чи волосинці всередині розчину, який і служить зародком для майбутнього великого кристала. Посудину накривають картоном і ставлять в темне місце. Великий кристал виростає за добу-дві, а іноді й більше.

Щоб дістати добре оформлені багатогранники, треба час від часу обережно перевертати кристал з однієї грані на другу, щоб всі його грані побували в однакових умовах росту. Наводимо відомості про те, які ж солі і в якій кількості (на 0,5 *л* води) можна брати для вирощування кристалів і яку форму вони утворюють (табл. 5).

При відповідних умовах і старанному виконанні робіт можна одержати зовсім правильно огранені кристали, які не поступаються за своїми обрисами найбільш строгим побудовам геометрів.

Цікавою властивістю кристалів є здатність їх заліковувати свої «рани»: якщо у насичений розчин покласти кусочок кристала з обламаним куточком, то він насамперед відновить цей куточок. В лабораторії акад. А. В. Шубнікова було проведено такий цікавий дослід. З алюмокалійового галуну було виточено кулю діаметром близько 3 *см*, яку поклали у насичений розчин цієї ж солі, налитий у гумовий м'ячик. М'ячик заклеїли і почали повільно обертати (один оберт за 2 години). Періодично, кожні 2 години препарат нагрівався і охолоджувався на 2—3° С з допомогою електричної лампочки, що автоматично запалювалась. При нагріванні куля трохи розчинялась з поверхні, при охолодженні — росла за рахунок утвореного пересичення. Через кілька місяців вона набула форми правильного октаедра, маючи при цьому свою початкову вагу. Надалі кристал не змінював своєї форми. Ця здатність заліковувати свої «рани» довго вражала дослідників природи, поки не була розкрита таємниця будови й росту кристалів.

Таблиця 5

Дані для утворення кристалів деяких речовин

Речовина і хімічна формула	Формула і колір кристалів	Кількість речовини в грамах на 0,5 *л* води
Хлористий натрій (кухонна сіль) $NaCl$	Дрібні білі снігоподібні або кубічні кристалики	195
Алюмокалієвий галун $KAl(SO_4)_2 \times 12H_2O$	Октаедричні кристали білого і ніжно-сріблястого кольору	150–200
Сірчанокислий нікель $NiSO_4 \times 7H_2O$	Кристали у вигляді голок яскраво ізумрудного кольору	550
Двохромистий калій (біхромат калію) $K_2Cr_2O_7$	Триклинні оранжево-червоні голки або пластинки	250
Залізосиньородистий калій (червона кров'яна сіль) $K_3Fe(CN)_6$	Рубінові кристали	450
Залізистосиньородистий калій (жовта кров'яна сіль) $K_4Fe(CN)_6$	Світложовті прозорі кристали	200
Мідний купорос $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Триклинні яскраво-сині кристали	150—200
Хромокислий калій $KCrO_4$	Ромбічні кристали жовто-лимонного кольору	375

Львівський фізико - математичний ліцей

Алексейчук Володимир Іванович

Конспекти з фізики
10 клас I семестр .
Основи МКТ . Термодинаміка .

м.Львів 1998 .

К-1 **Молекулярна фізика** – наука про молекулярну будову і властивості речовин у різних агрегатних станах і їх взаємні перетворення (фазові переходи).

М.Ф. вивчає макроскопічні тіла...

Основні методи М.ф.: 1 Статистичний 2. Термодинамічний

① створюється молекулярна модель явища, досліджується поведінка великої кількості молекул. ② Досліджує явища, що безпосередньо спостерігаються на досліді, оперує величинами, що безпосередньо вимірюються, не цікавлячись внутрішньою будовою.

Система тіл – сукупність тіл що розглядаються.

Система у різних станах відрізняється температурою, тиском, об'ємом і т.д. – параметри системи (стану)

Термодинамічна (теплова) рівновага – стан ізольованої системи до якої вона переходить самовільно – параметри зберігаються довільно довго. (Ізольована система не може сама собою вийти із стану рівноваги).

Температура – величина, що однакова у всіх частин ізольованої системи, що перебуває у тепловій рівновазі

0-й з-н (принцип) термодинам.

Кількісне визначення температури

Тепле $\xrightarrow{Q}$ Холодне $\quad t_T > t_x$

Температура характеризує: – ступінь нагрітості тіл; – напрям теплообміну; – швидкість руху молекул

1 $Q=0$ 2 $\quad t_1 = t_2$

Якщо тіла у тепловій рівновазі (відсутній теплообмін між тілами) – їх температура однакова.

Для кількісного визначення температури використовують залежність від неї – об'єму, тиску, електричного опору ...

Шкала Цельсія $t(^\circ C)$: 0, t, 100

$t_0 = 0\,^\circ C$ – плавлення льоду – V_0

$t_{100} = 100\,^\circ C$ – кипіння води – V_{100}

t – довільна температура – V

$$\frac{V_{100}-V_0}{t_{100}-t_0} = \frac{V-V_0}{t-t_0} \Rightarrow \boxed{t = \frac{V-V_0}{V_{100}-V_0}\cdot 100^\circ}$$

Виміряти температуру тіла – привести його до теплової рівноваги з термометром. Види термометрів...

Температурні шкали.

$t(^\circ C)$: −273, •, 100 – шкала Цельсія

$T(K)$: абсолютн. нуль, 273, 374 – шкала Кельвіна

$\boxed{T = t + 273}$ $\quad \Delta t = \Delta T = 1\,k = 1\,^\circ C$

$t(^\circ F)$: −459, 32, 212 (180) – шкала Фаренгейта

Теплове розширення тіл

$t \le \begin{matrix} l \\ V \\ S \end{matrix}$ $\quad t' \le \begin{matrix} l' \\ V' \\ S' \end{matrix}$ $\quad \Delta t = t' - t$

(збільшуються всі розміри тіла)

I Лінійне $\quad \boxed{l' = l(1+\alpha\Delta t)}$ $\quad \boxed{\alpha = \frac{l'-l}{l\Delta t}}$ – коеф. лінійного розширення тіла.

II Об'ємне $\quad \boxed{V' = V(1+\beta\Delta t)}$ $\quad \boxed{\beta = \frac{V'-V}{V\cdot\Delta t}}$ – коеф. об'ємного розширення

$\boxed{S' = S(1+\beta\Delta t}$ Для ізотропних тіл $\boxed{\beta = 3\alpha}$

Врахування... Застосування... Особливості розширення води...

К-30 **Електростатика** – розглядає взаємодію і властивості систем нерухомих зарядів.

Сили взаємодії зарядів (заряджених тіл) залежать від форми, розмірів тіл і характеру розташування зарядів на цих тілах.

У випадку взаємодії нерухомих точкових зарядів (...) q_1 і q_2, а також зарядів кулястої форми з рівномірним розподілом заряда по всьому об'єму або по всій поверхні виконується **Закон Кулона** (фр. 1785р.; англ. Кавендіш 1772р – надруковано 1879р.) крутильні терези.

$\boxed{F = k\frac{q_1\cdot q_2}{R^2}}$ З-н Кулона – сила взаємодії двох точкових нерухомих зарядів у вакуумі... (q_1 і q_2 – модулі зарядів тіл).

$F = \gamma\frac{m_1\cdot m_2}{R^2}$

Кулонівські сили:

① Центральні – напрямлені вздовж прямої що сполучає ці заряди

② Для одноіменних зарядів $q_1\cdot q_2 > 0$ $\quad F_{12} > 0$ сили відштовхування – позитивні (принципова відмінність від сил гравітації)

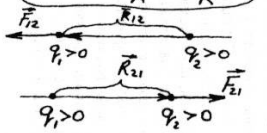
③ Для різноіменних зарядів $q_1\cdot q_2 < 0$ $\quad F_{12} < 0$ сили притягання – негативні

④ Виконується III з-н Ньютона $\quad \vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ $\quad (R = |\vec{R}_{12}| = |\vec{R}_{21}|)$

⑤ За сучасними даними з-н Кулона виконується дуже точно і для дуже великих і для дуже малих ($R \sim 10^{-17}$ м) відстаней

векторний запис з-на Кулона

$\boxed{\vec{F}_{12} = k\frac{q_1\cdot q_2}{R^2}\cdot\frac{\vec{R}_{12}}{R}}$



Одиниці електричного заряду.

СІ Основна одиниця 1 А $\left(I = \frac{\Delta q}{\Delta t}\right) \rightarrow \Delta q = I\cdot\Delta t \rightarrow$ **1 Кл = 1 А · 1 с**

$K = \frac{F\cdot R^2}{q_1\cdot q_2}$ $\quad K = \left[\frac{H\cdot м^2}{Кл^2}\right]$ $\quad \boxed{k = 9\cdot 10^9\ \frac{H\cdot м^2}{Кл^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}}$ $\quad \varepsilon_0 = 8{,}85\cdot 10^{-12}\ \frac{Ф}{м}$ – електрична стала

$\boxed{F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\cdot\frac{q_1\cdot q_2}{R^2}}$ – закон Кулона в СІ $\quad 1\,Кл$ – дуже великий заряд

СГСЕ – Абсолютна електростатична система одиниць (система Гаусса)

$\boxed{F = \frac{q_1\cdot q_2}{R^2}}$ – в СГСЕ $k = 1$ $\quad$ 1 абс. один. заряду СГСЕ – такий заряд, який діє на рівний йому заряд, розміщений на відстані 1 см, з силою 1 дин

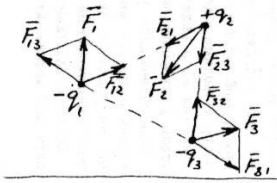
Взаємодія зарядів в середовищі (діелектрик) – визначається лише властивостями даного діелектрика

$\boxed{\varepsilon = \frac{F_0}{F_{діел.}}}$ – відносна діелектрична проникність середовища – показує, у скільки разів сила взаємодії у вакуумі більша, ніж у даному середовищі $\quad \varepsilon > 1$ завжди – діелектрики послаблюють електр. поле.

$\boxed{F = k\frac{q_1\cdot q_2}{\varepsilon R^2}}$ СІ $\quad$ З-н Кулона для діелектрика $\quad \boxed{F = \frac{q_1\cdot q_2}{\varepsilon R^2}}$ СГСЕ

Принцип суперпозиції – сила взаємодії двох зарядів не змінюється при наявності третього, четвертого і т.д. зарядів

Дія системи зарядів на довільний заряд визначається безпосереднім додаванням сил взаємодії даного q_0 заряду з іншими



$$\boxed{\vec{F}_0 = \vec{F}_{01} + \vec{F}_{02} + \ldots + \vec{F}_{0N} = \sum_{i=1}^{N} F_{0i}}$$

Повторити К-28 9 кл – Гравітаційне поле

К-29 9 кл

Крутильні терези... $\quad 1$ од. зар. СГСЕ $=$ ... Кл

К-29 Фундаментальні взаємодії в природі.

I Гравітаційна $F=\gamma\frac{m_1 m_2}{R^2}$ — II Електромагнітна — III Слабка — IV Сильна (ядерна) ($R\sim10^{-15}$ м)

Електрослабка взаємодія

Велике об'єднання

Супергравітація

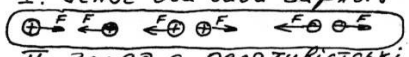
Електродинаміка – теорія електромагнітної взаємодії – вивчає властивості електромагнітного (е.м.) поля та його взаємодію з речовиною (рух і взаємодію заряджених частинок).

$q=[Кл]$ кулон — заряд частинки (тіла)

1. джерело е. м. поля
2. визначає здатність тіл до е. м. взаємодії
3. визначає інтенсивність е. м. взаємодії
4. властивість деяких елементарних частинок (заряди не існують самі по собі без частинок – властивість матерії).

Фундаментальні властивості зарядів частинок:

I. Існує два види зарядів ⊕ позитивні (протон, скло, хутро) ⊖ негативні (електрон, шовк, янтар)



II. Заряд є релятивістські інваріантним – його величина не залежить від системи відліку, а отже від швидкості

III. Закон збереження заряда (3.3.3.) – в любій ізольованій системі алгебраїчна сума зарядів постійна $q_1+q_2+q_3+\ldots=const$

Факти ① електрон і протон – нескінченний час життя ② існує багато нестабільних заряджених частинок (вони утворюються і зникають у процесах самоперетворень)

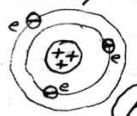
Носії заряду – елементарні частинки $q_p=|q_e|=1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл $=e$ — елементарний заряд – min у природі

⊖ електрон (бурштин, янтар) – e – точкова безструктурна частинка ($R_e\sim2{,}8\cdot10^{-15}$ м)

⊕ протон – p – складається з трьох кварків ($+\frac{2}{3}e$; $+\frac{2}{3}e$; $-\frac{1}{3}e$) $R\sim10^{-15}$ м (вільних кварків не виявлено)

n – нейтрон – $q_n=0$ для електрона $\frac{e}{m_e}=\ldots$ Дж. Томсон $m_e=9{,}1\cdot10^{-31}$ кг

Атом = електрони + ядро = (нейтрони + протони)(нуклони) = кварки

^7_3Li →  $m_{Li}=7$ а.о.м. $q_{ядра}=+3e$ (3 протона)

^1H → для H_2 $\frac{F_{е.м}}{F_{грав.}}\approx10^{39}$

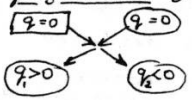
Атом нейтральний! $N_e=N_p\to q_{ядра}=q_{електронів}$

(+ іон) = (атом) – (електрон) (– іон) = (атом) + (електрон)

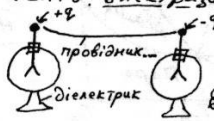
Заряд мікрочастинок (тіл) – дискретний (ціле число елементарних зарядів), але в більшості макроскопічних електричних явищ бере участь величезна кількість елементарних зарядів і їх дискретна структура не проявляється.

Заряд тіла:
- $q=0$ (нейтральний) $N_e=N_p$ однакова кількість електронів і протонів
- $q>0$ $N_p>N_e$ – недостача електронів
- $q<0$ $N_e>N_p$ – надлишок електронів

Електризація – надання тілу електричного заряду (дотик) – відділення, або перенесення на тіло електронів або іонів. Електризація – розділення зарядів, а не їх утворення



$q_1+q_2=0$ 3.3.3. → $|q_1|=|q_2|$ Заряди при електризації рівні за величиною і протилежні за знаком



Нейтралізація – перерозподіл зарядів

Електроскоп...

К-2 Молекулярно-кінетична теорія (МКТ) –

– розглядає будову і властивості тіл, як результат руху і взаємодії молекул.

Основні положення МКТ:

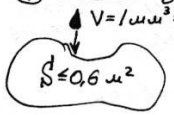
I Всі речовини складаються з мікрочастинок (атомів, молекул або іонів), між якими існують проміжки (Маса тіла міняється не неперервно, а лише порціями – дискретно).

II Частинки всіх тіл перебувають у неперервному хаотичному (тепловому) русі. Рух кожної частинки підлягає законам механіки

III Частинки речовини взаємодіють між собою – в залежності від відстані притягуються або відштовхуються (взаємодія електромагнітна)

Експериментальні підтвердження положень!

I ① макроскопічне тіло ділиться на частини
② явища пароутворення, сублімації, розчинності
③ електронний і іонний мікроскопи (500 тис. разів-збільш.).
④ дослід з краплиною олії – краплина не розпливається до нескінченності – найменша товщина d – розміри одної молекули



$V=1$ мм$^3=10^{-9}$ м^3

$S\le0{,}6$ м^2

$V=S\cdot d\to d=\frac{V}{S}=\frac{10^{-9}}{0{,}6}\approx1{,}7\cdot10^{-9}$ м $=17$ Å

1 Å – ангстрем 1 Å $=10^{-10}$ м

⑤ з-н постійних відношень (хімія)
⑥ дифузія, стисливість речовин

II ① Дифузія – поширення речовини в якому небудь середовищі у напрямі зменшення її концентрації
② Броунівський рух (ботанік Броун, англ. 1827 р.) – неперервний у часі і хаотичний у напрямі рух завислих у рідині або газі мікрочастинок (~1 мкм – видно у мікроскоп) під дією теплового руху молекул середовища. Цей рух викликаний нескомпенсованими імпульсами, які отримала частинка з боку оточуючих її молекул. (Швидкість руху броунівських частинок ~ температурі).

III ① Існування твердих тіл
② Сила пружності – з-н Гука
...

К-3

I Розміри атомів $R_a \sim 10^{-10}$ м (1 Å)

II Маса атома дуже мала ($m_0 \sim 10^{-26}$ кг)

$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$ — відносна атомна (молекулярна) маса (з табл. Менделєєва)

m_0 – маса атома (молекули) [кг]

m_{0C} – маса атома вуглецю-12 [кг]

1 а.о.м. $= \frac{1}{12} m_{0C} = 1{,}66 \cdot 10^{-27}$ кг

III Кількість атомів у макроскопічних тілах-величезна ($N \sim 10^{26}$)

$\nu = \frac{N}{N_A}$ — кількість речовини – відносна кількість атомів у тілі

1 моль – кількість речовини, що містить стільки ж структурних елементів, скільки атомів у 12 г вуглецю-12

$N_A = 6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$ — число Авогадро – число атомів в 1 молі речовини, або у 12 г вуглецю-12

IV Молярна маса – M – маса одного моля речовини

$M = M_r \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $M = m_0 \cdot N_A \rightarrow m_0 = \frac{M}{N_A}$ — маса атома

$m = m_0 N$, $M = m_0 N_A$ $\rightarrow \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A} \rightarrow \nu = \frac{m}{M}$ — кількість речовини

$N = \frac{m}{M} N_A = \nu \cdot N_A$ — кількість молекул у тілі масою m

V $n = \frac{N}{V}$ — концентрація атомів – кількість атомів в 1 м^3 речовини

VI $\rho = \frac{m}{V}$ — густина речовини – маса 1 м^3 речовини

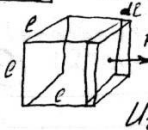
$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 \cdot n = \frac{M}{N_A} \cdot n$

$n = \frac{\rho}{m_0} = \frac{\rho \cdot N_A}{M}$

VII Число Лошмідта ...

М – мю (велике)

К-28 Руйнування кристалів – межа міцності.



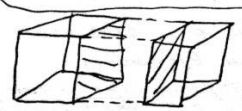
Оскільки при деформації виникає механічна напруга, розрахуємо енергію деформації $U_{деф}$, яка рівна роботі зовнішніх сил.

$U_{деф} = A = F_c \cdot dl = \frac{F}{2} dl = \frac{\sigma l^2}{2} \cdot \frac{\sigma l}{E} = \frac{\sigma^2 l^3}{2E} = \frac{\sigma^2 V}{2E}$

$\sigma = \frac{F}{S} \rightarrow F = \sigma \cdot S = \sigma l^2$

$\sigma = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \rightarrow dl = \frac{\sigma l}{E}$

Перед розривом об'єм тіла володіє енергією $U_{роз.} = \frac{\sigma_м^2 \cdot V}{2E}$ $\sigma_м$ – межа міцності



При розриві виникають дві вільні поверхні $2l^2$, і енергія деформації переходить у поверхневу енергію

$U_{пов} = \sigma_{пов} \cdot 2l^2 = U_{роз} = \frac{\sigma_м^2 l^3}{2E} \rightarrow \sigma_м = \sqrt{\frac{4E\sigma_{пов}}{l}}$

Межа міцності

Реальна міцність кристалів $\sigma_м$ менше:

У розрахунках не враховано ① Залишкової деформації і енергії цієї деформації ② Дефектів і мікротріщин у кристалах (рух дислокацій) ③ Температуру кристала

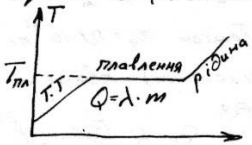
Теплоємність кристалів (при достатньо високих температурах $T \approx 300$ K)

$C_{V\mu} = 3R$ — для одноатомних кристалів (кожна частинка коливається і має 3 ступеня вільності коливального руху (на один ступінь – kT)

З-н Дюлонга – Пті

Фазові перетворення тв. тіл.

Нагрівання кристалів приводить до зростання амплітуди антигармонійних коливань частинок і до збільшення міжвузольних відстаней в решітці (Теплове розширення $l = l_0(1 + \alpha \Delta t)$ $V = V_0(1 + \beta \Delta t)$ $\beta = 3\alpha$)



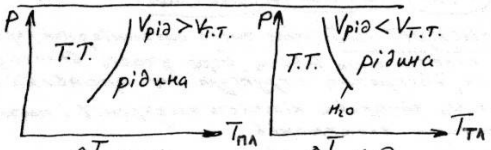
Сильне нагрівання – руйнування решітки – плавлення = впорядкований кристалічний стан → менш впорядкований стан – рідкий (ентропія зростає)

$\lambda_{пл} = \frac{Q}{m} = U_{рід} - U_{т.т} + p(V_{рід} - V_{т.т})$

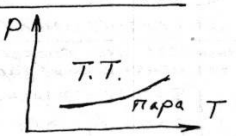
$U_{рід}$ $U_{т.т}$ – питомі (на 1 кг) внутрішні енергії рідини і т.т. (зовнішня)

$V_{рід}$ $V_{т.т}$ – питомі об'єми речовини у цих фазах p – постійний тиск.

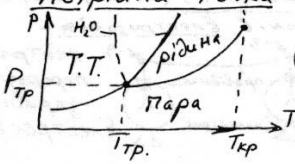
$T_{пл}$ – залежить від p (слабо) (Рівняння Клапейрона – Клаузіуса ...)



Сублімація ...



Потрійна точка – у цій точці можуть існувати і бути у рівновазі всі три фази: пара, рідина, кристал



H_2O $p_{тр} = 610$ Па $T_{тр} = 273{,}16$ K ($t_{тр} = 0{,}01$ °C)

Якщо $p_{тр} < p_{атм}$ – речовина плавиться

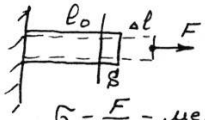
Якщо $p_{тр} > p_{атм}$ – речовина летюча (випаровується, сублімує)

К-27 | К-8 9кл

Деформація... Пружня... Пластична...

Види деформацій: 1. Стиск (розтяг) 2 Згин 3. Зсув 4. Кручення

Стиск (розтяг)

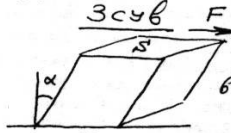


$\Delta l = l - l_0$ - абсолютне видовження

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ - відносне видовження

$\sigma = \frac{F}{S}$ - механічна напруга

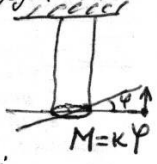
Зсув



$\gamma = tg\alpha$ відносний зсув

$\tau = \frac{F}{S}$ - дотична напруга

Кручення



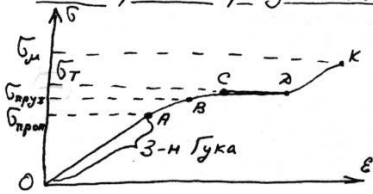
$\boxed{\sigma = E \cdot \varepsilon}$ або $\boxed{F = k\Delta l}$ ⇐ **З-н Гука** ⇒ $\boxed{\tau = G \cdot \gamma}$

$K = E\frac{S}{l_0}$ - коеф. жорсткості

E - модуль пружності (Юнга)...

G - модуль зсуву ...

Діаграма розтягу...



$\sigma_{проп}$ - межа пропорційності

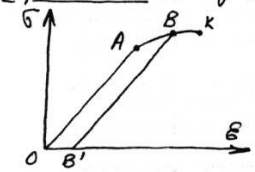
$\sigma_{пруж}$ - межа пружності

$\sigma_т$ (CD) - межа текучості

$\sigma_м$ - межа міцності

$K = \frac{\sigma_м}{\sigma}$ - допустима напруга — коеф. надійності (запас міцності) $K > 1$

Крихкість - (чавун, загартована сталь)



OA - пружня деформація

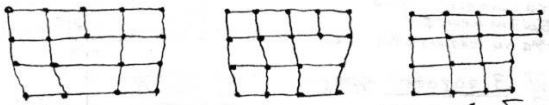
AB - пластична деформація

OB' - залишкова деформація

Після пластичної деформації межа пружності стає вищою - матеріал стає міцнішим.

Зміцнення матеріалу (збільшення опору кристалів пластичній деформації): ① Наклеп (ковка) ② Температурне гартування ③ Легування - введення домішок

Молекулярний механізм міцності. Як показують експерименти і теоретичні розрахунки, межа пружності реальних кристалів менша ніж у ідеальних - велика роль дефектів кристалічної решітки (дислокацій) При деформаціях дислокації рухаються і міцність матеріалів зумовлена ступінню легкості руху дислокацій. Фактори, що утруднюють рух дислокацій, роблять матеріал міцнішим. Зміцнення матеріалів пластичними деформаціями пояснюється збільшенням числа дислокацій, внаслідок чого їх рухливість зменшується (заважають одна одній)



Рух дислокацій

Міцність матеріалу зростає в багато разів при ліквідації дефектів у кристалах.

К-4

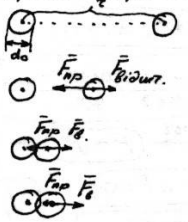
Гази, рідини і тверді тіла.

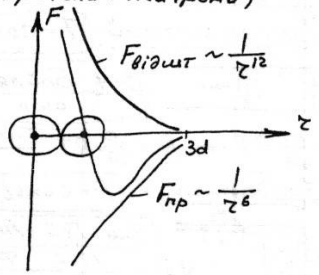
стан / Молек.	Газ	Рідина	Тверді тіла
1. Відстань (густина)	$r \approx 5 \div 10\, d_0$ легко стискуються $\rho \sim 1 \frac{кг}{м^3}$	$r \approx d_0$ впритул не стиск. $\rho \sim 10^3 \frac{кг}{м^3}$	$r \approx d_0$ $\rho \sim 10^3 \frac{кг}{м^3}$
2. Сили взаємодії	дуже малі не зберігають форми і об'єм	досить великі зберігають об'єм, форма посудини	великі зберігають форму і об'єм
3. Рух	поступальний $10^3 м/с, 10^{-7} м, 10^9$	поступально-коливальний $10^{-13} с$ / $10^{-8} с$	коливальний
4 Енергія	$E_{к.г.} \gg \lvert E_{п.г.}\rvert = 0$	$E_{к.р.} \approx \lvert E_{п.р}\rvert$	$E_{к.т.т.} \ll \lvert E_{п.т.т}\rvert$
	$E_{к.г.} > E_{к.р} > E_{к.т.т.}$; $T_{г} > T_{р} > T_{т.т} = 0$; $\lvert E_{п.г.}\rvert < \lvert E_{п.р.}\rvert < \lvert E_{п.т.т}\rvert$		
5. Розташування	невпорядковане (хаотичне)	ближній порядок	дальній порядок (кристали)

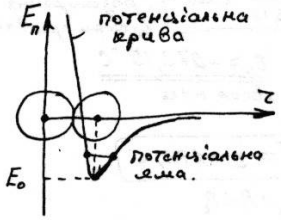
Сили молекулярної взаємодії - електромагнітні

(молекула → атом → електрони + ядро → протони + нейтрони)

1. $r \gg d_0$ $F \to 0$ взаємодія відсутня
2. $r \approx (1 \div 3) d_0$ $F_{пр} > F_{відшт.}$ $F_R < 0$ молекули притяг.
3. $r = d_0$ $F_{пр} = F_{відшт}$ рівноважний стан
4. $r < d_0$ $F_{пр} < F_{відшт}$ $F_R > 0$ молек. відштовх.







Потенціальна енергія молекулярної взаємодії

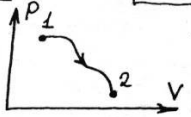
К-5 | Ідеальний газ (розріджений газ)

① Відсутня взаємодія молекул (на відстані) ② Молекули - матеріальні точки певної маси (m_0) ③ Взаємодія - пружні стикання ④ Молекули рівномірно розподілені по об'єму ⑤ завжди газ.

Параметри газу: тиск - P, об'єм - V, температура - T, маса - m.

Стан: Нерівноважний —(релаксація)→ Рівноважний...

Рівноважний стан зображають точкою на координатній площині



Процес - перехід системи з одного стану у другий

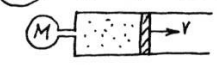
Рівноважний (квазістатичний) процес - ($t \to \infty$, нескінченно повільний) послідовність рівноважних станів.

Рівняння стану (експеримент!) $f(P,V,T,m)=0$

$PV = \frac{m}{M}RT$ - р-ня стану Менделєєва - Клапейрона $PV = \nu RT$

Ізопроцеси - процеси з фіксованим параметром і $m = const$

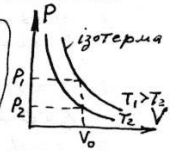
I Ізотермічний - $T = const$; $\Delta T = 0$



З-н Бойля - Маріотта... (англ. 1662 фр.)

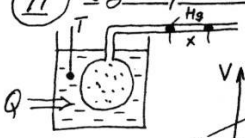
$PV = const$

$P_1V_1 = P_2V_2$, $m = const$

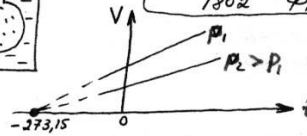


$PV = \frac{m}{M}RT \to P = \frac{\rho}{M}RT \xrightarrow{T=const} P \sim \rho \to \frac{P_1}{P_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}$

II Ізобарний - $P = const$; $\Delta P = 0$



З-н Гей-Люсака ... (1802 фр.)



$V_t = V_0(1+\beta \cdot t)$

$\beta = \frac{1}{273,15}$ град$^{-1}$

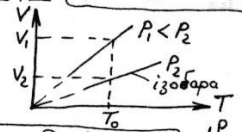
β - коеф. об'ємного розширення

V_0 - об'єм при $t = 0°C$

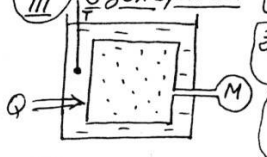
$V_t = 0$ при $\beta \cdot t_0 = -1$ $\quad t_0 = -273,15$ °C (абсол. нуль)

Абсолютна (термодинамічна) температура $T = t + 273,15$

$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ або $\frac{V}{T} = const$, $m = const$ $\to V = V_0\beta T$

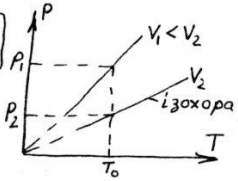


III Ізохорний $V = const$; $\Delta V = 0$

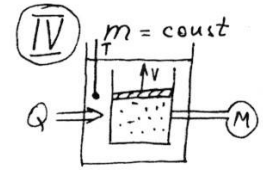


З-н Шарля... (1787 фр.) $\to P = P_0(1+\gamma t)$

$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$ або $\frac{P}{T} = const$, $m = const$ $\to P = P_0\gamma T$



IV $m = const$



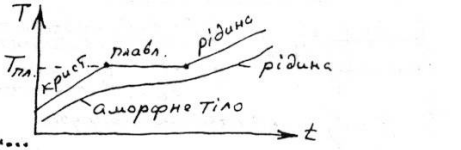
$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2}$ $\quad \frac{PV}{T} = const$ - р-ня Клапейрона

$PV = \frac{m}{M}RT \to P = \frac{\rho}{M}RT \to \rho = \frac{P \cdot M}{RT}$

К-26 | Тверді тіла - зберігають об'єм і форму

I Кристали ($T_{плавлення}$) - симетрія - правильна геометрична форма, дальній порядок - кристалічна решітка. Монокристал - одиночний кристал. Полікристал - складається з великої кількості малих монокристалів розташованих хаотично

II Аморфні тіла - переохолоджені рідини - ближній порядок (дуже часте порушення кристалічної решітки) - відсутня певна T плавлення. аморфне тіло → рідина - плавний перехід



Монокристали - анізотропні... приклади...

Т.Т. - домінуючий факт - сили притягання між молекулами. Стійка рівновага досягається при певному розташуванні молекул в околі кожної молекули і по всьому об'єму - дальній порядок - взаємне розташування періодично повторюється - кристалічна структура.

Кристалічну решітку отримують переносом елементарної комірки (найменша просторова частка кристалу з максимально високою симетрією) у трьох напрямах (три ребра a,b,c три кута α,β,γ).

⊖ 7 типів кристалічних систем (сингоній) - 14 типів решіток ⊖
(кубічна (3), тетрагональна (2), гексагональна (1), ромбоедрична (1), ромбічна (4), моноклинна (2), тріклинна (1)) - різні співвідношення a,b,c і α,β,γ

Структурні частинки кристалів: молекули (нафталін), атоми (алмаз), іони (кухонна сіль), атомні залишки в хмарі вільних електронів (метали)

Типи сил (зв'язків) - вандерваальсові (між молекулами), кулонівські (між іонами), парноелектронні або ковалентні (між атомами), металічні (між атомними залишками і вільними електронами в металах), змішані.

Частинки розташовані так, щоб енергія взаємодії була мінімальною.

Енергія зв'язку - додатня різниця між енергією ізольованих атомів і атомів у решітці (0,1 - 0,7 eV) енергія зв'язку визначає роботу виходу частинки з кристалу

Дефекти в кристалах - порушення ідеальної кристалічної решітки

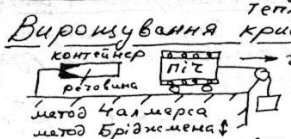
⊖ I Точкові: енергетичні (фонони, тимчасові збудження променями і частинками), електронні (зайві електрони, дірки, екситони), атомні (вакансії, неправильні розташування атомів, домішки). ⊖
II Одновимірні - гвинтові та крайові дислокації (10^3-10^6 атомів)
III Двовимірні - ряди лінійних дислокацій, грані зерен кристалів, порушення у розташуванні шарів кристалу.

Концентрація дефектів зростає з підвищенням T (з'являються вільні електрони, дірки, вакансії, міжвузлові атоми)

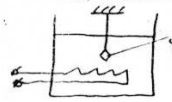
Дефекти і їх міграції визначають: дифузію, пластичність, в'язкість, теплопровідність, електропровідність.

Вирощування кристалів.

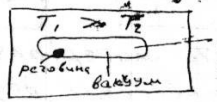
I З розплаву



II З розчину (монокристали сегнетової солі до 20кг)

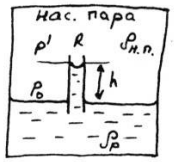


III З газової фази



Рідкі кристали...

К-25 Випаровування при викривленій поверхні рідини



Якщо рідина повністю змочує капіляр $h = \frac{2\sigma}{\rho_р g R}$

Тиск (пружність) насиченої пари на висоті h над рівнем рідини визначається барометричною формулою $P = P_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}$, але для малих $h \to$

$\Delta P = P_0 - P' = \rho_{н.п.} g h$

Тиск над вгнутим меніском у капілярі менший ніж над плоскою (МКТ: молекули поверхневого шару на вгнутій поверхні притягуються сильніше ніж молекули на плоскій поверхні, отже інтенсивність випаровування менша, а значить і концентрація насиченої пари менша, тобто тиск насиченої пари менший).

$$\Delta P = P_0 - P' = \rho_{н.п.} g h = \rho_{н.п.} g \cdot \frac{2\sigma}{\rho_р g R} = \frac{2\sigma}{R}\frac{\rho_{н.п.}}{\rho_р} = \Delta P$$

Над опуклою поверхнею тиск більший $\Delta P = \pm \frac{2\sigma}{R}\frac{\rho_{н.п.}}{\rho_р}$

Висновки: краплини різних радіусів, що оточені насиченою парою, не можуть бути у рівновазі (менші краплини випаровуються, а на більші пара конденсується).

Розчини – суміш двох або декількох речовин, що перебувають у рідкому стані

Розчинність тв.тіл у рідині: ① гранична концентрація т.т. залежить від T. ② Супроводжується зниженням T (енергія витрачається на руйнування кристалічної решітки), або підвищенням T (після руйнування решітки утворюються комплекси молекул т.т. і рідини) ③ $V_{розчину} \neq V_{розчинник} + V_{т.т.}$ ④ Зростає $T_{кип.}$ у порівнянні з чистим розчинником ⑤ Знижується T кристалізації (сіль на вулиці зимою).

Осмос – проникнення розчинника через напівпроникну перегородку

Розчинена речовина (внаслідок дифузії) рівномірно розподіляється по всьому об'єму розчинника – поводиться подібно газу.

Напівпроникна перегородка – пропускає тільки розчинник – тиск якого, у стані рівноваги, з обох сторін має бути однаковим – рівень розчину зростає

Різниця тисків на перегородку – **осмотичний тиск** Π – дорівнює тиску розрідженого газу розчинених молекул

$$\Pi = \frac{\nu RT}{V}$$ – з-н Вант-Гоффа

Прояв осмотичного тиску ...

Явища переносу

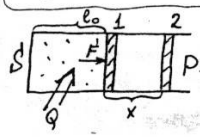
Дифузія (перенос маси)	В'язкість – внутрішнє тертя (перенос імпульсу)	Теплопровідність (перенос енергії – теплоти)
$\Delta m = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta x} \cdot S \cdot t$	$\Delta \bar{P} = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta z} \cdot S \cdot t$	$\Delta Q = -\varkappa \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot S \cdot t$
	$F = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta z} \cdot S$	

К-6 Нормальні умови

$P_0 = 1$ атм $= 760$ тор $= 101325$ Па $\approx 10^5$ Па
$T_0 = 273{,}15$ K $\quad t_0 = 0$ °C
$V_0 = 22{,}4$ л $= 0{,}0224$ м^3 (1 моль)

$\frac{P_0 V_0}{T_0} = R = 8{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$

$PV = RT$ – р-ня стану для 1 моля речовини



① $P V_1 T_1 \quad PV_1 = RT_1$ ② $P V_2 T_2 = T_1 + 1 \quad PV_2 = R(T_1 + 1)$

$P = \frac{F}{S} \quad V_1 = l_0 S \quad \frac{F}{S} l_0 S = RT_1 \ (1) \quad V_2 = (l_0 + x)S \quad \frac{F}{S}(l_0 + x)S = R(T_1 + 1) \ (2)$

(2)–(1) $\to$ $A = F \cdot x = R$ – універсальна газова стала – це робота розширення 1 моля газу під час нагрівання на 1 K при $P = const$

Стала Больцмана $K = \frac{R}{N_A} \quad K = \frac{8{,}31}{6 \cdot 10^{23}} = 1{,}38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{K}}$

$PV = \frac{m}{\mu} RT \to P = \frac{\frac{N}{N_A} m_0}{V \cdot \mu} RT = n \frac{R}{N_A} T = nkT \quad \boxed{P = nkT}$

$P = \frac{N}{V} kT \to N = \frac{PV}{kT}$ → якщо $P_1 = P_2 \quad V_1 = V_2 \quad T_1 = T_2 \to N_1 = N_2$ З-н Авогадро...

З-н Дальтона нехай 1 м^3 – n – молекул

З них n_1 – 1-го сорту n_2 – 2-го сорту ... $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots$

$P = (n_1 + n_2 + n_3 + \dots)kT = n_1 kT + n_2 kT + n_3 kT + \dots$

$P_1 = n_1 kT$ – тиск молекул першого сорту $P_2 = n_2 kT$ ...

$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$ – З-н Дальтона – тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків тих газів, які складають суміш.

$$P \cdot V = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \frac{m_3}{\mu_3} + \dots\right) RT$$
$$P \cdot V = (\nu_1 + \nu_2 + \nu_3 + \dots) RT$$

– р-ня Менделєєва-Клапейрона для суміші газів

$$\mu_c = \frac{m_1 + m_2 + \dots}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots} = \frac{m_c}{\nu_c}$$ – молярна маса суміші газів

К-7 Статистичний метод – для опису явищ, використовує теорію імовірності.

Основний зміст методу:

1. Сукупність величезної кількості молекул має нові властивості, яких не має в окремої молекули (густина, з-ни механіки). $P, V, T, n \dots$
2. Оперують середніми значеннями величин, що характеризують окремі молекули ($\bar{v}, \bar{E}, \dots$) Флуктуації...
3. Мікро- і макропараметри зв'язані між собою.

Розподіл молекул газу за швидкостями (Максвелл англ. 1859)

ΔN – кількість молекул з швидкостями в інтервалі від v до $v+\Delta v$

N – кількість молекул газу

$$\Delta N = N \cdot f(v) \cdot \Delta v \quad \text{де} \quad f(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2} \cdot e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \cdot v^2$$ – розподіл Максвелла.

$\frac{\Delta N}{N \cdot \Delta v}$ – частка молекул з швидкостями в інтервалі від v до $v+\Delta v$

$f(v)$ – функція розподілу молекул за швидкостями (одноатомний ідеальний газ).

① $v_{н.і}$ – найбільш імовірна швидкість

$$v_{н.і} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$ (з умови $f'(v)=0$)

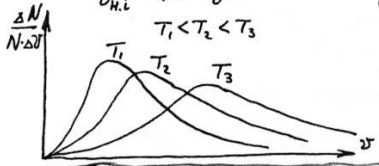
② $\langle v \rangle$ – середня арифметична швидкість

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

③ $\bar{v}$ – середня квадратична швидкість

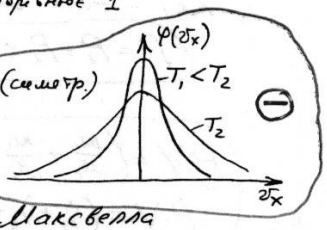
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$$

④ Площа під кривою при зміні T не міняється і дорівнює 1



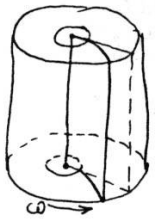
Розподіл Максвелла по проекціях швидкостей (самостр.)

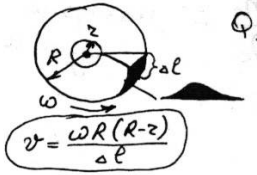
$$\Delta N_x = N \cdot \varphi(v_x) \Delta v_x \qquad \varphi(v_x) = \left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{1/2} \cdot e^{-\frac{m_0 v_x^2}{2kT}}$$



Експериментальна перевірка розподілу Максвелла

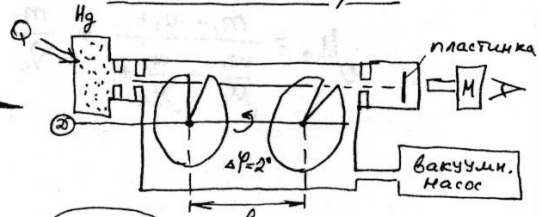
Дослід Штерна





$$v = \frac{\omega R (R-r)}{\Delta l}$$

Дослід Ламмерта

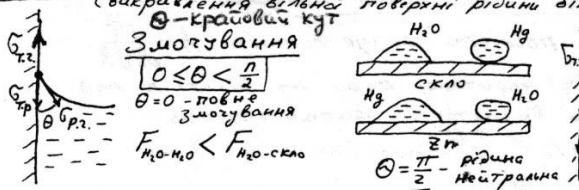


$$v = \frac{\omega \ell}{\Delta p}$$ міняючи ω можна спостерігати осідання молекул на пластинку за певний час і визначити їх відносну кількість у пучку.

К-24 Явища на межі рідина – тв. тіло

(викривлення вільної поверхні рідини біля поверхні тв.т. – меніск)

Θ – крайовий кут



$F_{р.р.} = F_{р.т.}$

Співвідношення сил визначається: родом рідини і тв. тіла, температурою, зовнішніми умовами.

Врахування: фарбування, змащування, паяння, склеювання

Адсорбція ($F_{р.р.} > F_{р.т.}$) поглинання рідиною (тв.т.) речовин, які накопичуються (незмочує) на поверхні і зменшують Блов (очистка газів, отримання вакууму).

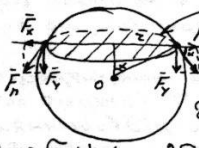
Абсорбція ($F_{р.р.} < F_{р.т.}$) об'ємне поглинання речовин рідиною (молекули (змочує) домішок розподіляються по всьому об'єму рідини).

Флотація ... (збагачення руд.)

Тиск під викривленою поверхнею рідини

Викривлена поверхнева плівка створює на рідину додатковий тиск у порівнянні з плоскою поверхнею.

Переріз краплини



Сили F_x – по периметру перерізу компенсуються

$\sum F_y = F_{пов.у} = 2\pi r \sigma \sin\alpha$ тоді додатковий тиск у перерізі

$$\Delta P = \frac{\sum F_y}{S} = \frac{2\pi r \sigma \sin\alpha}{\pi r^2} = \frac{2\sigma \sin\alpha}{r} = \frac{2\sigma}{\frac{r}{\sin\alpha}} = \frac{2\sigma}{R}$$

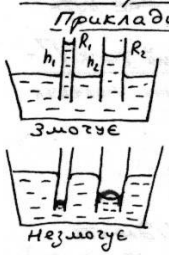
$$\Delta P = \pm \frac{2\sigma}{R}$$ – додатковий тиск під сферичною поверхнею рідини.

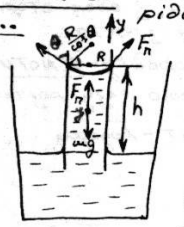
Якщо меніск рідини складної форми, тоді визначають середню кривизну поверхні як $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$ де R_1 і R_2 – радіуси кривизни у двох взаємоперпендикулярних перерізах (довільних, як зручніше).

$$\Delta P = \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)$$ – додатковий тиск під викривленою поверхнею – Лапласівський тиск.

Капілярні явища – опускання (незмочує) або підіймання (змочує) рідини у тоненьких трубках (капілярах)

Приклади...





Умова рівноваги стовпа рідини

$F_{пов.у} = mg$

$F_{пов.у} = \sigma \cdot 2\pi R \cdot \cos\Theta$

$mg = \pi R^2 h \rho g$

$\pi R^2 h \rho g = \sigma \cdot 2\pi R \cos\Theta$

$$h = \frac{2\sigma \cos\Theta}{\rho g R}$$ – висота підняття (опускання) рідини у капілярі

Якщо змочування або незмочування повне ($\Theta = 0, \Theta = \pi$)

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$$

K-23

Рідина – це проміжний стан, у якому властивості речовини в міру зростання T переходять від властивостей тв. тіла до властивостей відповідної пари, що пов'язано з відповідною зміною молекулярної будови речовини.

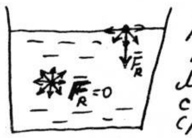
Рідина – тв.т.
- **Спільне**: густина і відстані між частинками, наявність об'єму і вільної поверхні, опір розтягу, близька теплоємність ($T \approx T_{плавл.}$) (однаковий характер руху частинок)
- **Різне**: текучість (молекули рідин не мають певного місця, вони „блукають" невеликими групами) Тв.т. – анізотропні – дальній порядок. Рідини – ізотропні – ближній порядок

Рідина – пара
- **Спільне**: велика текучість, форма посудини, ізотропність (властивості однакові у всіх напрямах) критична температура, існує внутрішній або молекулярний тиск $\frac{a}{V^2}$ (H_2O – 17000 атм)
- **Різне**: Пара займає наданий об'єм повністю, кількісна відмінність за густиною

Мала стисливість – великий внутрішній тиск (сильна молекулярна взаємодія) (океан $\Delta h = 30$ м)

Теорія рідин носить в основному якісний характер

Поверхневі явища



Молекула всередині рідини – молекулярні сили скомпенсовані $F_R = 0$ – переміщається вільно

Молекула у поверхневому шарі ($h \approx 2 \div 3 d_0$) – молекулярні сили не скомпенсовані, $\vec{F}_R \neq 0$ спрямована вглиб рідини (род рідини, відстань між молекулами)

Щоб молекула перемістилась у поверхневий шар, вона повинна виконати роботу (за рахунок власної кінетичної енергії) проти сил, що діють у поверхневому шарі → молекули у поверхневому шарі рідини володіють додатковою потенціальною енергією.

$U_{пов} = \sigma \cdot S$ – поверхнева енергія пропорційна площі поверхні $\sigma = \frac{U_{пов}}{S} \left[\frac{Дж}{м^2}\right]$ – коефіцієнт поверхневого натягу

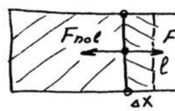
$\sigma = \frac{A}{S}$ – коеф. поверхневого натягу = роботі, що затрачена на ізотермічне утворення 1 м² поверхні рідини

Загальна тенденція фізичних систем – мати в стані рівноваги найменший запас потенціальної енергії

Поверхневий шар рідини має додаткову потенціальну енергію, рідина прагне позбутися цього надлишку енергії і прагне скоротити площу своєї поверхні. Мінімальна поверхня, при заданому об'ємі, у КУЛІ

Власна (при відсутності зовнішніх дій) форма рідини – КУЛЯ

$mgh + \sigma S = min$



$2\Delta S = 2\ell \cdot \Delta X$ (дві поверхні – дві плівки)

$\Delta A = \sigma \Delta S \rightarrow 2F_{пов} \cdot \Delta X = \sigma \cdot 2\ell\Delta X \rightarrow$ $F_{пов} = \sigma \cdot \ell$ – сила поверхн. натягу.

ℓ – довжина лінії, що обмежує поверхню.

$F_{пов}$ – сила поверхневого натягу

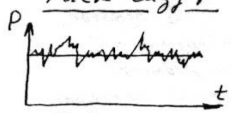
1. Діє вздовж поверхні рідини
2. Діє ⊥ до лінії, що обмежує поверхню рідини
3. Дія приводить до зменшення площі поверхні рідини

$\sigma = \left[\frac{Н}{м}\right] = \left[\frac{Дж}{м^2}\right]$ (з таблиці)
1. род рідини
2. температура (при $T \to T_{кр}$ $\sigma \to 0$)
3. Домішки

K-8

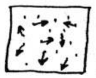
Основне рівняння МКТ

Тиск газу – P – за середньою силою ударів на одиницю площі



Флуктуації – відхилення від середніх значень.

Задача: Визначити тиск газу на основі МКТ і механіки Ньютона



$\bar{F}$ – середня сила удару одної молекули

$\bar{Z}$ – середня кількість стикань з стінкою за час Δt

$$P = \frac{\bar{F} \cdot \bar{Z}}{S}$$

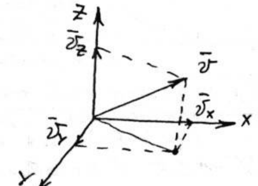
(I) $\bar{v}$ – середня квадратична швидкість $\bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2}$

$\bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \ldots + v_N^2}{N}$ – середній квадрат швидкості

$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + v_z^2$

але всі напрями рівноправні

$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$ $\quad$ $\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2$



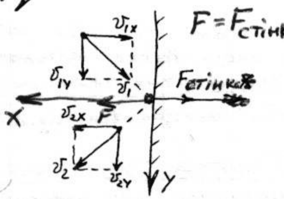
(II) Пружній удар $v_y = const$

$F \cdot \Delta t = m_0 \cdot \Delta v_x = (m_0 v_{2x} - m_0 v_{1x}) = 2 m_0 v_x$

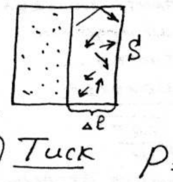
$v_y = v_{1y} = v_{2y}$

$v_x = v_{2x} = -v_{1x}$

$$F = \frac{2 m_0 v_x}{\Delta t}$$



(III) Кількість ударів Z



$\bar{Z} = \frac{1}{2} n \Delta V = \frac{1}{2} n S \cdot \Delta\ell = \frac{1}{2} n \cdot S \cdot \bar{v}_x \cdot \Delta t$

$\frac{1}{2}$ – частинок вліво $\frac{1}{2}$ частинок – вправо.

$$\bar{Z} = \frac{1}{2} n \cdot S \cdot \bar{v}_x \cdot \Delta t$$

(IV) Тиск $P = \frac{\bar{F} \cdot \bar{Z}}{S} = \frac{2 m_0 v_x \cdot \frac{1}{2} n \cdot S \cdot \bar{v}_x \cdot \Delta t}{\Delta t \cdot S} = m_0 n \bar{v}_x^2 = \frac{1}{3} m_0 n \bar{v}^2$

$$P = \frac{1}{3} m_0 \cdot n \cdot \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n \cdot \bar{E}$$ – Основне р-ня МКТ

Тиск газу чисельно дорівнює $\frac{2}{3}$ середньої кінетичної енергії поступального руху молекул в одиниці об'єму

$\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ – середня кінетична енергія молекули.

К-9 | # Температура.

В термодинаміці: T вказує напрям теплопередачі, $T_1 = T_2$ означає, що потік енергії від одного тіла до другого $= 0$

В МКТ: рівність потоку енергії 0 виконується при рівності середніх кінетичних енергій руху молекул (окремі молекули одного газу обмінюються енергією з молекулами іншого газу, але сумарний перехід енергії $= 0$).

З основного р-ня МКТ $p = \frac{2}{3} n\bar{E} = \frac{2}{3}\frac{N}{V}\cdot\frac{m_0\bar{v}^2}{2} \rightarrow pV = \frac{2}{3}N\frac{m_0\bar{v}^2}{2}$

Для 1 моля речовини р-ня стану М.-К. $\begin{cases} pV = \frac{2}{3}N_A\cdot\frac{m_0\bar{v}^2}{2} \\ pV = RT \end{cases}$ $\Big| \frac{2}{3}N_A\cdot\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = RT \rightarrow \frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}\cdot T = \frac{3}{2}kT$

$\boxed{\bar{E} = \frac{3}{2}kT}$ **Температура** – міра середньої кінетичної енергії теплового руху молекул (фізичний зміст T.

(Справедливо для ідеального газу, тв. тіл, рідин, для всіх речовин, рух частинок яких підлягає законам механіки Н.)

$\boxed{T = 0K}$ – абсолютний нуль – температура при якій припиняється поступальний рух молекул, але існує коливальний рух (це доводиться квантовою механікою) – найменша можлива T.

при $T \rightarrow 0K$ в речовині з'являються нові властивості – надтекучість, надпровідність

В стані теплової рівноваги $\bar{E}$ однакова для всіх молекул газів і броунівських частинок. $\bar{E}$ – можна прийняти за міру температури – **енергетична температура** $\Theta = \bar{E} = \frac{3}{2}kT$ вимірюється у джоулях [Дж] або електронвольтах [еВ] ($1\,еВ = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Дж) $1\,K \approx 2\cdot10^{-23}$ Дж

$10^9 K \approx 2\cdot10^{-15}$ Дж ≈ 10 кеВ

Температура – поняття статистичне (воно стосується не однієї молекули або невеликої кількості, а величезної сукупності молекул.)

Дане визначення температури не має сенсу для міжзоряного простору, високого вакууму, нерівноважних (плазма) систем ...

Середня квадратична швидкість молекул.

$\left.\begin{aligned} \bar{E} &= \frac{m_0\bar{v}^2}{2} \\ \bar{E} &= \frac{3}{2}kT \end{aligned}\right\} \frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \rightarrow \bar{v} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$

ці теоретичні висновки добре підтверджуються експериментами штерна ...

Рівняння стану → газові закони

З осн. р-ня МКТ $p = \frac{2}{3}n\bar{E} = \frac{2}{3}n\frac{3}{2}kT = nkT = \frac{N}{V}kT$

або $pV = N\cdot k\cdot T = \nu\cdot N_A\cdot k\cdot T = \nu RT = \frac{m}{\mu}RT$

$\boxed{pV = \frac{m}{\mu}RT \xrightarrow{m=const} \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = const}$

$T = const$ ізотермічний $\quad pV = const = \frac{m}{\mu}RT$

$V = const$ ізохорний $\quad \frac{V}{T} = const = \frac{mR}{\mu p} \quad \frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} \quad V = V_0\cdot\frac{1}{T_0}\cdot T = V_0\beta T$

$p = const$ ізобарний $\quad \frac{p}{T} = const = \frac{mR}{\mu V} \quad \frac{p}{T} = \frac{p_0}{T_0} \quad p = p_0\frac{1}{T_0}T = p_0\gamma T \quad \beta = \gamma = \frac{1}{273}$

К-22 | ## III з-н термодинаміки → (при $T = 0K \rightarrow S = 0$)

неможливо досягти абсолютний нуль температури, хоча наблизитись до нього можна, як завгодно близько (рекорд $T = 1{,}2\cdot10^{-6}$ K 1956р.) $T = 5\cdot10^{-10}$ K 2003р $\bar{v}_{ат} \sim 1$ мм/с

Зрідження газів – перетворення їх у рідину – можливе лише при $T < T_{кр}$

Для зрідження He $T_{кр} = 5{,}2$ K, H_2 $T_{кр} = 33{,}2$ K, N_2 $T_{кр} = 126{,}0$ K, O_2 $T_{кр} = 154{,}3$ K

необхідне попереднє глибоке охолодження

Кріогенні температури $T < 120$ K Застосування...

$0{,}3\,K < T < 120\,K$ – охолодження до кріогенних температур

найпростіше проводити за допомогою рідин, що кипять при $T < 120$ K (N_2, H_2, He)

Основа підтримання і застосування кріогенних температур – виробництво зріджених газів

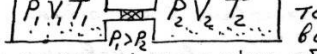
1908р. Камерлінг-Оннес – рідкий He – Нобелівська премія

Для зниження власної температури ($T < T_{кр}$) газ розширюючись повинен виконати роботу за рахунок власної енергії

Способи розширення стиснутого газу:

I Дроселювання – зниження тиску газу або рідини шляхом протискання їх через звужений отвір (вентиль, кран, пористу перегородку) супроводжується охолодженням (для $T > T_{інверсії} \approx 6T_{кр}$ – нагрівання).

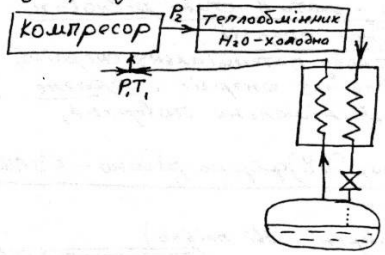
газу – **ефект Джоуля – Томсона**

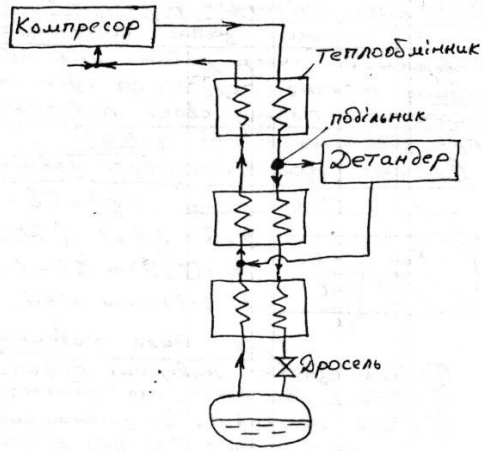


Охолодження реального газу – є результатом того, що газ, при дроселюванні виконує два види робіт: проти внутрішніх сил притягання молекул і на зміну об'ємної енергії потоку ($P_1V_1 - P_2V_2$) (Останнє залежить від суттєвості поправок Ван-дер-Ваальса в стан I і II – якщо у стані 1 поправка $\frac{a}{V^2}$ суттєва, а в не суттєва – газ охолоджується $\Delta P = -1$ атм $\rightarrow \Delta t \approx -\frac{1}{4}$ °C

II Адіабатне розширення газу з виконанням зовнішньої роботи в спец. машині – детандері (рухає поршень) або турбодетандері (обертає колесо турбіни)

III При випуску газу з посудини (виклопі) охолодження відбувається за рахунок роботи проти сил зовнішнього тиску





Рідини ($P = 1$ атм)

N_2	63 – 77 K
H_2	14 – 20 K
He	0,7 – 4,2 K
O_2	55 – 90 K

К-21

Випаровування – процес пароутворення з вільної поверхні рідини (при любій температурі)

Кипіння – інтенсивне випаровування рідини, що відбувається не тільки (по бульбашкам) з її вільної поверхні, але і по всьому об'єму рідини в середину бульбашок пари.

Умова кипіння – тиск насиченої пари у бульбашці $P_н \geq P_0 + \rho g h + \frac{2\sigma}{R}$

P_0 – зовнішній тиск на рідину (атмосферн.)

$\rho g h$ – гідростатичний тиск в рідині

$\frac{2\sigma}{R}$ – додатковий тиск на бульбашці, викликаний поверхневим натягом рідини

① При наявності центрів пароутворення (пилинки, розчинені гази) $\frac{2\sigma}{R} \ll P_0$

② Дуже часто $\rho g h \ll P_0$

→ умова кипіння → $P_н \approx P_0$

$T_{кип.}$ { род рідини; зовнішній тиск → для H_2O { $P_0 = 1$ атм $t_к = 100°C$; $P_0 = 16$ атм $t_к = 200°C$; $P_0 = 0{,}4$ атм $t_к = 70°C$; домішки

Вологість – наявність водяної пари в повітрі

I Абсолютна вологість – $\rho = \left[\frac{кг}{м^3}\right]$ – густина водяної пари у повітрі

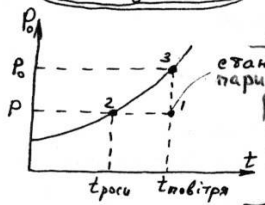
або $p - [Па]$ – парціальний тиск водяної пари (пружність)

II Відносна вологість – φ – (характеризує ступінь віддалення водяної пари, що є у повітрі, від насиченої пари при цій же температурі)

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%$$

p – парціальний тиск водяної пари що є у повітрі при даних умовах

p_0 – тиск насиченої пари при тій самій температурі



стан пари

Парціальний тиск (p) пари в повітрі визначають по точці роси – $t_р$ – температурі, при якій дана водяна пара стає насиченою, (користуються табл. або графіком $P_{н.п.}$ від T).

Прилади для вимірювання φ

$t_{сухий}$ | Психрометр | $t_{вологий}$

два термометра

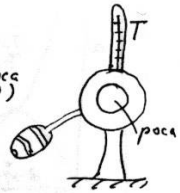
психрометричні таблиці

φ

Гігрометри

① Волосяний (довжина волоса залежить від φ)

② Конденсаційний безпосередньо вимірюють $t_{роси}$



Значення вологості

① Підтримання T тіла людей, тварин (комфорт 40-60%)

② Рослини (кактус)

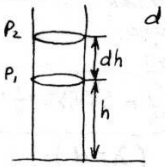
③ Метеорологія (передбачення погоди).

④ Виробництво тканьке, кондитерське

⑤ Зберігання овочів, фруктів, тканин, творів мистецтва (музей)

К-10

Барометрична формула ($T = const$)



$dP = P_2 - P_1 = -\rho g dh$ З р-ня стану $PV = \frac{m}{\mu}RT \rightarrow P = \frac{\rho}{\mu}RT \rightarrow$

$\rightarrow \rho = \frac{P\mu}{RT} \rightarrow dP = -\frac{P\mu}{RT} g\, dh \rightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{\mu g}{RT} dh$

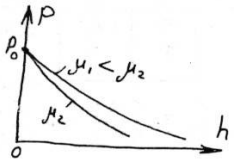
проінтегруємо цей вираз для $T = const$

$$\int \frac{dP}{P} = -\int \frac{\mu g}{RT} dh \rightarrow \ln P = -\frac{\mu g h}{RT} + \ln C, \quad C_1 = const$$

Потенціюємо останній вираз

$P = C_1 e^{-\frac{\mu g h}{RT}}$ для $h = 0$ $P = P_0 = C_1$

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}} \text{ або } P = P_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}$$ – барометрична формула (альтиметр...)



Розподіл Больцмана

врахуємо $P = nkT$ n_0 – концентрація на $h = 0$ n – концентрація на висоті h.

$$n = n_0 \cdot e^{-\frac{\mu g h}{RT}} \text{ або } n = n_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}$$ – розподіл Больцмана

розподіл частинок у випадку потенціального поля сил земного тяжіння (любого потенціального поля)

Атмосфера планет

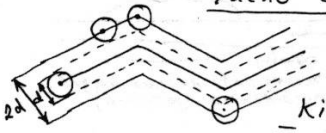
① при $T \to 0$ $n \to 0$ всі молекули під дією тяжіння впали на поверхню

② при $T \to \infty$ $n \to n_0$ на всіх висотах концентрація однакова (газ рівномірно розподілений по всьому об'єму)

③ Реально – атмосфера розсіюється (завжди є молекули з $v > v_{II}$ космічна)

Атмосфера Землі стабільна ...

Число стикань молекул газу $\bar{Z}$



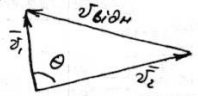
$d = 2r$ – діаметр молекули

$\langle v \rangle$ – середня швидкість молекул

$\langle v_{відн} \rangle$ – середня відносна швидкість молекул

Кількість стикань за $1\,c = t$

$\bar{Z} = n \cdot \bar{V}_0 = n \cdot \pi d^2 \langle v_{відн} \rangle t$



$v_{відн}^2 = v_1^2 + v_2^2 - 2 v_1 \cdot v_2 \cos\theta$

$\langle v_{відн}^2 \rangle = \langle v_1^2 \rangle + \langle v_2^2 \rangle - \underbrace{\langle 2 v_1 v_2 \cos\theta \rangle}_{=0}$ $\langle v_{відн}^2 \rangle = 2\langle v^2 \rangle$ $\langle v_{відн} \rangle = \sqrt{2}\langle v \rangle$

$$\bar{Z} = \sqrt{2} \cdot \pi d^2 \cdot n \langle v \rangle t$$ – кількість стикань за $1\,c = t$

$\bar{Z} \sim 10^9\,c^{-1}$ $d_{еф} \sim 1\text{-}10\,Å$

d – діаметр молекули реально залежить від кінетичної енергії молекул що стикаються, тобто від температури. d – ефективний діаметр

πd^2 – середній ефективн. переріз молекули.

Довжина вільного пробігу $\langle \lambda \rangle$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle t}{\langle Z \rangle} = \frac{\langle v \rangle t}{\sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle t} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \lambda$$

$\lambda \sim \frac{1}{n} \sim \frac{1}{p}$ – довжина вільного пробігу обернено пропорційна тиску газу при $T = const$

К-11

Вакуум

① стан газу $P < P_0$ ($P < P_a$)

② середовище без частинок або квантів поля

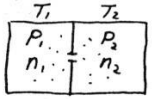
$\langle\lambda\rangle$ - довжина вільного пробігу d - характерний розмір посудини.

	Низький	Середній	Високий	Надвисокий
	$\lambda \ll d$	$\lambda \leq d$	$\lambda > d$	$\lambda \gg d$
P [тор]	760–1	$1 - 10^{-3}$	$10^{-3} - 10^{-8}$	$< 10^{-8}$

$\frac{1}{4} n_1 S \langle v_1 \rangle t = \frac{1}{4} n_2 S \langle v_2 \rangle t$

Властивості високого вакууму

① Зменшення P спричиняє до зменшення n без зміни λ ($\lambda = d$) - розмір посудини

② 

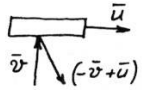
При нормальних умовах рівновага настає при $P_1 = P_2$

У вакуумі рівновага наступає при рівності зустрічних потоків частинок $Z_1 = Z_2$ $\Rightarrow$ $n_1 \langle v_1 \rangle = n_2 \langle v_2 \rangle$ умова рівноваги

$\langle v_1 \rangle$, $\langle v_2 \rangle$ - середні арифметичні швидкості.

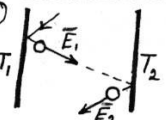
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\langle v_2 \rangle}{\langle v_1 \rangle} \rightarrow \frac{P_1 \cdot kT_2}{kT_1 \cdot P_2} = \frac{\sqrt{\frac{8kT_2}{\pi m_2}}}{\sqrt{\frac{8kT_1}{\pi m_1}}} \rightarrow \frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1\sqrt{T_2}}{T_2\sqrt{T_1}} \rightarrow \boxed{\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}}$$

умова рівноваги (з-н Паскаля не діє)

③ 

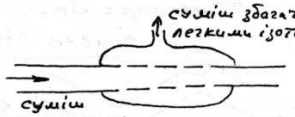
Відсутня в'язкість, але на рухоме тіло діє сила тертя, тому що удари молекул газу не пружні (молекули ніби прилипають до тіла, на деякий час і коли покидають його, отримують складову імпульсу рідину той, і на це ж значення зменшується імпульс тіла. За 1 с на 1 м² поверхні попадає $Z = \frac{1}{6} n \langle v \rangle$ $\xrightarrow{\Delta t}$ $\Delta(mv) = \frac{1}{6} n \langle v \rangle m_0 u \Delta t = \frac{1}{6} \rho \langle v \rangle u \Delta t = F_{тр} \Delta t$

$\boxed{F_{тр} = \frac{1}{6} \rho \langle v \rangle u S}$ - сила тертя, що діє на одиницю площі бічної поверхні

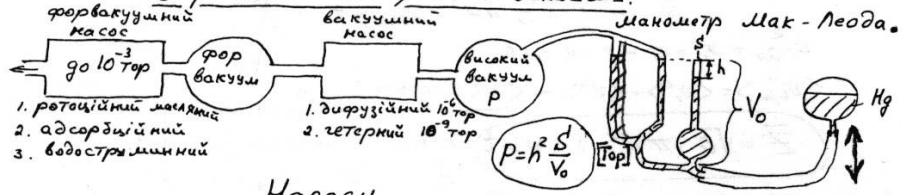
④ 

Удар не пружній - молекули покидають тіло маючи кінетичну енергію (швидкість), що відповідає температурі тіла.

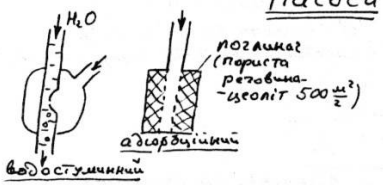
⑤ При молекулярній течії по трубах, як і при ефузії (витіканні газу через отвір у вакуум) потік молекул $\sim n \langle v \rangle$. Оскільки $\langle v \rangle \sim \frac{1}{\sqrt{\mu}}$ $\rightarrow$ потік легких газів більший $\rightarrow$ збагачення (↑) легких газів (розділення ізотопів)



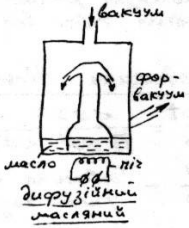
Отримання і вимірювання вакууму.

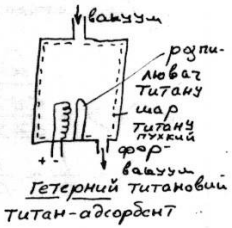


Насоси



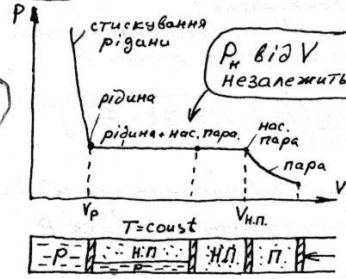
Адсорбція - поглинання поверхнею т.т. газів при низьких температ. при високих $t = 500°C$ - виділяє



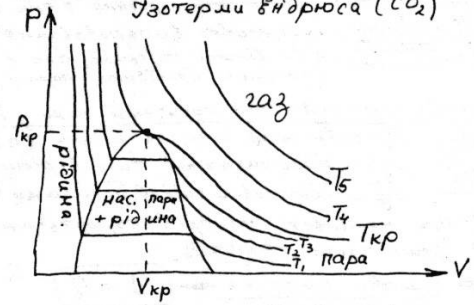


К-20

Ізотерма реального газу



Ізотерми Ендрюса (CO_2)



Критичний стан - двофазний стан при якому зрівноважені фази (фазовий перехід II роду) стають тотожними за всіма своїми властивостями.

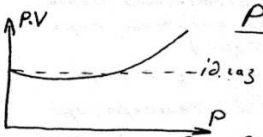
① При $T > T_{кр}$ самим стискуванням газ перевести у рідину неможливо (рідкого стану при $T > T_{кр}$ не існує)

② $\rho_{рід} = \rho_{н.п.}$ при $T = T_{кр}$.

③ Зникає поверхневий натяг рідини

④ Теплота пароутворення $\gamma_{кр} = 0$

⑤ Виникають інтенсивні флуктуації густини на яких відбувається інтенсивне розсіяння світла та рентгенівського проміння



Реальний газ

Рівняння ідеального газу - описують розріджені гази. При низьких і високих температурах, високих тисках - значні відхилення від реальності

Рівняння Ван-дер-Ваальса - наближене рівняння стану реальних газів

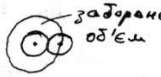
$$\left(P + \frac{m^2}{\mu^2}\frac{a}{V^2}\right)\left(V - \frac{m}{\mu} b\right) = \frac{m}{\mu} RT$$

Введено поправки:

① враховується додатковий внутрішній тиск $\frac{a}{V^2}$ зумовлений притяганням молекул.

② враховано розміри і відштовхування (тверді кулі) молекул

$b = N_A \cdot 4V_0$ (V_0 - власний об'єм молекули)



Критичні параметри (вивести...)

$$T_{кр} = \frac{8a}{27Rb} \quad V_{кр} = 3b \quad P_{кр} = \frac{a}{27b^2}$$

або

$$a = 3V_к^2 P_к \quad b = \frac{V_к}{3} \quad R_{кр} = \frac{8}{3}\frac{V_к P_к}{T_к}$$

якщо пара далеко від насичення $R = R_{ід}$.

ef - пересичена пара (дуже чиста речовина)

bc - розтягнута рідина (перегріта рідина)

cde - на практиці не реалізується.

$T_{кр\,H_2O} = 374°C$ $T_{кр\,He} = 5{,}2$ K

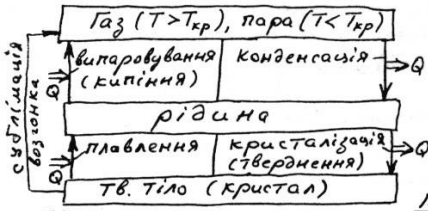
$P_{кр\,H_2O} = 218$ атм. $m_{H_2O} = 1$ г $V_{кр_{H_2O}} = 3$ см³

К19 Фазовий стан – стан речовини, який визначається тільки розташуванням атомів

Фазові переходи – перехід речовини з однієї фази в іншу

І-го роду – супроводяться стрибкоподібною зміною U та ρ і пов'язані з виділенням або поглинанням тепла (при $T=const$, $P=const$) (випаровування, конденсація, плавлення, кристалізація...)

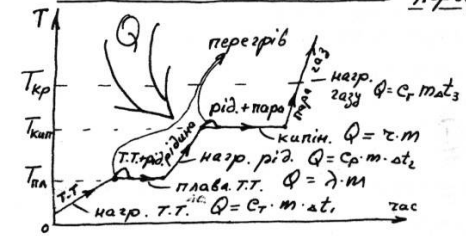
ІІ-го роду – пов'язані із зміною теплоємності і внутрішньої будови (симетрії) – стрибком (перехід Не у надтекучий стан, перехід у надпровідний стан, перехід феромагнетик – парамагнетик ...)

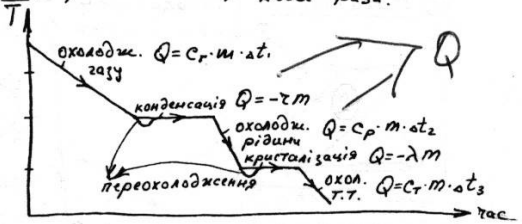


$\gamma = \frac{Q_{вип}}{m}$ – питома теплота випаровування – витрачається на роботу проти сил притягання між молекулами і на роботу проти зовнішнього тиску

$\lambda = \frac{Q_{пл}}{m}$ – питома теплота плавлення – витрачається на руйнування кристалічної решітки (послаблення міжатомного зв'язку, утворення вакансій)

перегрів (переохолодження) – утворення зародків нової фази.





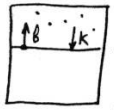
Випаровування – неперервний процес вильоту молекул з поверхні рідини, зумовлений тепловим рухом

МКТ: Молекули рідини (т.т.) мають різні швидкості. Найбільші швидкі з них володіють достатньою енергією, щоб покинути рідину (т.т.), подолавши сили притягання з боку інших молекул, що розташовані у поверхневому шарі. Внаслідок цього, середня енергія молекул, що залишаються – зменшується – рідина (т.т.) охолоджується. Щоб температура не змінялась, рідині (т.т.) необхідно неперервно надавати Q.

Швидкість випаровування – (кількість молекул, що вилітає з $1\,м^2$ за $1\,с$)

визначається: 1. Рід рідини 2. Температура 3. Тиск пари над рідиною (конденсація – відкачка, вітер).

Швидкість конденсації: 1. n-концентрація молекул пари над рідиною 2. T.



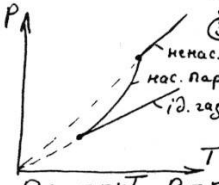
Закрита посудина ($T=const$)

1. Пара відсутня (за рахунок випаровування, яке йде з постійною швидкістю, зростає $n_{пари}$ → з'являється конденсація, швидкість якої наростає ($n_{пари}\uparrow$)

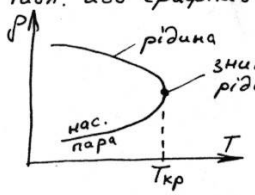
2. **Динамічна рівновага** $N_{випар.}=N_{конденс.}$

швидкість випаровування = швидкість конденсації → система прийшла до теплової рівноваги – *пара насичена*...

Насичена пара ① Виявляється по наявності рідини ② Характеризується $P_н$ – тиск насиченої пари – залежить тільки від температури, не залежить від V ③ $P_н$ – з табл. або графіків $P_н$ від T



$P_{ід.г.}=nkT$ $P_н=nkT$

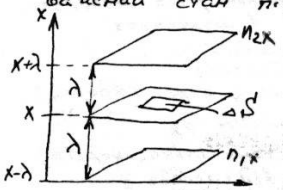


Теплоенергетика...

К-12 **Явища переносу** – процеси переносу маси (дифузія), імпульсу (в'язкість), енергії (теплопровідність)

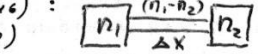
І Дифузія – процес проникнення одного газу в об'єм, зайнятий іншим газом, або рух газу в області де концентрація менша – самодифузія

Дифузія приводить до вирівнювання концентрацій. Якщо нерівноважний стан підтримувати встановиться стаціонарний процес



Нехай у посудині підтримується різниця концентрацій $\Delta n = n_1 - n_2$, так що у кожному шарі вона визначається координатою $n = n(x)$ Відомо швидкість зміни концентрації уздовж OX – $\frac{\Delta n}{\Delta x}$ – – градієнт концентрації. Тоді $\Delta n = -\frac{\Delta n}{\Delta x}\cdot 2\lambda = (n_{1x}-n_{2x})$

Виберемо площадку ΔS. Число дифундуючих молекул за час $\Delta t = \frac{\lambda}{\langle v\rangle}$ (без стикань):



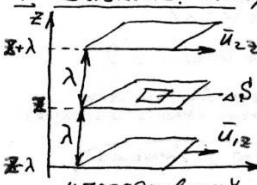
$$Z_1 = \frac{1}{6}\Delta S\cdot\lambda\cdot n_{1x}\ (вверх) \qquad Z_2 = \frac{1}{6}\Delta S\cdot\lambda\, n_{2x}\ (вниз)$$

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = \frac{1}{6}\Delta S\lambda(n_{1x}-n_{2x}) = -\frac{1}{6}\Delta S\lambda\frac{\Delta n}{\Delta x}\cdot 2\lambda = -\frac{1}{3}\Delta S\lambda^2\frac{\Delta n}{\Delta x}\langle v\rangle\Delta t$$

$\Delta Z = -\mathcal{D}\frac{\Delta n}{\Delta x}\Delta S\cdot\Delta t$ – з-н дифузії $\qquad \mathcal{D} = +\frac{1}{3}\cdot\lambda\cdot\langle v\rangle$ коеф. дифузії

$\Delta M = -\mathcal{D}\frac{\Delta \rho}{\Delta x}\cdot\Delta S\cdot\Delta t$ – знак $\ominus$ означає, що маса переноситься в сторону зменшення густини.

ІІ В'язкість – внутрішнє тертя – шари газу впорядковано рухаються з різними швидкостями вздовж OX – між ними виникають сили внутрішнього тертя (в'язкість) внаслідок обміну імпульсами. Як встановив Ньютон $F_{тр} = -\eta\frac{\Delta u}{\Delta z}\Delta S$ де $\frac{\Delta u}{\Delta z}$ – швидкість зміни впорядкованої течії газу вздовж OZ – градієнт швидкості. Молекули, що проходять через ΔS несуть з собою



упорядкований імпульс $P_0 = m_0 u$. Кількість молекул вверх або вниз рівна $Z = \frac{1}{6}n\Delta S\cdot\lambda$. Тоді імпульс перенесений уверх $\bar{P}_1$ вниз $\bar{P}_2$ $\bar{P}_1 = Z\cdot m_0 u_{1z}$ $\bar{P}_2 = Z\cdot m_0 u_{2z}$ $du = u_{2z}-u_{1z} = -\frac{\Delta u}{\Delta z}\cdot 2\lambda$ (−) (−)

$$\Delta\bar{P} = \bar{P}_1-\bar{P}_2 = Z\cdot m_0(u_{1z}-u_{2z}) = -Z m_0\frac{\Delta u}{\Delta z}\cdot 2\lambda = -\frac{1}{6}n\Delta S\cdot\lambda\cdot m_0\frac{\Delta u}{\Delta z}\cdot 2\lambda =$$

$$= -\frac{1}{3}n\Delta S\lambda m_0\frac{\Delta u}{\Delta z}\cdot\langle v\rangle\cdot\Delta t \to F_{тр} = \frac{\Delta\bar{P}}{\Delta t} = -\frac{1}{3}n\cdot m_0\lambda\cdot\langle v\rangle\frac{\Delta u}{\Delta z}\Delta S = -\eta\frac{\Delta u}{\Delta z}\Delta S$$

$F_{тр} = -\eta\frac{\Delta u}{\Delta z}\Delta S$ – сила в'язкого тертя $\qquad \eta = \frac{1}{3}n\cdot m_0\lambda\langle v\rangle = \frac{1}{3}\rho\lambda\langle v\rangle$ коеф. в'язкості

$\Delta p = -\eta\frac{\Delta u}{\Delta z}\Delta S\cdot\Delta t$ – р-ня переносу імпульсу.

З-н розподілу енергії по ступенях свободи

На кожну ступінь свободи молекули в середньому припадає однакова кінетична енергія рівна $\frac{1}{2}kT$. Якщо молекула має i ступенів свободи її енергія $\bar{E} = \frac{i}{2}kT$ $\qquad i = i_{поступ} + i_{оберт} + 2i_{коливн.}$ $\qquad \bar{E}_{кол} = \bar{E}_{кін.} + \bar{E}_{потенц.}$

Одноатомний газ $i=3 \to \bar{E} = \frac{3}{2}kT$ Двоатомний газ $i = 3_п + 2_{об} = 5$ $\bar{E} = \frac{5}{2}kT$

Триатомний і більше $i=6$ $\bar{E} = 3kT$ (як гігантські молекули)

Броунівський рух ① Броунівські частинки приймають участь у тепловому русі, на них поширюються висновки МКТ ② Розподіл Больцмана $n = n_0 e^{-\frac{mg(1-\frac{\rho}{\rho_0})h}{kT}}$

③ Розподіл Максвелла.

К-13 **Повна енергія системи (тіла)** $E = K + П + U$

а) К - кінетична енергія мех. руху системи, як єдиного цілого
б) П - потенціальна енергія системи у зовнішніх силових полях
в) U - внутрішня енергія системи

Внутрішня енергія - U

а). Кінетична енергія теплового поступального і обертальн. руху молекул
б). Кінетична і потенціальна енергія коливань атомів в молекулах
в). Потенціальна енергія міжмолекулярної взаємодії
г). енергія електронних оболонок атомів і іонів (хімічна)
ґ). кінетична і потенціальна енергія взаємодії нуклонів у ядрах (ядерна).

У термодинаміці U - однозначно визначається (з точністю до U_0 = хімічна + ядерна) параметрами системи (кожному стану - певна енергія)

$\Delta U = U_2 - U_1$ - зміна внутрішньої енергії не залежить від способу зміна стану системи.

$\Delta U = 0$ для колового процесу (сист. повернулась до початкового стану) $\oint dU = 0$

Внутрішня енергія ідеального газу $U = \sum_{i=1}^{N} E_i$ - сума кінетичних енергій його молекул

$U = N \cdot \bar{E} = N \cdot \frac{i}{2} kT = \frac{m}{\mu} N_A \frac{i}{2} kT = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT = \nu \cdot \frac{i}{2} RT = U$ - вн. ен. ід. газу

одноатомн. газ	двоатомн. газ (жорсткі молекули)	багатоатомн. газ (жорсткі молекули)
$i = i_{пост} = 3$	$i = i_{пост}^{(3)} + i_{оберт}^{(2)} = 5$	$i = i_{пост}^{(3)} + i_{оберт}^{(3)} = 6$

$\Delta U = U_2 - U_1 = \nu \frac{i}{2} R \Delta T$ - зміна внутр енергії ідеального газу $\Delta U \sim \Delta T$

$U = f(T)$ - внутр. енергія ідеального газу визначається тільки його T і ν

для $T = const \rightarrow U = const \rightarrow \Delta U = 0$

Для реальних газів $U = f(T, V)$ - при зміні V змінюється відстань між молекулами → змін. потенц. енергія міжмолекулярної взаємодії

Зміна U тіла завжди зв'язана з його взаємодією з іншими тілами і оточуючим середовищем

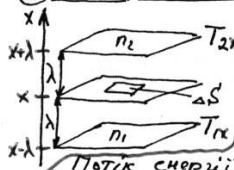
U змінюється { ① при виконанні роботи - A ; ② при теплообміні (теплопередачі) - Q } Приклади ...

Теплообмін - передача енергії без виконання роботи

Способи теплообміну: ① теплопровідність ② конвекція ③ випромінення

Приклад: котел з водою над вогнем ...

① **Теплопровідність** - перенос внутрішньої енергії (у різних шарах T - різна → різна і середня енергія руху молекул, при проходженні через ΔS молекули переносять певну енергію)



Початкові умови: задан розподіл температур $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ - показує зміну T на одиницю довжини якщо $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ - мале, можна вважати $\rho_1 = \rho_2 \rightarrow n_1 = n_2$, тоді енергія, що переноситься потоком молекул через ΔS за $\Delta t = \frac{\lambda}{\langle v \rangle}$

вверх $Q_1 = N_1 \bar{E}_1 = \frac{1}{6} n_0 S \cdot \lambda \cdot \frac{3}{2} k T_1$, вниз $Q_2 = N_2 \bar{E}_2 = \frac{1}{6} n_0 S \lambda \frac{3}{2} k T_2$

Потік енергії $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \frac{1}{4} n_0 S \lambda k (T_1 - T_2) = -\frac{1}{4} n_0 S \lambda k \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot 2\lambda \right) =$

$= -\frac{1}{2} n_0 S \lambda k \frac{\Delta T}{\Delta x} \langle v \rangle \Delta t = -\frac{1}{2} n \lambda \langle v \rangle k \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t$

враховуємо $c_v = \frac{C_{v\mu}}{\mu} = \frac{\frac{3}{2}R}{\mu} = \frac{3kN_A}{2\mu} = \frac{3k}{2m_0}$ c_v - питома теплоємність; $C_{v\mu}$ - молярна теплоємність

тоді $\Delta Q = -\frac{1}{3} \rho \lambda \langle v \rangle c_v \frac{\Delta T}{\Delta x} \Delta S \cdot \Delta t$ $\varkappa = \frac{1}{3} \rho \lambda \langle v \rangle c_v$ - коеф. теплопровідності

$\Delta Q = -\varkappa \frac{\Delta T}{\Delta x} \cdot \Delta S \cdot \Delta t$ - р-ня теплопровідності (експериментально, Фурьє).

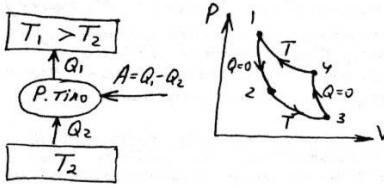
② **Конвекція** - течія нагрітих (рід) шарів рідини або газу відповідно до закону Архімеда (повітряне і водяне опалення приміщень ...)

③ **Теплове випромінення** - електромагнітне випромінення за рахунок внутр. енергії

$R_E = \sigma T^4$ - з-н Стефана - Больцмана ... R_E - повна енергетична випр. здатність

$E = \sigma T^4 S t$

К-18 **Холодильні машини** (в ідеальній машині холодильний цикл Карно проходить у зворотному напрямі, робота виконується над машиною).



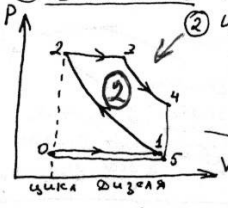
Холодильний коефіцієнт $K = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

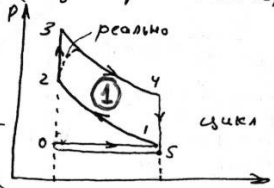
Якщо машина працює як нагрівник (тепловий насос - ефективніший за звичайні нагрівачі) її ефективність $K = \frac{Q_1}{A} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$

I Парова машина - історично перший тепловий двигун (1800р - η = 2-3% 1980р - η = 18-20%) 1776 рок. Ползунов 1784 англ. Дж. Уатт

II Двигуни внутрішнього згорання

① Цикл Отто (високоякісне пальне, електрична сист. запалення)
② цикл Дизеля (низькосортне паливо, без сист. запалення)





01 - поршень вниз - засмоктує горючу суміш
12 - поршень вверх - стиск суміші
2'3 - поршень у верхній точці - іскра - - швидке згорання суміші
34 - поршень униз - робочий хід
45 - відкривається випускний клапан - охолодження
50 - виштовхування продуктів згорання.

01 - засмоктування повітря
12 - адіабатний стиск і нагрівання повітря
2 - вприскування палива і його самозаймання.
23 - повільне ізобарне згорання палива.
34 - адіабатне розширення
234 - робочий хід
45 - відкривається випускний клапан
50 - виштовхування продуктів згорання

III Парова турбіна (найпотужніші двигуни $N \sim 10^6$ кВт η = 40-45%)

IV Газова турбіна **V Реактивні двигуни**

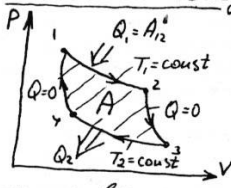
Екологічні проблеми ...
Парниковий ефект ... Озонові діри ...

Реферат: II з-н т.д. Ентропія. Теплова загибель Всесвіту.

К-17 **Теплові двигуни** – періодично працюючі пристрої, що перетворюють внутрішню енергію палива у механічну енергію.

Нагрівник $-T_1$ → Q_1 → Робоче тіло (газ, пара) → $A'=Q_1-Q_2$ → Q_2 → Холодильник T_2 (атмосфера)

Ідеальний двигун = цикл Карно + оборотний процес



Розрахуємо роботу за цикл

$A'=A'_{12}+A'_{23}+A'_{34}+A'_{41}$

$A'_{23}=-C_{v\mu}\cdot\nu\cdot(T_2-T_1)$

$A'_{41}=-C_{v\mu}\cdot\nu\cdot(T_1-T_2)=-A'_{23}$

На ділянках адіабат роботи розширення і стиснення взаємо компенсуються (ΔT – однакові).

Тоді $A'=\nu RT_1\ln\frac{V_2}{V_1}+\nu RT_2\ln\frac{V_4}{V_3}=\nu R\left(T_1\ln\frac{V_2}{V_1}-T_2\ln\frac{V_3}{V_4}\right)=\nu R\ln\frac{V_2}{V_1}(T_1-T_2)$ – робота двигуна за 1 цикл.

З рівняння адіабати $TV^{\gamma-1}=const$

$$\left.\begin{aligned}T_1V_2^{\gamma-1}&=T_2V_3^{\gamma-1}\\T_1V_1^{\gamma-1}&=T_2V_4^{\gamma-1}\end{aligned}\right\}\rightarrow\frac{V_2}{V_1}=\frac{V_3}{V_4}$$

η – К.К.Д. ідеального теплового двигуна

$$\eta=\frac{A'}{Q_1}=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}=\frac{\nu R\ln\frac{V_2}{V_1}(T_1-T_2)}{\nu RT_1\ln\frac{V_2}{V_1}}=\frac{T_2-T_1}{T_1}$$

$$\eta_{max}=\frac{T_1-T_2}{T_1}$$ – II з-н. Т.Д.

$$\eta_{реальної}=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}$$

- К.К.Д ідеальної теплової машини
① Не залежить від роду робочого тіла.
② **max** у порівнянні з іншими циклами у тому ж інтервалі температур (теореми Карно)
③ $\eta_{max}<1$ завжди.

У реальних двигунів К.К.Д завжди менше – реальні процеси необоротні – завжди є втрати тепла на теплообмін і подолання тертя.

З чисельних дослідів → **II з-н. термодинаміки** (визначає напрям перебігу реальних процесів у макросистемах)

① Неможливий циклічний процес, єдиним результатом якого була б передача теплоти від тіла менш нагрітого до більш нагрітого (Клаузіус)
② Не можна здійснити тепловий цикл, єдиним результатом якого було б перетворення одержаного тепла повністю в роботу (У. Томсон – лорд Кельвін).
③ К.К.Д. теплових машин <1
④ Вічний двигун другого роду неможливий

Фізичний зміст – енергія теплового руху молекул речовини якісно відрізняється від всіх інших видів енергії – вона може перетворитись в любий інший вид енергії лише частково (знецінення енергії). Внаслідок цього, любий процес з перетворенням любого виду енергії в теплову – необоротний.

S – Ентропія – міра зростання хаосу і знецінення – (функція стану) теплової форми енергії

$\Delta S=S_2-S_1$ – зміну ентропії вимірюють $\Delta S=\int_1^2\frac{dQ}{T}$ $\Delta S=\sum\frac{\Delta Q}{T}$

II з-н. Т.Д. – В ізольованій системі ентропія зростає

Фіз. зміст ентропії: $S=k\ln W$ – ентропія – міра безладдя – пропорційна логарифму термодинамічної імовірності макростану газу W – ...

II з-н. Т.Д. Природа прямує процеси від станів менш імовірних до станів більш імовірних, до рівноважного стану (ентропія max).

Статистичне формулювання II з. Т.Д. показує, що він не є категоричним законом природи, хід процесів у зворотному напрямі не є забороненим, але має дуже малу імовірність.

II з-н. Т.Д. не застосовний: до мікропроцесів (броунівський рух, флуктуації густини повітря у малих об'ємах (блакитний колір неба)) і неізольованих систем (Всесвіт, людина...)

К-14 **Q – кількість теплоти** – кількість енергії, що передана тілу зовнішніми тілами, під час теплообміну

$Q=c_T m\Delta T=C_T\cdot\Delta T=C_{T,M}\cdot\nu\cdot\Delta T$

$c_T=\frac{Q}{m\cdot\Delta T}$ – питома теплоємність... $\left[\frac{Дж}{кг\cdot K}\right]$

$C_T=\frac{Q}{\Delta T}$ – теплоємність тіла... $\left[\frac{Дж}{K}\right]$

$C_{T,M}=\frac{Q}{\nu\cdot\Delta T}$ – молярна теплоємність... $\left[\frac{Дж}{моль\cdot K}\right]$

$Q=[Дж]$ $C_{вода}=1\frac{кал}{г\cdot K}$

$1\frac{кал}{калорія}=4{,}19\,Дж$ – механічний еквівалент теплоти – це співвідношення, встановлене експериментально, виражає еквівалентність теплоти і роботи, тобто робота перетворюється у теплоту і теплота в роботу у строго визначених кількісних співвідношеннях (досліди Джоуля...) Теорія теплороду...

Рівняння теплового балансу

З дослідів з калориметричними вимірюваннями → для ізольованої системи $\Sigma Q=0\rightarrow Q_1+Q_2+Q_3+\ldots=0\rightarrow C_1m_1(\Theta-t_1)+C_2m_2(\Theta-t_2)+C_3m_3(\Theta-t_3)+\ldots=0$

або $|\Sigma Q_{віддана}|=\Sigma Q_{отримана}$

Закон збереження енергії (Гельмгольц, 1847, нім.) на основі чисельних спостережень і дослідів

У замкнутій (ізольованій) системі енергія не зникає і не виникає з нічого, вона може лише перетворюватись з одного виду в інший або передаватись від одного тіла до другого. Приклади...

I з-н термодинаміки...

$\Delta U=Q+A$

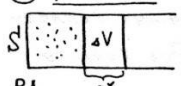
$Q=\Delta U+A'$

Вічний двигун (perpetuum mobile) першого роду неможливий. (Не може бути машини, яка виконувала б роботу, не витрачаючи при цьому ні якої енергії)

Робота і кількість теплоти – це не форми енергії, а лише різні способи її зміни і передачі від одного тіла до другого.

Робота в термодинаміці – ф-ція процесу

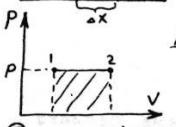
① $P=const$



Робота газу $A'=F\cdot\Delta x=P\cdot S\cdot\Delta x=P\cdot\Delta V$

A – робота зовнішніх сил над системою (газом)

$A=-P\Delta V$ $A=-A'$ – робота системи рівна роботі зовнішніх сил



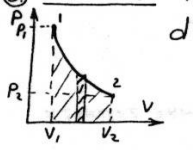
Робота газу чисельно рівна площі під графіком процесу в осях PV

якщо газ розширюється $A'>0$ $A<0$

стискується $A'<0$ $A>0$

② при $V=const\rightarrow A=0\rightarrow$ Ознака виконання роботи – зміна об'єму

③ $T=const$ Робота дорівнює площі під графіком.

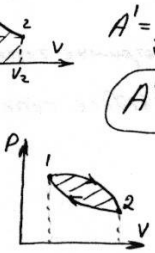


$dA'=P\cdot dV$ $A'=\int_{V_1}^{V_2}P\,dV$ $PV=\frac{m}{\mu}RT\rightarrow P=\frac{mRT}{\mu V}$

$$A'=\int_{V_1}^{V_2}\frac{mRT}{\mu}\frac{dV}{V}=\frac{mRT}{\mu}\cdot\ln V\Big|_{V_1}^{V_2}=\frac{mRT}{\mu}(\ln V_2-\ln V_1)$$

$A'=\frac{m}{\mu}RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ – робота при ізотермічному процесі

④



Робота системи при колловому процесі

$A'=A'_{12}+A'_{21}$ але $A'_{12}>0$ $A'_{21}<0$

$A'=$ [redacted] = площі обмеженій графіком процесу

К-15 Q - кількість теплоти - функція процесу.

теплоємність газу у різних процесах різна.

① $V=const$ $\Delta V=0 \to A=0$ $\boxed{\Delta U=Q}$ – І з-н термодинаміки для ізохорного процесу

C_v – питома теплоємність при $V=const$ $\quad C_v=\frac{Q}{m\cdot\Delta T}=\frac{\Delta U}{m\cdot\Delta T}$ $\quad \Delta U=c_v m\Delta T$

C_V – теплоємність тіла при $V=const$ $\quad C_V=\frac{Q}{\Delta T}=\frac{\Delta U}{\Delta T}$ $\quad \Delta U=C_V\cdot\Delta T$

C_{VM} – молярна теплоємність при $V=const$ $\quad C_{VM}=\frac{Q}{\nu\cdot\Delta T}=\frac{\Delta U}{\nu\cdot\Delta T}$ $\quad \Delta U=C_{VM}\cdot\nu\cdot\Delta T$

Для ідеального газу

$C_{VM}=\frac{Q}{\nu\Delta T}=\frac{\Delta U}{\nu\cdot\Delta T}=\frac{\nu\cdot\frac{i}{2}R\Delta T}{\nu\cdot\Delta T}=\frac{i}{2}R$ одноатомний – $C_{VM}=\frac{3}{2}R$; двоатомний – $C_{VM}=\frac{5}{2}R$; триатомний – $C_{VM}=3R$

② $P=const$ $\boxed{Q=\Delta U+A'=\Delta U+P\Delta V}$ І з-н т.д.

C_{PM} – молярна теплоємність при $P=const$ $\quad C_{PM}=\frac{Q}{\nu\Delta T}=\frac{\Delta U+P\Delta V}{\nu\cdot\Delta T}$

для ідеального газу $C_{PM}=\frac{\nu\frac{i}{2}R\Delta T+P\Delta V}{\nu\Delta T}=\frac{\nu\frac{i}{2}R\Delta T}{\nu\Delta T}+\frac{\nu R\Delta T}{\nu\Delta T}=\frac{i}{2}R+R=C_{VM}+R$ $\quad \boxed{C_{PM}=C_{VM}+R}$ р-ня Майєра

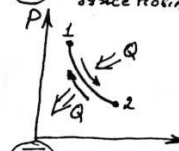
③ $T=const$ $\Delta T=0\to\Delta U=0$ $\boxed{Q=A'}$ І з-н т.д.

$C_T=\frac{Q}{\Delta T}=\frac{\int P\Delta V}{\Delta T}\to\pm\infty$ теплоємність при $T=const$

④ Адіабатний процес – $Q=0$ – відбувається у теплоізольованих системах: калориметр, термос, посудина Дюара – посудина з подвійними стінками (скло, метал), між якими вакуум (для попередження конвекції і теплопровідності). Стінки дзеркальні (для відбивання випромінення і попередження випромінення самими стінками). Розміри – до цистерни на декілька тон. Зберження рідких газів (N_2, He)

Застосування І з-ну термодинаміки.

Ⅰ $T=const$ *дуже повільно* $\quad \boxed{Q=A'}$ … Ізотермічний процес протікає тільки при наявності теплообміну



при розширенні (перехід 1→2) робота газу $A'>0\to Q>0$ – газ отримує теплоту

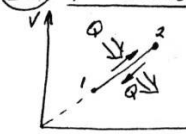
при 2→1 $A'<0\to Q<0$ – газ віддає теплоту

Ⅱ $V=const$ $\quad \boxed{\Delta U=Q_v}$ $\quad Q_v=c_v\cdot m\cdot\Delta T=\nu\cdot C_{VM}\cdot\Delta T$ $\quad \boxed{\Delta U=C_{VM}\cdot\nu\cdot\Delta T}$

при 1→2 $U\uparrow\to\Delta U>0\to Q>0$ – газ отримує теплоту

при 2→1 $U\downarrow\to\Delta U<0\to Q<0$ – газ віддає теплоту

Ⅲ $P=const$ $\quad \boxed{Q_p=\Delta U+A'}$ $\boxed{Q_p=\Delta U+P\Delta V}$ $\quad Q_p=C_{PM}\cdot\nu\cdot\Delta T=c_p\cdot m\cdot\Delta T$



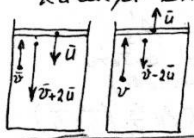
при 1→2 $\Delta V>0$, $\Delta T>0$, $A'>0$, $\Delta U>0$ $\}\ Q>0$ газ отримує теплоту

при 2→1 $\Delta V<0$, $\Delta T<0$, $A'<0$, $\Delta U<0$ $\}\ Q<0$ газ віддає теплоту

К-16 Адіабатний процес ($Q=0$, оборотний).

$\boxed{\Delta U=A}$ $\boxed{\Delta U=-A'}$ обмін енергією з оточуючим середовищем відбувається шляхом виконання роботи.

Ідеальних теплоізоляторів у природі немає, щоб $Q=0$ процес проводять швидко, внаслідок цього теплообмін не встигає відбутись (приклади: запалення газової суміші у дизельних двигунах, вертикальний рух повітря в атмосфері, поширення звукових хвиль, витікання газів через сопла реактивних двигунів, отримання пересиченої пари у камері Вільсона).



Тлумачення адіабатного процесу на основі МКТ: при $V\downarrow$ – опускання поршня ($A>0$) – молекули, відбиваючись від нього, мають швидкості ($v+2u$) більші, ніж до відбивання (v), це означає, що вони отримують додаткову енергію $\Delta U>0\to U\uparrow\to T\uparrow$

$A'=-\Delta U$ *для 1 моля* $\to PdV=-C_{VM}dT\to C_{VM}dT+\frac{RT}{V}dV=0\to$

$C_{VM}\frac{dT}{T}+R\frac{dV}{V}=0$ – проінтегруємо $\int C_{VM}\frac{dT}{T}+\int R\frac{dV}{V}=0\to C_{VM}\ln T+R\ln V=const$

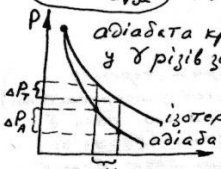
потенціюємо останній вираз $e^{\ln T+\frac{R}{C_{VM}}\ln V}=e^{\ln T}\cdot e^{\ln V^{\frac{R}{C_{VM}}}}=T\cdot V^{\frac{R}{C_{VM}}}=$

$=T\cdot V^{\frac{C_{PM}-C_{VM}}{C_{VM}}}=T\cdot V^{\frac{C_{PM}}{C_{VM}}-1}=$ $\boxed{T\cdot V^{\gamma-1}=const}$ – рівняння адіабати.

Врахуємо $T=\frac{PV}{R}$ тоді $\frac{PV}{R}\cdot V^{\gamma-1}=\frac{PV^\gamma}{R}=const,\to$ $\boxed{PV^\gamma=const}$ р-ня адіабати (з-н Пуассона)

$\gamma=\frac{C_{PM}}{C_{VM}}$ показник адіабати

газ	C_{VM}	C_{PM}	γ
одноатомний	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{5}{3}=1{,}66$
двоатомний	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$	$\frac{7}{5}=1{,}40$
багатоатомний	$3R$	$4R$	$\frac{4}{3}=1{,}33$



Робота при адіабатному процесі

$A'=-\Delta U=-C_{VM}\nu\Delta T=C_{VM}\nu(T_1-T_2)$

але $T_1V_1^{\gamma-1}=T_2V_2^{\gamma-1}\to T_2=T_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$ $\to$ $\boxed{A'=C_{VM}\nu T_1\left(1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}\right)}$

врахуємо: $C_{PM}-C_{VM}=R\left/\frac{1}{C_{VM}}\right.\to\gamma-1=\frac{R}{C_{VM}}\to C_{VM}=\frac{R}{\gamma-1}$ $\quad \boxed{A'=\frac{\nu R}{\gamma-1}(T_1-T_2)}$ → робота при адіабатн. процесі

Потік повітря вгору практично адіабатний (мала теплопровідність повітря) при зміні h змінюється тиск (К-10) $\frac{dP}{P}=-\frac{\mu g}{RT}dh$

при адіабатному процесі: $TV^{\gamma-1}=const$ але $V=\frac{\nu RT}{P}\to T\left(\frac{\nu RT}{P}\right)^{\gamma-1}=const_1\to\frac{T^\gamma}{P^{\gamma-1}}=const_2\to\frac{T}{P^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}=const_3\to$

$TP^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}=const$ – продиференціюємо $\to dT\cdot P^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}+T\cdot\left(\frac{1-\gamma}{\gamma}\right)\cdot P^{\frac{1-2\gamma}{\gamma}}\cdot dP=0\to$

$\frac{dT}{T}=-\frac{(1-\gamma)}{\gamma}\frac{dP}{P}=\frac{1-\gamma}{\gamma}\frac{\mu g dh}{RT}\to$ $\boxed{\frac{dT}{dh}=-\frac{\gamma-1}{\gamma}\frac{\mu g}{R}}$ – градієнт температури в атмосфері $\frac{\Delta T}{\Delta h}=-10\frac{K}{км}$ – близько до реальних

Ці розрахунки справедливі для сухого повітря, або для повітря, в якому водяна пара далека від насичення. Якщо у повітрі водяна пара насичена, то при адіабатному розширенні (підніманні вверх) вона охолоджується і починає конденсуватись (виникають хмари – сукупність маленьких краплин H_2O), при цьому виділяється теплота → вологе повітря охолоджується менше сухого

Політропні процеси $C=const$ – оборотні рівноважні процеси

$\boxed{PV^n=const}$ р-ня політропи

$T=const\to n=1$ $\quad P=const\to n=0$

$Q=const\to n=\gamma$ $\quad V=const\to n=\pm\infty$