

## Лекція 2.9

### Будова речовини

#### План

1. Агрегатні стани речовини.
2. Гази.
3. Рідини.
4. Тверді речовини.
5. Вправи

#### 8.1. Агрегатні стани речовини

Хіміки вивчають перетворення речовин, що знаходяться в трьох агрегатних станах - газоподібному (гази), рідкому (рідини) і твердому (тверді аморфні тіла або кристали) (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Властивості газів, рідин, твердих речовин

<b>Фізичний стан</b>	<b>Об'єм</b>	<b>Форма</b>	<b>Стисливість</b>	<b>Щільність</b>
Газ	Збігається з обсягом посудини, сильно залежить від температури і тиску	Заповнює посудину, приймаючи його форму	Висока	Низька
Рідина	Фіксований	Нефіксована, повністю або частково заповнює посудину	Мала	Від помірної до великої
Тверда речовина	Фіксований	Власна	Практично відсутня	Велика

**Гази.** Найбільш характерною властивістю є стисливість і здатність розширюватися. Гази не мають власної форми, вони розширюються до тих

пір, поки рівномірно не заповниться всю посудину, куди їх помістили. Це означає, що гази не мають власного обсягу, тобто обсяг газу визначається обсягом посудини, в якому він знаходиться. Газ надає на стінки посудини тиск, однаковий у всіх напрямках. Ще однією властивістю газів є їх здатність змішуватися один з одним у будь-яких співвідношеннях.

**Рідини.** Подібно газам, рідини не мають певної форми. Рідина приймає форму тієї посудини, в якій вона знаходиться, при сталому під впливом сили тяжіння деякому їй рівні. Однак на відміну від газу рідина має власний об'єм. Стисливість рідин дуже мала. Для того щоб помітно стиснути рідину, потрібний дуже високий тиск.

**Тверді речовини.** Тверді тіла відрізняються від рідин і газів наявністю власної форми і певного обсягу. Стисливість твердих тіл надзвичайно мала навіть при дуже високих тисках.

## 2. Гази

Газоподібному стану притаманні дві особливості:

- 1) відстань між молекулами зазвичай у кілька разів перевищує їх розміри;
- 2) гази здатні займати весь обсяг наданого їм простору.

Гази на відміну від рідин і твердих тіл можуть порівняно легко стискуватися. Для того щоб добре розуміти особливості будови газоподібної речовини, потрібно знати, чому дорівнює молярний об'єм газу, яка взаємозв'язок між займаним газом об'ємом і кількістю речовини, температурою і тиском, як визначити середню відстань між молекулами газу і як вона залежить від його тиску, з якою швидкістю рухаються молекули газоподібної речовини і від чого ця швидкість залежить.

Молярний об'єм газу - постійна величина, оскільки вона мало залежить від природи речовини. Молярний об'єм при тиску 1 атм (101,3 кПа) і температурі 0 °С (273 К) за законом Авогадро дорівнює 22,4 л. Газ, який строго підкоряється закону Авогадро, прийнято називати ідеальним.

Вибрані умови (1 атм, 0 °С) названі нормальними (н.у.). У шкільних курсах хімії та фізики незначними відхиленнями властивостей реальних газів від впливаючих із закону Авогадро для ідеального газу нехтують. Природно, що молярний об'єм газу залежить від температури і тиску. При 25 °С і тиску 1 атм (ці умови названі стандартними) молярний об'єм ідеального газу дорівнює вже 24,4 л.

Молярні об'єми реальних газів при одних і тих же умовах дещо відрізняються від молярного об'єму ідеального газу (табл. 2.1).

Молярні об'єми деяких газів при 0 °С і 1 атм

Газ	Молярний об'єм, л
H <sub>2</sub>	22,432
O <sub>2</sub>	22,391
Cl <sub>2</sub>	22,022
CO <sub>2</sub>	22,263
NH <sub>3</sub>	22,065
SO <sub>2</sub>	21,888
Ідеальний	22,41383

Пояснимо поняття молярного об'єму на прикладі наступного уявного експерименту. У циліндричний посуд, розділений на дві рівні частини гумовою мембраною, поміщені рівні кількості речовин хлору і водню (рис. 2.1) (гази вважати ідеальними). Чи відбудеться видавлювання гумової мембрани, що розділяє посудину, в бік одного з газів?

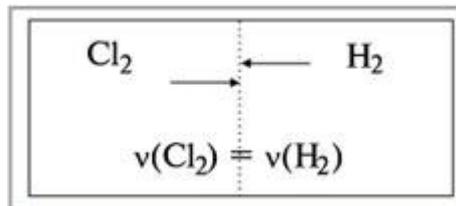


Рис. 2.1. Порівняння тисків, створюваних рівними кількостями речовин хлору і водню

При відповіді на поставлене питання необхідно мати на увазі, що тиск газу створюється за рахунок ударів його молекул об стінки посудини. Оскільки кількості молекул з обох сторін мембрани рівні, а маса молекули хлору майже в 35,5 рази більше маси молекули водню, можна припустити, що молекули хлору створять більший тиск і перегородка видавиться у бік водню. Однак ця відповідь невірна, бо не враховано відмінність у швидкостях руху молекул хлору і водню. Молекули водню рухаються швидше. Збільшення маси молекули газу компенсується зменшенням швидкості її руху. Тому тискам, створюваними різними газами, в результаті виявляться рівними. Формулювання закону Авогадро у зв'язку з вищевикладеним можна змінити: гази при однакових умовах займають рівні об'єми, а значить, створюють рівні тиски.

**Швидкість руху молекул газів.** Очевидно, що молекули газу в один і той же момент часу рухаються з різними швидкостями. У розрахунках швидкостей руху молекул повітря при 20 ° С були отримані дані, представлені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Швидкості руху молекул повітря при 20 °С

Діапазон швидкостей, м/с	Відсоток молекул, що мають дану швидкість
0–100	1
100–300	25
300–500	42
500–700	24
700–900	7
вище 900	1

Легко розрахувати середню квадратичну швидкість руху молекул газу, знаючи залежність швидкості руху молекули від її маси і температури:

$$V = \sqrt{3RT/m}.$$

Результати розрахунків для ряду молекул наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Середня квадратична швидкість ( $V$ ) молекул деяких газів при 25 ° С

Газ	$V$ , м/с
H <sub>2</sub>	1930 (~7000 км/ч)
He	1365
CH <sub>4</sub>	680
NH <sub>3</sub>	660
H <sub>2</sub> O	640
N <sub>2</sub>	515
O <sub>2</sub>	480
CO <sub>2</sub>	410

**Зв'язок температури, тиску, об'єму та кількості газоподібної речовини.** Всі параметри, що описують стан газу (кількість речовини, температура, тиск), входять в єдине рівняння:

$$pV = \nu RT,$$

де  $p$  - тиск,  $V$  - об'єм,  $\nu$  - кількість речовини,  $R$  - універсальна газова стала,  $T$  - абсолютна температура. Це так зване рівняння Клапейрона-Менделєєва, відоме також як рівняння стану ідеального газу. При користуванні даним рівнянням в нього необхідно підставляти всі параметри в рамках однієї системи одиниць.

Рекомендованої в даний час є система одиниць СІ, в якій тиск вимірюється в паскалях (Па,  $1 \text{ атм} = 101,3 \text{ кПа}$ ), об'єм - в кубічних метрах ( $\text{м}^3$ ,  $1 \text{ м}^3 = 1000 \text{ л}$ ), кількість речовини - в молях, температура в кельвінах (К,  $1 \text{ К} = 273 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а універсальна газова постійна дорівнює  $8,31 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ . З рівняння стану ідеального газу випливає, що збільшення тиску в два рази при постійній температурі призведе до зменшення обсягу газу у два рази (рис. 2.2).

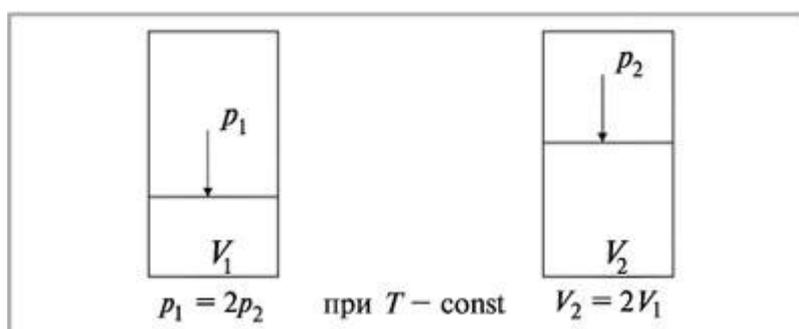


Рис. 2.2. Залежність обсягу газу від тиску при постійній температурі

Середні відстані між частинками газів. Визначимо як приклад середня відстань між атомами гелію при температурі  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  і атмосферному тиску. Один моль атомів гелію в цих умовах займе  $22,4 \text{ л}$ . Знайдемо об'єм, що доводиться на один атом гелію. З цією метою обсяг  $22,4 \text{ л}$  розділимо на кількість атомів? що знаходяться в ньому ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ). На один атом припадає обсяг  $3,72 \cdot 10^{-23} \text{ л}$ .

Якщо прийняти, що кожен атом гелію розташований в центрі кубика такого обсягу (рис. 2.3), то найближча відстань між атомами приблизно дорівнює кореню кубічному з цього обсягу:

$$r = \sqrt[3]{3,72 \cdot 10^{-23} (\text{л.})} = \sqrt[3]{3,72 \cdot 10^{-26} (\text{м}^3)} = 3,34 \text{ нм.}$$

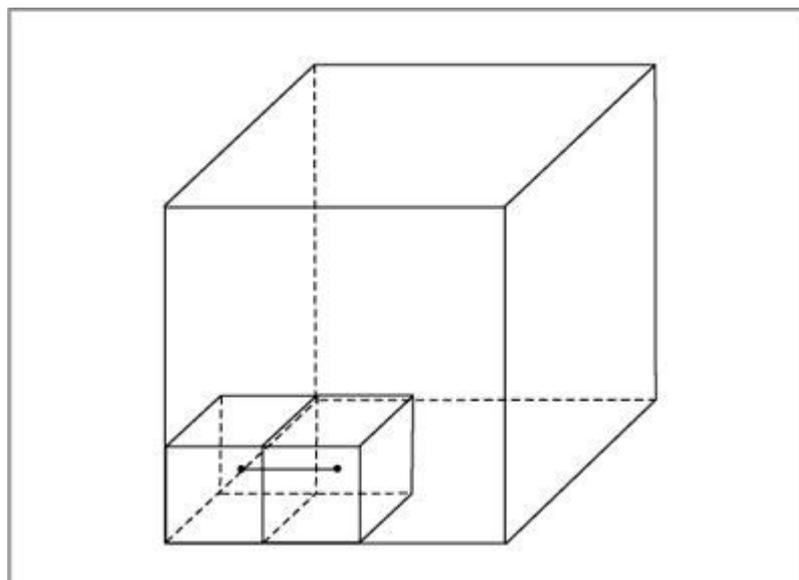


Рис. 2.3. Геометричний спосіб оцінки середньої відстані між молекулами газоподібної речовини

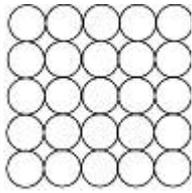
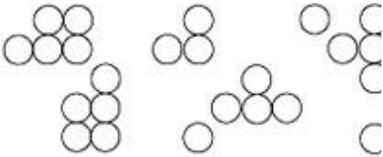
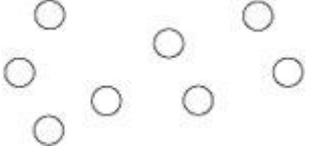
### 3. Рідини

Рідини займають проміжне положення між твердими речовинами і газами (табл. 8.5). Наприклад, сили тяжіння між частками (атоми, іони, молекули) в рідинах слабкіші, ніж у твердих речовинах, але більші, ніж у газах. Тому частинки рідин все ж утримуються разом в будь-якому обсязі. Однак на відміну від твердих речовин в рідинах сили тяжіння недостатні, щоб з'єднати частинки в впорядковані структури. Тому рідини не мають певної форми. Проте деякі експериментальні дані свідчать про те, що частки в рідинах все ж здатні упорядковуватися, утворюючи невеликі і малостійкі кластери. Утворення кластерів більш характерно для полярних рідин, ніж для неполярних.

Таблиця 3.1

Характеристики фізичних станів речовини

Характеристика	Тверда речовина	Рідина	Газ
Тяжіння між частинками	Сильне	Помірне	Слабке
Рух частинок	Коливальне	Помірне	Інтенсивне
Відстань між частинками	Дуже мале	Мале	Велике

	Висока (кристаліч на упаковка)	Невисока (кластери частинок)	Відсутня
Впорядкованість структури			

Частинки рідини, подібно часткам газу, знаходяться в стані безперервного руху. Вперше це експериментально виявив англійський ботанік Роберт Броун в 1827 р. Він спостерігав в мікроскоп за крихітними зернятками, плаваючими на поверхні води, і зауважив, що вони безперервно здійснюють хаотичні зигзагоподібний рух. Це так званий броунівський рух пояснюється зіткненнями частинок рідини із зернятками.

Розглянемо деякі властивості, які притаманні рідинам.

**Випаровування.** З відкритої поверхні рідини деякі її частинки поступово відлітають у газову фазу. Цей процес називається випаровуванням. Швидкість випаровування зростає при хоча б одній з таких умов: збільшення площі поверхні рідини, підвищенні температури, зменшенні зовнішнього тиску. Тиск, що створюється вилітаючими з рідини частинками, називається тиском пари даної рідини.

**Кипіння.** Рідина починає кипіти, коли тиск її пари досягає зовнішнього тиску. Температура, при якій це відбувається, називається температурою (точкою) кипіння. При кипінні рідини усередині неї утворюються бульбашки пару, і це викликає її бурління. Температуру кипіння рідини можна знизити, якщо зменшити зовнішній тиск. При постійному тиску температура киплячої рідини залишається незмінною до її повного википання.

**Замерзання.** Частинки рідини рухаються з досить великими швидкостями, що перешкоджає утворенню кристалічної решітки під дією сил тяжіння між ними. Однак при охолодженні рідини сили тяжіння все більше обмежують рух частинок з невисокою кінетичною енергією. У результаті такі частки утримуються у фіксованих положеннях, як в кристалічній решітці. Температура, при якій настає рівновага між рідким і твердим станами речовини, називається температурою (точкою) замерзання рідини.

**Плинність і в'язкість.** Подібно газам рідини можуть текти, і це їх властивість називається плинністю. Опір течією називається в'язкістю. На плинність і в'язкість впливає цілий ряд факторів. Найбільш важливими з них є сили тяжіння між молекулами рідини, а також форма, структура і відносна

молекулярна маса цих молекул. Плинність рідини, яка складається з великих молекул, нижче, ніж рідини, яка складається з малих молекул. В'язкості рідин в середньому в 100 разів вище вязкостей газів.

**Поверхневий натяг.** На молекулу, що знаходиться в глибині рідини, з усіх боків рівномірно діють сили межмолекулярного тяжіння. На поверхні рідини ці сили виявляються незбалансованими. Внаслідок цього поверхневі молекули відчувають дію результуючої сили, спрямованої всередину рідини. Тому поверхня рідини виявляється в стані натягу: вона весь час прагне скоротитися. Поверхневий натяг рідини - це мінімальна сила, яка необхідна, щоб подолати устремління частинок рідини всередину і тим самим утримати її поверхню від скорочення. Існуванням поверхневого натягу пояснюється сферична форма вільно падаючих крапель рідини.

**Дифузія.** Так називається процес перенесення речовини з області з високою концентрацією або високим тиском в область з меншою концентрацією чи меншим тиском. Дифузія в рідинах здійснюється набагато повільніше, ніж у газах, тому що частинки рідини упаковані набагато щільніше, ніж частки газу. Частинка, яка дифундує в рідині, піддається частим зіткненням і тому просувається насилу. У газах між частинками багато вільного простору, і вони можуть переміщатися значно швидше. Дифузія здійснюється між взаємно розчинними або змішуваними рідинами. Вона не відбувається між рідинами, не змішуються. На відміну від рідин всі гази змішуються один з одним, і тому дифузія одного в інший протікає легко.

#### 4. Тверді речовини

Тверді речовини складаються з щільноупакованих частинок. Цими частинками можуть бути атоми, молекули або іони. Більшість твердих речовин знаходяться в кристалічній формі. Це означає, що утворюють їх частки гранично впорядковані в регулярній просторовій структурі.

Існують, однак, і такі тверді речовини, в яких частки не настільки впорядковані, щоб утворити регулярну кристалічну структуру. Такі тверді речовини називають аморфними. Прикладом аморфної речовини є скло, в якому частки розташовані безладно. До аморфних речовин відноситься більшість полімерів. Полімерні молекули мають неоднакові розміри і тому не здатні щільно упакуватися з утворенням впорядкованої структури.

Один час вважалося, що деревне вугілля, кокс і сажа (різні форми вуглецю) є аморфними речовинами. Однак рентгеноструктурний аналіз показав, що всі ці форми вуглецю складаються з дрібних графітоподібних кристалів.

Розглянемо деякі властивості, які притаманні твердим речовинам.

У порівнянні з двома іншими станами (газоподібне та рідке) тверді речовини мають найбільшу впорядкованість. Саме цією високою впорядкованістю пояснюються багато фізичних властивостей твердих речовин.

Речовини загальної хімічної формули (наприклад,  $M$  кисл. ост., де  $M$  - метал), що мають кристалічну решітку одного типу, називаються ізоморфними. Ізоморфізм виявляється, наприклад, у натрій нітрату  $\text{NaNO}_3$  і кальцій карбонату  $\text{CaCO}_3$ , що знаходиться у формі мінералу кальциту. Обидві ці речовини мають ромбоedrничну кристалічну структуру.

Здатність будь-якої сполуки (складної речовини) існувати у двох і більше кристалічних формах називають поліморфізмом. Прикладом поліморфної сполуки є кремнезем, або оксид кремнію (IV)  $\text{SiO}_2$ . У його каркасній ковалентній структурі кожен атом кремнію пов'язаний з чотирма атомами кисню, утворюючи тетраedrничну упаковку. До числа кристалічних форм кремнезему відноситься кварц, який існує в декількох поліморфних модифікаціях. При нагріванні гексагональна структура кварцу при  $870^\circ\text{C}$  переходить в ромбічну, а потім при  $1470^\circ\text{C}$  в кубічну. При  $1710^\circ\text{C}$  кварц плавиться. Температура, при якій одна форма перетворюється на іншу, називається температурою переходу.

Якщо який-небудь хімічний елемент може існувати у вигляді двох або кількох простих речовин (наприклад, кисень і озон), то вважається, що він проявляє алотропію. Різні форми одного елемента називають алотропією. Алотропія може бути обумовлена утворенням кристалів різної модифікації (наприклад, алмаз і графіт). У цьому прикладі алотропія - окремий випадок поліморфізму. Алотропія відома для приблизно половини елементів.

Наприклад, вуглець існує у вигляді або алмазу, або графіту. Сірка може знаходитися в двох кристалічних формах - ромбічній і моноклінній - залежно від температури (рис. 8.4).

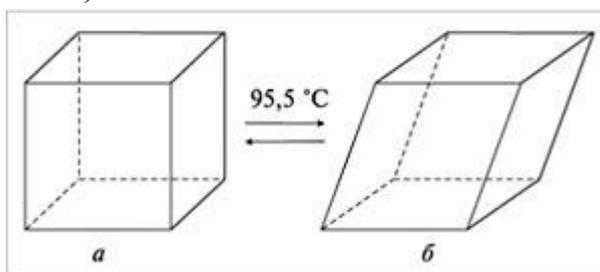
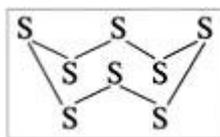


Рис. 4.1. Ромбічна (а) і моноклінна (б) алотропні модифікації сірки

Обидві кристалічні форми сірки є прикладами молекулярних кристалів. Молекули в них представляють собою гофровані цикли, в кожному з яких міститься по вісім ковалентно пов'язаних атомів сірки:



Тверда сірка може існувати також у третій алотропній формі - пластичної сірки, що складається з довгих ланцюжків атомів сірки. Ця форма є самою нестійкою. Вже при кімнатній температурі ланцюжки пластичної сірки руйнуються, утворюючи молекули S<sub>8</sub>, які кристалізуються в ромбічну структуру сірки.

Фосфор також може існувати в трьох алотропних формах. Червоний фосфор має каркасну кристалічну структуру, в якій кожен атом ковалентно пов'язаний з трьома іншими атомами фосфору. Білий фосфор є молекулярний кристал, кожна молекула якого містить чотири атома фосфору, ковалентно зв'язаних в тетраедричну структуру. Третій алотроп - чорний фосфор - утворюється з білого і червоного при високих тисках і існує у вигляді макромолекулярної шаруватої(слоистої) структури.

Стисливість твердих речовин практично дорівнює нулю. Всі тверді речовини мають певний об'єм. Одним з найбільш відомих властивостей твердих речовин є їх здатність зберігати свою форму. На відміну від рідин і газів тверді речовини здатні витримувати значні зовнішні навантаження. Щільність кожної речовини у твердому стані значно вища, ніж в газоподібному, і дещо більша, ніж у рідкому (винятком є вода, яка володіє більшою щільністю, ніж лід).

Кристалічні тверді речовини мають строго певну температуру плавлення. Аморфні речовини, наприклад скло, розм'якшуються в інтервалі температур. Всі тверді речовини характеризуються тиском пари, хоча воно, як правило, дуже малий. Особливо малий тиск пари у твердих речовин з іонною кристалічною решіткою.

Ентальпії (теплоти) плавлення твердих речовин набагато менші, ніж ентальпії випаровування відповідних рідин.

Тверді речовини можуть значно відрізнятися один від одного за своїм пластичним властивостям. Деякі з них, наприклад іонні речовини, зазвичай розколюються під великим навантаженням. Така властивість називається крихкістю. Інші, наприклад гума, є пружними. Після видалення зовнішнього навантаження вони набувають первісну форму.

Багато металів володіють властивостями гнучкості і тягучості. Гнучкий метал можна сплющити в тонкий лист, а тягучий витягнути в тонкий дріт.

Розрізняються тверді речовини і по здатності проводити тепло і електричний струм. Метали зазвичай мають гарну тепло-і електропровідність. Неметалеві речовини гірше проводять тепло і є ізоляторами.

Якщо властивості кристалу залежать від напрямку в просторі, то він називається анізотропним. Так, графіт проводить електричний струм тільки вздовж своїх шарів. Речовина, властивості якої однакові у всіх напрямках, називається ізотропною.

Фізичні властивості твердих речовин в значній мірі залежать від типу хімічного зв'язку і структури. При цьому закономірності, які спостерігаються, відображені в табл. 8.6.

Таблиця 4.1

Характеристики твердих речовин

Характеристика	Металічні кристали (Cu, Mg)	Іонні кристали (NaCl, KNO <sub>3</sub> )	Ковалентні молекулярні кристали (I <sub>2</sub> , нафталін)	Ковалентні макромолекулярні кристали (алмаз, SiO <sub>2</sub> )
Структурні частинки	Позитивні іони і рухливі електрони	Катіони і аніони	Молекули	Атоми
Тип хімічного зв'язку	Металічний	Іонний	1) Ковалентний в молекулах; 2) вандерваальсові сили між молекулами	1) Ковалентний між атомами; 2) вандерваальсові сили (тільки в ланцюгових і шаруватих структурах)
Температура плавлення	Висока	Висока	Невисока	Дуже висока
Температура кипіння	Висока	Висока	Невисока	Дуже висока
Механічні властивості	Твердість, гнучкість, тягучість	Твердість, крихкість	М'якість	Дуже висока твердість
Електропровідність	Хороші провідники	Ізолятори в твердому вигляді, електроліти у вигляді розплавів і	Ізолятори	Ізолятори (крім графіту)

		розчинів		
Розчинність у воді	Нерозчинні	Розчинні	Нерозчинні	Нерозчинні
Розчинність в неполярних розчинниках	Нерозчинні	Нерозчинні	Розчинні	Нерозчинні

Між'ядерні відстані в твердих речовинах. Виходячи з щільності речовини, легко знайти між'ядерну відстань  $i$ , отже, радіуси пов'язаних атомів. Припустимо, що речовина володіє примітивною кристалічною упаковкою (рис. 8.5). Розглянемо спосіб оцінки між'ядерної відстані на прикладі металевого літію, для якого щільність становить  $0,56 \text{ г/см}^3$ .

Визначимо молярний об'єм металевого літію, розділивши молярну масу на щільність:

$$V(M) = M/\rho; V(\text{Li}) = 6,94/0,56 = 12,4 \text{ см}^3.$$

Знайдемо обсяг простору, який припадає на один атом літію:

$$12,4/(6,02 \cdot 10^{23}) = 2,06 \cdot 10^{-23} \text{ см}^3.$$

З рис. 4.2 видно, що між'ядерна відстань дорівнює кореню кубічному з знайденого обсягу. Отже, для подвоєного радіуса атома літію (між'ядерну відстань) маємо:

$$2r(\text{Li}) = \sqrt[3]{2,06 \cdot 10^{-23}} = 2,74 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 0,274 \text{ нм}.$$

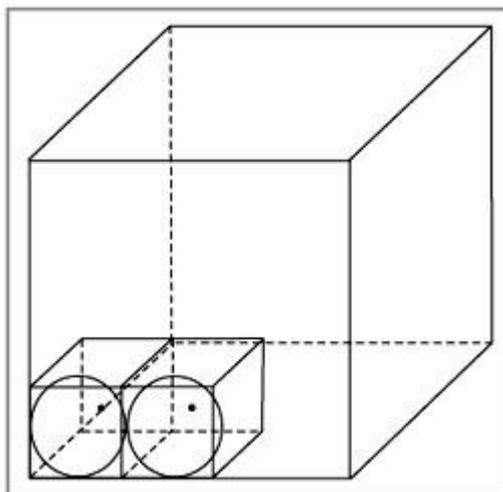
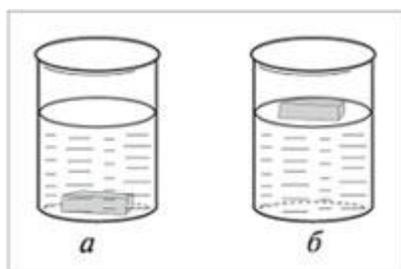


Рис. 4.2 Геометричний спосіб оцінки між'ядерної відстані в твердій речовині

Звідки  $r(\text{Li}) = 0,137 \text{ нм}$ . Наведене в довіднику значення радіуса атома літію становить  $0,155 \text{ нм}$ .

## 5. Вправи

1. Які умови (температура, тиск) називаються нормальними?
2. Що таке ідеальний газ і чим він відрізняється від реальних газів?
3. Який обсяг забере ідеальний газ при стандартних умовах (1 атм, 25 °С)?
4. Порівняйте середні швидкості руху молекул монооксиду та діоксиду вуглецю при 25 °С.
5. У скільки разів збільшиться середня швидкість руху молекул водню при нагріванні закритої посудини від 0 °С до 100 °С? Як при цьому зміниться тиск у посудині?
6. Як зміниться середня відстань між молекулами повітря, якщо тиск при кімнатній температурі збільшити в п'ять разів?
7. Що називають тиском пари рідини і як вона залежить від температури? Яким має бути тиск пари рідини, щоб вона закипіла?
8. Поясніть терміни «випаровування», «кипіння», «замерзання», «плинність», «в'язкість», «поверхневий натяг», «дифузія», які пов'язані з рідинами.
9. Поясніть терміни «поліморфізм», «ізоморфізм», «алотропія», які пов'язані з твердими речовинами.
10. Наведіть приклади поліморфізму і алотропії.
11. У якому з скляних стаканів знаходиться лід і вода, а в якому - рідкий і твердий бензол?



12. Поясніть на прикладах вплив типу хімічного зв'язку на фізичні характеристики твердої речовини.
13. Розрахуйте і порівняйте радіуси атомів натрію і калію, якщо щільності їх металів складають відповідно 0,97 і 0,86 г/см<sup>3</sup>