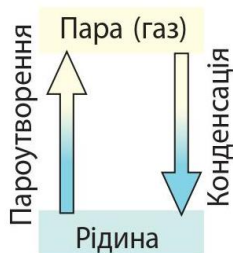


§ 31. ПАРОУТВОРЕННЯ І КОНДЕНСАЦІЯ. НАСИЧЕНА І НЕНАСИЧЕНА ПАРА. КИПІННЯ



Будь-яка речовина за певних умов може переходити з одного фазового (агрегатного) стану в інший. Вологий одяг може «замерзнути», а може висохнути, водяна пара може зібратися в крапельки води, утворюючи туман або росу, а може перетворитися на іншій. Згадаємо, за яких умов відбувається перехід речовини з рідкого стану в газоподібний і навпаки.

1

Якими є особливості випаровування рідини

Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають **пароутворенням**.

Є два способи переходу рідини в газ: *випаровування і кипіння*.

Випаровування — це процес пароутворення з поверхні рідини.

Із точки зору МКТ пароутворення — це такий процес, коли з поверхні рідини вилітають найшвидші молекули. Дійсно, молекули рідини безперервно рухаються (коливаються біля положень рівноваги, час від часу перестрибують із місця на місце), але сили притягання не дають їм розлетітися. Проте в рідині завжди є молекули, кінетична енергія яких у кілька разів перевищує її середнє значення. Коли ці «швидкі» молекули опиняються на поверхні рідини, їх енергії вистачає для того, щоб, подолавши притягання сусідніх молекул, залишити рідину.

Знаючи механізм випаровування, зазначимо деякі його особливості.

1. У рідині завжди є молекули, що рухаються швидко, тому *випаровування відбувається за будь-якої температури*. Чим вища температура рідини, тим більше в ній «швидких» молекул, тому *зі зростанням температури швидкість випаровування збільшується*. Оскільки рідину залишають молекули, кінетична енергія яких вища за середню, то середня кінетична енергія молекул, що залишаються, зменшується, тобто *за відсутності теплообміну процес випаровування спричиняє охолодження рідини*.

2. *Випаровування супроводжується поглинанням енергії*: енергія витрачається на виконання роботи проти сил міжмолекулярного притягання та сил зовнішнього тиску. Чим меншим є тиск на вільну поверхню рідини, тим швидше рідина випаровується.

3. *Швидкість випаровування зростає зі збільшенням площі вільної поверхні рідини* (на поверхні рідини буде більше молекул із достатньою кінетичною енергією).

4. *Різні рідини випаровуються з різною швидкістю* (спирт випаровується майже миттєво, вода — повільніше, а крапля ртуті буде випаровуватися роками, отруюючи повітря). Очевидно, що повільніше випаровуються ті рідини, молекули яких сильніше взаємодіють одна з одною.



Які особливості випаровування рідини ілюструє кожна ситуація на [рис. 31.1](#)? Наведіть власні приклади.

2

Яку пару називають насиченою

Швидкість випаровування залежить також від руху повітря: волосся швидше висохне, якщо його сушити феном; калюжі після дощу швидше зникають у вітряну погоду. Таку залежність легко пояснити з точки зору теплового руху молекул. Біля поверхні рідини завжди існує «хмара» молекул, які її залишили, тобто пара цієї рідини. Молекули пари безладно рухаються, зіштовхуючись одна з одною і з молекулами інших газів.

Завдяки дифузії та руху повітря деякі молекули пари віддаляються від поверхні рідини та вже ніколи в неї не повертаються. Інші молекули, навпаки, можуть опинитися так близько до поверхні рідини, що «захоплюються» силами міжмолекулярної взаємодії та повертаються в рідину (див. [рис. 31.2](#)). Якби молекули, що залишили рідину, не поверталися, то швидкість випаровування була б величезною. Наприклад, за кімнатної температури відро води випарувалося б менш ніж за годину.

Таким чином, поряд із процесом випаровування, у ході якого рідина переходить у пару, існує зворотний процес, у ході якого речовина з газоподібного стану переходить у рідкий.

Процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий називають **конденсацією**.

Випаровування супроводжується поглинанням енергії, а *під час конденсації, навпаки, енергія виділяється*.

Закриємо кришкою посудину з деяким об'ємом рідини ([рис. 31.2, б](#)). Поверхню рідини, як і раніше, залишатимуть «швидкі» молекули, маса рідини буде зменшуватись, а концентрація молекул пари — збільшуватись. Водночас частина молекул повертатиметься з пари в рідину. При цьому чим більша концентрація пари, тим інтенсивнішим буде процес конденсації. Дуже швидко концентрація молекул пари над рідиною стане настільки високою, що *число молекул, які повертаються в рідину, дорівнюватиме числу молекул, які за той самий час залишають рідину*, — між процесами конденсації і випаровування встановиться **динамічна рівновага**.

Пару, яка перебуває у стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною, називають **насиченою парою**.

Зверніть увагу! Концентрація молекул насиченої пари — найбільша можлива концентрація молекул пари за даної температури; пару, концентрація молекул якої менша, ніж у насиченій, називають ненасиченою парою.



Рис. 31.1. До завдання в § 31

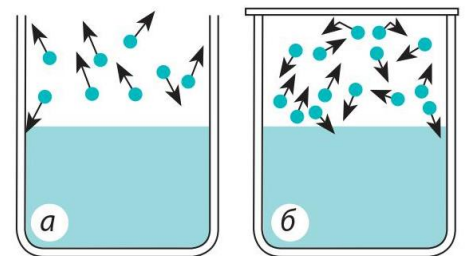


Рис. 31.2. Молекули, що залишили рідину, можуть знову повернутись у неї внаслідок теплового руху: *а* — пара над поверхнею рідини ненасичена; *б* — пара над поверхнею рідини насичена

Таблиця 1
Тиск насиченої пари за 20 °С

Речовина	Тиск, мм рт. ст.
Ртуть	0,0013
Вода	17,36
Хлороформ	160,5
Ефір	442,4
Хлор	5798 (7,63 атм)
Амоніак	6384 (8,4 атм)

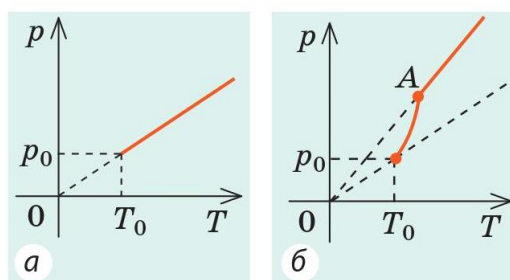


Рис. 31.3. Залежність тиску від температури: а — для ідеального газу; б — для насиченої пари (точка А відповідає повному випаровуванню рідини)

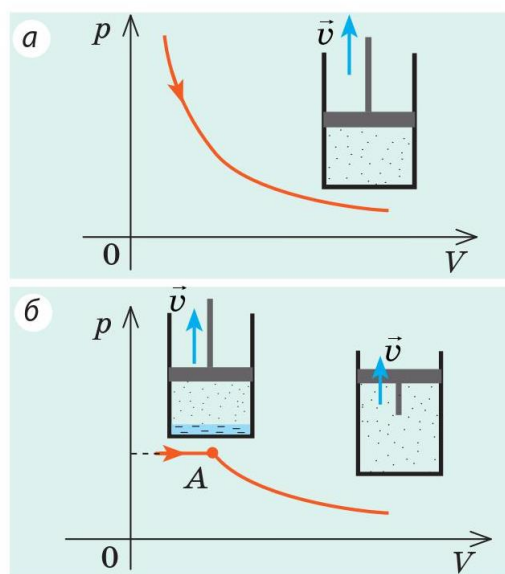


Рис. 31.4. Залежність тиску від об'єму: а — для ідеального газу; б — для насиченої пари. Точка А відповідає повному випаровуванню рідини; пара стає ненасиченою, і її тиск зменшується обернено пропорційно об'єму

3 Від яких чинників залежить тиск насиченої пари

Для насиченої пари, як і для будь-якого газу, справджується рівність $p = nkT$.

Тобто за даної температури T тиск p насиченої пари прямо пропорційний концентрації n її молекул. Оскільки концентрація молекул насиченої пари залежить від роду рідини, то й тиск насиченої пари залежить від роду рідини (табл. 1). Чим більшими є сили міжмолекулярної взаємодії, тим менша концентрація молекул насиченої пари, отже, тим менший її тиск.

Крім того, тиск насиченої пари залежить від температури. Зі збільшенням температури тиск насиченої пари зростає набагато швидше, ніж тиск ідеального газу (рис. 31.3). Річ у тім, що одочасно зі зростанням температури збільшується концентрація молекул пари. Одночасне збільшення концентрації молекул і температури спричиняє швидке зростання тиску (рис. 31.3, б).

Зверніть увагу! Якщо збільшення температури спричинить повне випаровування рідини, то надалі пара стане ненасиченою і її тиск лінійно залежатиме від температури.

Тиск, створюваний насиченою парою, є найбільшим тиском, який може створити пара даної рідини за даної температури. Якщо зменшити об'єм, який займає насичена пара, то на короткий проміжок часу концентрація молекул пари збільшиться, динамічна рівновага порушиться і число молекул, що надходять у рідину, перевищить число молекул, які залишають її поверхню. Конденсація переважатиме над випаровуванням доти, доки концентрація молекул пари не зменшиться до концентрації молекул насиченої пари, а тиск не стане дорівнювати тиску насиченої пари. Зі збільшенням об'єму, який займає насичена пара, навпаки, переважатиме процес випаровування, і в результаті знову встановиться початковий тиск. Таким чином, на відміну від ідеального газу, тиск насиченої пари не залежить від її об'єму (рис. 31.4).

4 Як і чому кипить рідина

Якщо до посудини з рідиною підвести достатню кількість теплоти, температура рідини буде збільшуватись, а дно та стінки посудини вкриються бульбашками*. Ці бульбашки містять повітря та насичену пару, тиск яких зростатиме зі зростанням температури. Щойно тиск газу всередині бульбашок перевищить зовнішній тиск, бульбашки почнуть збільшуватись в об'ємі (рис. 31.5, а). Нарешті під дією архімедової виштовхувальної сили вони відірвуться від дна посудини та почнуть спливати; на місці бульбашок, що відірвалися, залишиться невелика кількість газу — «зародки» нових бульбашок (рис. 31.5, б).

Поки верхні шари рідини трохи холодніші за нижні, у верхніх шарах частина водяної пари в бульбашках конденсується й бульбашки «схлопуються». Цей процес супроводжується шумом і утворенням численних дрібних бульбашок газу — рідина «кипить білим ключем».

Коли рідина повністю прогріється, бульбашки, піднімаючись, збільшуються в об'ємі, адже всередину них безперервно випаровується рідина (рис. 31.5, в). Досягнувши поверхні рідини, бульбашки лопаються, викидаючи пару в атмосферу; рідина при цьому вирує та клекоче — *кипить* (рис. 31.5, г).

Кипіння — процес пароутворення, який відбувається по всьому об'єму рідини та супроводжується утворенням і збільшенням бульбашок пари.

5 Від яких чинників залежить температура кипіння рідини

Продовжуючи нагрівати рідину, яка вже закипіла, можна помітити, що *під час кипіння температура рідини не змінюється* (рис. 31.6). Якщо збільшити кількість теплоти, яка підводиться до рідини, то збільшиться кількість

* Насправді мікробульбашки газу наявні в рідині завжди, але помітні тільки за досить високої температури. Річ у тім, що на початку нагрівання рідина насичена газом, розчинність якого зменшується зі збільшенням температури, і «зайвий» газ виділяється всередину бульбашок.

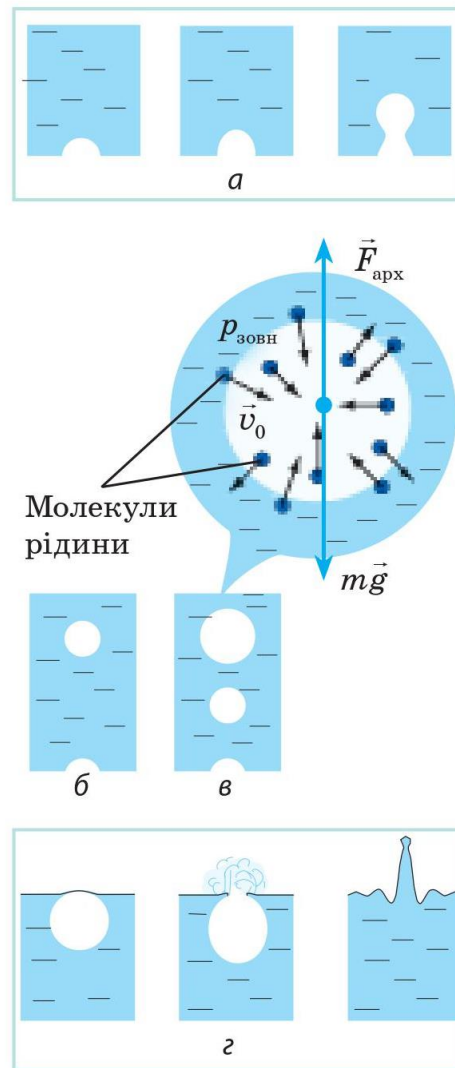


Рис. 31.5. Механізм кипіння рідини

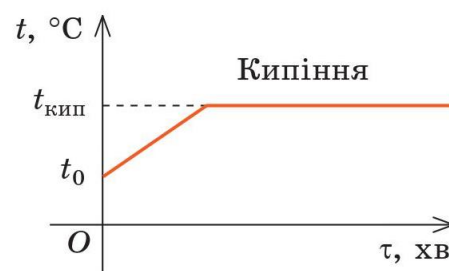


Рис. 31.6. Графік залежності температури рідини від часу

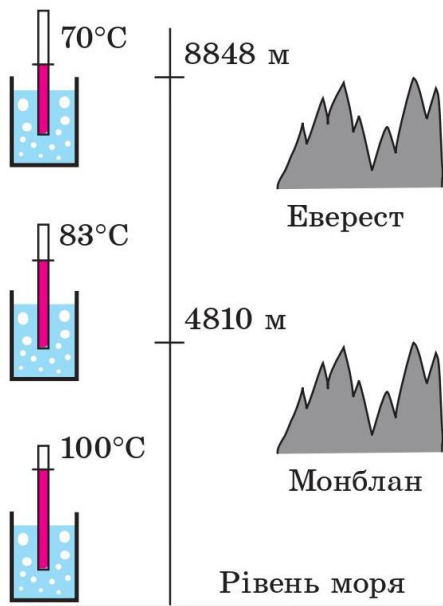


Рис. 31.7. Температура кипіння води на різних висотах (і відповідно — в умовах різного тиску)



Рис. 31.8. Нагрівання води до високих температур здійснюється в автоклавах. За тиску понад 100 атмосфер температура кипіння води збільшується до 300 °С

Таблиця 2

Температура кипіння деяких речовин за нормального атмосферного тиску

Речовина	$t_{\text{кип}}, \text{ }^\circ\text{C}$
Водень	-253
Ефір	35
Спирт	78
Вода	100
Гліцерин	290
Ртуть	357
Свинець	1740

бульбашок, тобто зросте інтенсивність пароутворення. Таким чином, під час кипіння вся енергія, що підводиться, йде на пароутворення.

Рідина починає кипіти (бульбашки починають збільшуватися в об'ємі) тільки тоді, коли тиск газу в бульбашках (p_r) стає трохи більшим за тиск у рідині (p_p). У бульбашках містяться повітря та насичена пара, однак повітря в них набагато менше, ніж пари, тому тиск газу в бульбашках приблизно дорівнює тиску насиченої пари ($p_{\text{н.п}}$): $p_r \approx p_{\text{н.п}}$. Тиск у рідині складається із зовнішнього тиску (тиску на поверхню рідини) ($p_{\text{зовн}}$) і гідростатичного тиску стовпа рідини (ρgh): $p_p = p_{\text{зовн}} + \rho gh$. Якщо глибина посудини менша, ніж метр, то гідростатичним тиском рідини можна знехтувати, тому $p_p \approx p_{\text{зовн}}$.

Кипіння починається за температури, за якої тиск насиченої пари трохи перевищує зовнішній тиск.

Чим меншим є зовнішній тиск, тим за нижчої температури кипить дана рідина (рис. 31.7). Якщо налити в колбу воду та помпою відкачувати з колби повітря, то вода закипить навіть за кімнатної температури. І навпаки, якщо необхідно підвищити температуру кипіння рідини, її нагрівають в умовах підвищеного тиску (рис. 31.8).

Оскільки тиск насиченої пари залежить від роду рідини, то за того самого зовнішнього тиску кожна речовина має свою температуру кипіння (табл. 2). Чим меншими є сили міжмолекулярного притягання в рідині, тим нижча температура її кипіння.

Температура кипіння рідини залежить від наявності в ній розчиненого газу. Якщо довго кип'ятити воду і в такий спосіб видалити з неї розчинений газ, то повторно за нормального тиску цю воду можна буде нагріти до температури понад 100 °С. Таку воду називають *перегрітою*.



Підбиваємо підсумки

• Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають пароутворенням. Пароутворення може відбуватися двома шляхами: випаровуванням і кипінням.

♦ Випаровування — процес пароутворення з поверхні рідини. Поряд із процесом випаровування існує процес конденсації — процес переходу речовини з газоподібного стану в рідкий.

♦ Кипіння — процес пароутворення, який відбувається по всьому об'єму рідини та супроводжується утворенням і збільшенням бульбашок пари. Кипіння починається за температури, за якої тиск насиченої пари в бульбашках дещо перевищує зовнішній тиск.

• Якщо за той самий час число молекул, що вилетіли з поверхні рідини, дорівнює числу молекул, які повернулися в рідину, то рідина та її пара перебувають у стані динамічної рівноваги. Пару, яка перебуває в стані динамічної рівноваги зі своєю рідиною, називають насиченою.



Контрольні запитання

1. Що таке пароутворення? Які способи пароутворення ви знаєте? 2. Що називають випаровуванням? Якими є особливості випаровування? 3. Від яких чинників залежить швидкість випаровування? Чому? Наведіть приклади. 4. Що таке конденсація? 5. У чому полягає стан динамічної рівноваги? 6. Яку пару називають насиченою? 7. Від яких чинників і чому залежить тиск насиченої пари? 8. Дайте означення кипіння й опишіть цей процес. 9. Від яких чинників і чому залежить температура кипіння рідини? 10. Чому під час кипіння температура рідини не змінюється?



Вправа № 31

1. Чому вода у відкритій посудині трохи холодніша, ніж довколишнє повітря? 2. Наведіть приклади випаровування і конденсації води в природі. Поясніть ці явища. Поясніть кругообіг води у природі. 3. Тривалість варіння м'яса від моменту закипання не залежить від потужності нагрівника. Чому? Чому в скороварці м'ясо готується значно швидше? 4. Чому утворення туману затримує зниження температури повітря? 5. Чи можна кипінням змусити воду замерзнути? Якщо можна, то як? 6. Чи кипітиме вода в каструлі, яка плаває в каструлі з киплячою водою? 7. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, якими явищами буде супроводжуватися нагрівання води в космічній станції в умовах невагомості.



Експериментальні завдання

1. У шприц без голки наберіть воду приблизно до половини, щільно закрийте отвір і різко потягніть за поршень. Поясніть явища, які спостерігаються. 2. Питому теплоту пароутворення рідини (L) можна виміряти досить точно, знаючи питому теплоємність (c) рідини та маючи лише кімнатний термометр і годинник.

Наповніть невелику каструлю водою кімнатної температури, закрийте прозорою кришкою та поставте на газову плиту (або електроплиту). Виміряйте час (τ_1) нагрівання води від кімнатної температури (t_0) до кипіння (t). Після того як вода закипить, відкрийте кришку і, не змінюючи потужності (P) нагрівника, виміряйте час (τ_2) від початку кипіння до повного випаровування води.

Визначте питому теплоту пароутворення води за формулою: $L = c(t - t_0) \frac{\tau_2}{\tau_1}$.



Спробуйте отримати подану вище формулу самостійно. Зверніть увагу на те, що потужність нагрівника є незмінною.