

## § 47. КИПІННЯ. ПИТОМА ТЕПЛОТА ПАРООУТВОРЕННЯ

**?!**  До якої температури можна нагріти воду? Чи має сенс збільшувати потужність пальника, щоб прискорити готування борщу? Як закип'ятити воду за допомогою снігу? На деякі з цих питань ви знайдете відповіді в наступному параграфі, на деякі зможете відповісти самі після його вивчення.

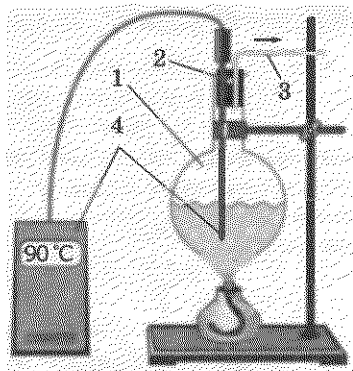
**1** Знайомимося з процесом кипіння

Проведемо експеримент. Закріпимо колбу з водою в лапці штатива і щільно закоркуємо, лишивши в корку два отвори. В один з отворів вставимо трубку для виходу пари, у другий помістимо термометр (рис. 47.1). Нагріватимемо воду в колбі за допомогою спиртівки.

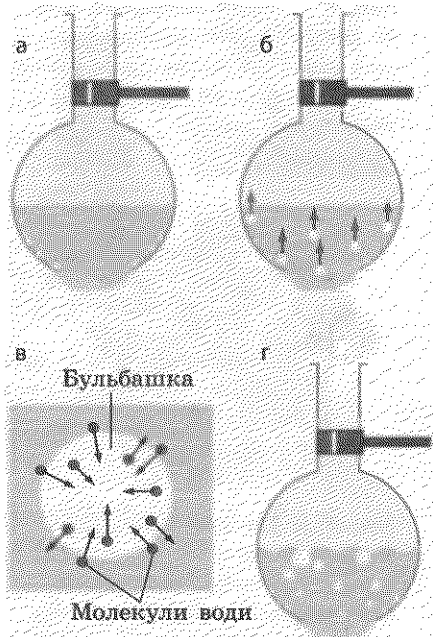
Через якийсь час дно та стінки колби вкриються *бульбашками* (рис. 47.2, а). Ці бульбашки утворені розчиненим у воді повітрям. Річ у тім, що в рідині завжди є розчинені гази, однак зі збільшенням температури розчинність газів зменшується, а «зайвий» газ виділяється у вигляді бульбашок. Оскільки бульбашки перебувають у воді, то в них, окрім повітря, є ще й водяна пара.

Після досягнення бульбашкою певного розміру *архімедова сила, що діє на бульбашку, відриває її від стінки чи дна посудини й бульбашка піднімається* (рис. 47.2, б). На місці бульбашки залишається невелика кількість повітря — *зародок* нової бульбашки. Верхні шари води певний час холодніші за нижні, тому у верхніх шарах водяна пара в бульбашці конденсується, повітря, яке було в бульбашці, розчиняється і вона різко зменшується в об'ємі — *захлопується*. Цей процес супроводжується шумом.

Коли вся рідина достатньо прогріється, а температура верхніх і нижніх шарів зрівняється, бульбашки, піднімаючись, уже не зменшуватимуться в об'ємі, а навпаки, будуть збільшуватися. *Протягом цього часу всередину бульбашок активно випаровується вода* (рис. 47.2, в). Досягнувши поверхні води, бульбашки лопаються і викидають назовні



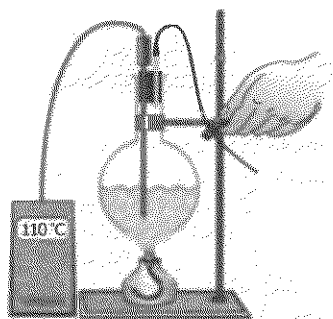
**Рис. 47.1.** Пристрій для спостереження та вивчення процесу кипіння рідини: 1 — скляна колба; 2 — гумовий корок з отворами; 3 — трубка для відведення водяної пари; 4 — термометри



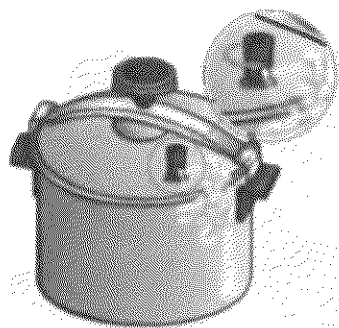
**Рис. 47.2.** Спостереження процесу закипання води



**Рис. 47.3.** У процесі кипіння температура рідини є незмінною. Тому під час готування їжі, після того як вода закипить, слід зменшувати потужність нагрівника. Це дасть економію енергії і не змінить часу готування



**Рис. 47.4.** У разі затискання трубки для відведення водяної пари тиск усередині колби збільшується, і це приводить до підвищення температури рідини



**Рис. 47.5.** Каструля-скороварка: завдяки клапанам та герметичній кришці в просторі над рідиною підтримується високий тиск, тому температура кипіння води в такій каструлі сягає  $200^{\circ}\text{C}$

значну кількість водяної пари (рис. 47.2, г). Вода починає виривати й клекотіти — ми кажемо, що вона закипіла. Термометр у цей момент показує температуру  $100^{\circ}\text{C}$ .

**Кипіння** — це процес пароутворення, що відбувається в усьому об'ємі рідини й супроводжується утворенням і зростанням бульбашок пари.

## 2 З'ясуємо, від чого залежить температура кипіння

Продовжимо нагрівати тепер уже киплячу воду і спостерігати за показаннями термометра. Ми побачимо, що стовпчик термометра застиг на позначці  $100^{\circ}\text{C}$ . Отже, *під час кипіння температура рідини не змінюється* (рис. 47.3).

Температура, за якої рідина кипить, називають **температурою кипіння**.

З'ясуємо, від чого залежить температура кипіння рідини.

Для початку зменшимо вихід пари з колби, досить міцно затиснувши трубку, що відводить пару (рис. 47.4). Пара збиратиметься над поверхнею води, тиск над рідиною збільшиться, кипіння на якийсь час припиниться, а температура рідини почне підвищуватися.

Таким чином, температура кипіння залежить від зовнішнього тиску. *Зі збільшенням зовнішнього тиску температура кипіння рідини зростає* (рис. 47.5).

Наллємо в колбу воду кімнатної температури. За допомогою насоса відкачуємо повітря з колби. Через якийсь час на внутрішній поверхні колби з'являться бульбашки газу. Якщо відкачувати повітря й далі, вода закипить (рис. 47.6), але вже за температури, набагато нижчої від  $100^{\circ}\text{C}$ . Отже, *якщо зовнішній тиск зменшується, температура кипіння рідини знижується*.

Спостерігаючи кипіння інших рідин, наприклад спирту, олії, ефіру, можна помі-

тити, що за умови нормального тиску вони киплять за різних температур, які відрізняються від температури кипіння води. Тобто *температура кипіння залежить від роду рідини* (див. таблицю).

*Температура кипіння деяких речовин  
(за нормального атмосферного тиску)*

Речовина	Температура кипіння, °C	Речовина	Температура кипіння, °C
Водень	-253	Гліцерин	290
Кисень	-183	Олія	310
Ефір	35	Ртуть	357
Спирт	78	Свинець	1740
Молоко	100	Мідь	2567
Вода	100	Залізо	2750

Температура кипіння також сильно залежить від наявності в рідині розчиненого газу. Якщо довго кип'ятити воду, видаливши тим самим із неї розчинений газ, то повторно за нормального тиску цю воду можна буде нагріти до температури, що перевищує 100 °C. Таку воду називають *перегрітою*.

### 3 Вводимо поняття питомої теплоти пароутворення

Процес кипіння — це процес переходу рідини в пару, і цей процес іде з поглинанням енергії. Тому для підтримання кипіння рідини до неї потрібно підводити певну кількість теплоти. Ця енергія йде на розривання міжмолекулярних зв'язків і утворення пари.

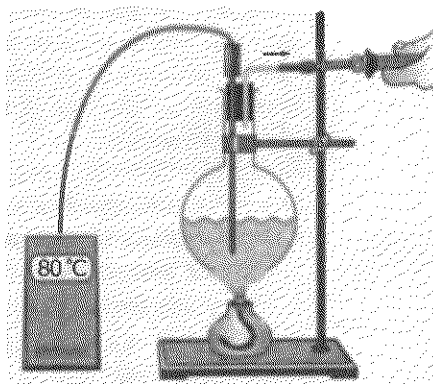
Досліди показують: *кількість теплоти, яка необхідна для перетворення рідини на пару за незмінної температури, пропорційна масі рідини й залежить від роду рідини*.

**Питома теплота пароутворення** — це фізична величина, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати рідині масою 1 кг, щоб за незмінної температури перетворити її на пару.

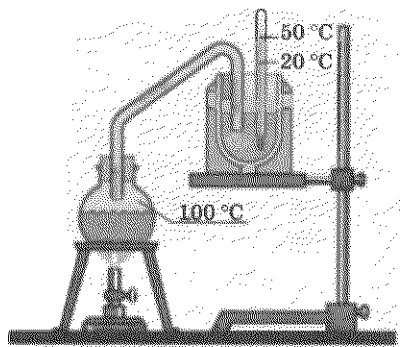
Питому теплоту пароутворення позначають символом  $L$  і обчислюють за формулою

$$L = \frac{Q}{m},$$

де  $Q$  — кількість теплоти, яка отримана рідиною;  $m$  — маса одержаної пари.



**Рис. 47.6.** Спостереження зниження температури кипіння води за умови зменшення зовнішнього тиску



**Рис. 47.7.** Дослід щодо визначення питомої теплоти пароутворення води (див. також задачу 2 на с. 238)

Питома теплота пароутворення показує, на скільки за даної температури внутрішня енергія 1 кг речовини в газоподібному стані більша, ніж внутрішня енергія 1 кг цієї самої речовини в рідкому стані.

З формули для визначення питомої теплоти пароутворення дістанемо одиницю цієї величини в СІ — **джоуль на кілограм**  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right)$ .

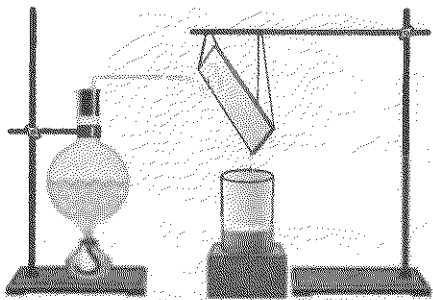
Питому теплоту пароутворення визначають дослідним шляхом (рис. 47.7) і заносять до таблиць.

*Питома теплота пароутворення деяких речовин (за температури кипіння й нормального атмосферного тиску)*

Речовина	$L, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$	Речовина	$L, \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$
Вода	2,3	Ефір	0,4
Аміак	1,4	Ртуть	0,3
Спирт	0,9	Повітря	0,2

**4** Обчислюємо кількість теплоти, яка витрачається на перетворення рідини на пару або виділяється в ході конденсації пари. З формули для визначення питомої теплоти пароутворення речовини легко дістати формулу для обчислення кількості теплоти ( $Q$ ), яку необхідно передати рідині (масою  $m$ ) для того, щоб перетворити її на пару за незмінної температури. Справді, за визначенням  $L = \frac{Q}{m}$ , звідси

$$Q = Lm$$



**Рис. 47.8.** Дослід, що демонструє конденсацію пари

Щоб обчислити кількість теплоти, необхідну для перетворення рідини на пару за незмінної температури, потрібно питому теплоту пароутворення цієї рідини помножити на її масу.

Якщо перед трубкою для відведення пари помістити якийсь холодний предмет, то пара конденсуватиметься на ньому (рис. 47.8). Дуже ретельні вимірювання показують, що в ході конденсації пари виділяється точно така сама кількість теплоти, яка йде на її утворення.

## 5 Учимся розв'язувати задачі

**Задача 1.** Яку кількість енергії потрібно витратити, щоб 3 кг води, узятої за температури  $0^\circ\text{C}$ , довести до кипіння й повністю випарувати? Побудуйте графік процесу (не дотримуючись масштабу).

Дано:

$$m = 3 \text{ кг}$$

$$t_1 = 0^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 100^\circ\text{C}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$L = 2,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} =$$

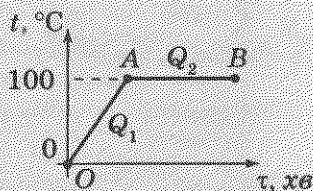
$$= 2,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$Q = ?$

*Аналіз фізичної проблеми*

Побудуємо графік залежності температури речовини від часу нагрівання.

У перший момент часу температура води ( $t_1$ ) становила  $0^\circ\text{C}$  — точка  $O$  на графіку. У ході подальшого нагрівання температура води збільшуватиметься пропорційно кількості переданої теплоти  $Q_1$ , а отже, і часу нагрівання (ділянка  $OA$ ).



Нагрівшись до  $100^\circ\text{C}$  (температура кипіння води), вода починає кипіти і її температура не змінюватиметься доти, доки вся вода не випарується (ділянка  $AB$  графіка). Вода при цьому одержує певну кількість теплоти  $Q_2$ . Загальна кількість теплоти  $Q$  дорівнюватиме сумі кількості теплоти  $Q_1$ , необхідної для нагрівання води до температури кипіння, і кількості теплоти  $Q_2$ , необхідної для пароутворення. Питому теплоємність  $c$  води і питому теплоту пароутворення  $L$  знайдемо в таблицях (див. відповідно с. 194, с. 236).

*Пошук математичної моделі, розв'язання*

$$Q_1 = cm(t_2 - t_1) \text{ — нагрівання води;} \quad (1)$$

$$Q_2 = Lm \text{ — пароутворення;} \quad (2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (3)$$

Підставивши формули (1) і (2) у формулу (3), остаточно отримаємо:

$$Q = cm(t_2 - t_1) + Lm.$$

Перевіримо одиницю шуканої величини:

$$[Q] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot \text{кг} \cdot ^\circ\text{C} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} = \text{Дж} + \text{Дж} = \text{Дж}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$\{Q\} = 4200 \cdot 3 \cdot (100 - 0) + 2,3 \cdot 10^6 \cdot 3 = 803\,400;$$

$$Q = 803\,400 \text{ Дж} = 803,4 \text{ кДж}.$$

**Відповідь:** потрібно витратити 803,4 кДж теплоти.

**Задача 2.** Під час досліду щодо визначення питомої теплоти пароутворення води водяна пара, що має температуру  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , надходить до калориметра, у якому міститься  $500\text{ г}$  води за температури  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (див. рис. 47.7). Після закінчення досліду температура води в калориметрі становила  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а її маса збільшилася на  $25\text{ г}$ . За даними досліду обчисліть питому теплоту пароутворення води. Вважайте, що під час досліду теплообмін з довкіллям не відбувався.

Дано:

$$t_1 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$m_{\text{води}} = 500\text{ г} = 0,5\text{ кг}$$

$$t_2 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$m_{\text{пари}} = 25\text{ г} = 0,025\text{ кг}$$

$$c_{\text{води}} = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$L = ?$

*Аналіз фізичної проблеми*

Під час досліду відбувається теплообмін між водою в калориметрі та паром. Віддає енергію водяна пара ( $Q_{\text{пари}}$ ), яка спочатку конденсується ( $Q_1$ ), а потім охолоджується ( $Q_2$ ). Отримує тепло вода ( $Q_{\text{води}}$ ). За умовою теплообмін з довкіллям не відбувається, тому  $Q_{\text{пари}} = Q_{\text{води}}$ . (1)

*Пошук математичної моделі, розв'язання та аналіз результатів*

Загальна кількість теплоти, яку віддає пара:  $Q_{\text{пари}} = Q_1 + Q_2$ , де  $Q_1 = Lm_{\text{пари}}$ ;  $Q_2 = c_{\text{води}}m_{\text{пари}}(t_1 - t)$ . Отже,  $Q_{\text{пари}} = Lm_{\text{пари}} + c_{\text{води}}m_{\text{пари}}(t_1 - t)$ . (2)

Кількість теплоти, яку отримує вода:

$$Q_{\text{води}} = c_{\text{води}}m_{\text{води}}(t - t_2). \quad (3)$$

Підставивши рівняння (2) і (3) у рівняння (1), отримаємо:

$$Lm_{\text{пари}} + c_{\text{води}}m_{\text{пари}}(t_1 - t) = c_{\text{води}}m_{\text{води}}(t - t_2) \Rightarrow \\ \Rightarrow Lm_{\text{пари}} = c_{\text{води}}m_{\text{води}}(t - t_2) - c_{\text{води}}m_{\text{пари}}(t_1 - t).$$

$$\text{Остаточно } L = \frac{c_{\text{води}}m_{\text{води}}(t - t_2) - c_{\text{води}}m_{\text{пари}}(t_1 - t)}{m_{\text{пари}}}.$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[L] = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}} \cdot \text{кг} \cdot (^{\circ}\text{C} - ^{\circ}\text{C})}{\text{кг}} = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot ^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

$$\{L\} = \frac{4200 \cdot 0,5 \cdot 30 - 4200 \cdot 0,025 \cdot 50}{0,025} = 2310\,000;$$

$$L = 2,31 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Отриманий результат ( $L = 2,31\text{ МДж/кг}$ ) збігається з табличним значенням, отже, задачу розв'язано правильно.

*Відповідь:* питома теплота пароутворення води становить  $2,31\text{ МДж/кг}$ .

## ! Підбиваємо підсумки

Процес пароутворення, що відбувається в усьому об'ємі рідини й супроводжується утворенням і зростанням бульбашок пари, називають кипінням.



Температура кипіння рідини залежить від зовнішнього тиску, роду рідини й наявності розчинених у рідині газів.

Питома теплота пароутворення — це фізична величина, що характеризує певну речовину й дорівнює кількості теплоти, яку необхідно передати рідині масою 1 кг, щоб за незмінної температури перетворити її на пару.

Питому теплоту обчислюють за формулою  $L = \frac{Q}{m}$  і вимірюють у джоулях на кілограм  $\left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right)$ .

Кількість теплоти, що необхідна для перетворення рідини на пару за незмінної температури, дорівнює кількості теплоти, яку виділяє пара, конденсуючись за незмінної температури. Цю кількість теплоти обчислюють за формулою  $Q = Lm$ .

### Контрольні запитання

1. Що таке кипіння?
2. Які явища спостерігаються в рідині перед тим, як вона починає кипіти?
3. Яка сила змушує бульбашку газу підніматися на поверхню рідини?
4. Чи змінюється температура рідини під час кипіння?
5. Від яких чинників залежить температура кипіння рідини?
6. На що витрачається енергія, яку одержує рідина під час кипіння?
7. Що називають питомою теплотою пароутворення?
8. За якою формулою можна обчислити кількість теплоти, що виділяється в ході пароутворення та конденсації рідини?

### Вправа № 47

1. Питома теплота пароутворення води становить 2,3 МДж/кг. Що це означає?
2. Чим можна пояснити, що тривалість варіння овочів починаючи з моменту закипання води не залежить від інтенсивності нагрівання?
3. Відомо, що температура кипіння води на вершині гори Еверест становить близько 70 °С. Як ви думаєте, чому?
4. Чому опік паром є небезпечнішим, ніж опік окропом?
5. Яку кількість теплоти необхідно передати воді масою 10 кг, узятій за температури кипіння, щоб перетворити її на пару? Скільки дров потрібно спалити для цього? Вважайте, що вся енергія, яка виділяється в ході згорання дров, іде на випаровування води.
6. На скільки збільшиться внутрішня енергія 10 кг льоду, узятото за температури 0 °С, у результаті перетворення його на пару з температурою 100 °С?
7. У каструлі з водою, що кипить, розміщено відкриту колбу з водою. Чи кипить вода в колбі?

### Експериментальні завдання

1. Обережно налийте в прозору скляну пляшку невелику кількість гарячої води. Покачайте воду в пляшці, збільшуючи таким чином площу вільної поверхні води, а отже, швидкість випаровування. Новоутворена пара витисне із пляшки частину повітря. Щільно закоркуйте пляшку, переверніть і охолодіть її дно за допомогою холодної води або снігу. Вода в пляшці закипить. Поясніть це явище.
2. Візьміть одноразовий шприц без голки, приблизно наполовину заповніть його теплою водою. Щільно затуліть отвір пальцем. Повільно витягуйте поршень та спостерігайте за кипінням води (див. рисунок). Поясніть явище, що спостерігається.

