



Навчальний посібник  
для студентів вищих  
навчальних закладів

Дідур В. А.  
Стручаєв М. І.

# ТЕПЛОТЕХНІКА, ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ

За редакцією академіка АН ВШУ,  
доктора технічних наук,  
професора В.А. Дідура

*Рекомендовано Міністерством аграрної політики України  
як навчальний посібник для студентів  
вищих навчальних закладів*

2007

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ.....	7
1.1 Загальні положення.....	7
1.1.1 Предмет та метод технічної термодинаміки.....	7
1.1.2 Основні поняття термодинаміки.....	8
1.1.3 Термодинамічні параметри стану.....	12
1.1.4 Рівняння стану ідеального газу.....	14
1.1.5 Газові суміші.....	17
1.2 Термодинамічні процеси.....	20
1.2.1 Теплоємність ідеальних газів і газових сумішей.....	20
1.2.2 Калоричні параметри стану та енергетичні характеристики термодинамічних процесів.....	26
1.2.3 Перший Закон термодинаміки.....	29
1.2.4 Термодинамічні процеси ідеальних газів.....	32
1.2.5 Другий Закон термодинаміки.....	41
1.2.6 Математичне формулювання Другого Закону термодинаміки.....	43
1.2.7 Кругові процеси або цикли.....	45
1.2.8 Термодинамічні властивості і процеси реальних газів.....	52
1.2.9 Вологе повітря.....	68
1.2.10 Термодинамічні основи аналізу течії газів і пари в соплах і дифузорах.....	71
1.2.11 Дроселювання газів.....	76
1.3 Термодинамічні основи аналізу циклів теплових двигунів.....	77
1.3.1 Процеси стискування в ідеальному компресорі. Теоретичний цикл поршневого компресорів.....	83

4 ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ В СІЛЬСЬКОМУ	
ГОСПОДАРСТВІ.....	202
4.1 Теплофізика в сільськогосподарських виробничих	
приміщеннях.....	202
4.1.1 Тепловий режим виробничих приміщень.....	202
4.1.2 Повітряний та вологісний режим.....	202
4.1.3 Теплопередача через огорожуючі конструкції...	203
4.2 Опалення, вентиляція, кондиціонування та гаряче	
водопостачання комунально-побутових та	
виробничих будівель.....	207
4.2.1 Системи теплопостачання у сільському	
господарстві	207
4.2.2 Системи опалення	215
4.2.3 Системи теплопостачання сільського	
господарства.....	226
4.2.4 Системи вентиляції .....	229
4.2.5 Системи кондиціонування повітря.....	233
4.3 Сушіння продуктів сільськогосподарського	
виробництва.....	235
4.4 Використання холоду в сільському господарстві.....	237
4.5 Забруднення навколишнього середовища та	
боротьба з ним.....	240
4.6 Економія енергоресурсів та використання	
поновлювальних джерел енергії.....	242
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	246
ЗМІСТ	249

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

## 1.1 Загальні положення

### 1.1.1 Предмет та метод технічної термодинаміки

*Термодинаміка* — наука про закономірності перетворення енергії в тому числі про перетворення теплової енергії в механічну чи навпаки в реальному часі.

Основи термодинаміки були закладені в ХІХ ст., коли в зв'язку з розвитком теплових двигунів виникла необхідність вивчення закономірностей перетворення теплоти у роботу. Метод термодинаміки універсальний для замкнутих макроскопічних систем. Його широко застосовують у різних областях науки і техніки, причому навіть у дуже далеких від неї, наприклад у медицині, соціології і навіть в економіці.

Великий внесок у її розвиток зробили найвидатніші учені світової науки: Максвелл, Дальтон, Авогадро, Ленц, Ломоносов, Бойль, Гельмгольц, Майер, Маріотт, Карно, Планк, Ейнштейн, Фур'є.

Термодинаміка дозволяє установити, у якому напрямку можуть протікати різні фізичні і хімічні процеси в тих або інших системах. Як ми побачимо далі, термодинаміка розкриває глибокі зв'язки між різними властивостями речовини; у принципі це дозволяє, маючи дані по теплоємності речовини, за допомогою термодинамічних методів обчислювати щільність цієї речовини і навпаки.

На відміну від багатьох галузей фізики і хімії термодинаміка не оперує якими-небудь моделями структури речовини і взагалі безпосередньо не пов'язана з уявленням про мікроструктуру речовини.

У цьому і сила, і слабкість термодинаміки. Сама по собі термодинаміка не може дати яких-небудь відомостей про властивості речовини. Але якщо відомі деякі дані про властивості речовини або системи, то термодинамічні методи дозволяють одержати цікаві і важливі висновки.

Принцип побудови термодинаміки простий. В основу термодинаміки покладено два основних закони отриманих

експериментальним шляхом. Перший закон термодинаміки характеризує кількісну сторону процесів перетворення енергії, а другий закон установлює якісну сторону (спрямованість) процесів, що відбуваються у фізичних системах. Використовуючи тільки ці два закони, методом строгої дедукції можливо одержати всі основні висновки термодинаміки.

### 1.1.5 Газові суміші

У природі і техніці часто доводиться мати справу з неоднорідними газами (сумішами), які не вступають в хімічну взаємодію. Наприклад, повітря, продукти згоряння палива (димові гази), природні і штучні пальні гази і т. ін, які в багатьох випадках можна розглядати як ідеальні гази і розрахунок процесів зміни стану для таких сумішей можна виконувати за формулами для ідеальних газів. При цьому параметри суміші, які необхідно підставляти в розрахункові формули, визначаються в залежності від складу суміші.

Склад газової суміші може бути заданий трьома способами: масовими частками  $g$ , об'ємними частками  $r$ , і складом суміші заданої кількості кіломолей  $\nu_\mu$  усіх компонентів в частках одиниці (або в %).

Масовий склад газової суміші задається масовими частками, якими називаються відношення його маси до маси суміші, та позначаються:

$$g_1 = \frac{M_1}{\sum_1^n M_K} ; g_2 = \frac{M_2}{\sum_1^n M_K} \dots g_K = \frac{M_K}{\sum_1^n M_K}, \quad (1.24)$$

де  $M_1, M_2, \dots, M_K$  – маси окремих газів, кг;

$\sum_{i=1}^n M_K$  - маса суміші, кг.

Сума мас усіх компонентів дорівнює масі суміші:

$$\sum_{i=1}^n M_K = M_1 + \dots + M_K + \dots + M_n. \quad (1.25)$$

Сума масових часток компонентів дорівнює одиниці, або сто процентів:

$$\sum_{i=1}^n g_k = 1 ; \quad \text{або} \quad \sum_{i=1}^n g_k = 100\%. \quad (1.26)$$

Об'ємний склад газової суміші задається об'ємними частками, якими називаються відношення парціального об'єму компонента до об'єму суміші, та позначаються:

$$r_1 = \frac{V_1}{\sum_{i=1}^n V_K} \quad r_2 = \frac{V_2}{\sum_{i=1}^n V_K} \quad \dots \quad r_n = \frac{V_n}{\sum_{i=1}^n V_K}, \quad (1.27)$$

де  $V_1 \dots V_K$  – парціальні об'єми компонентів, м<sup>3</sup>;

$\sum_{i=1}^n V_K$  - об'єм суміші, м<sup>3</sup>.

**Закон Амага** - сума парціальних об'ємів усіх компонентів дорівнює об'єму суміші:

$$\sum_{i=1}^n V_K = V_1 + \dots + V_K + \dots + V_n. \quad (1.28)$$

## 2. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕПЛОМАСООБМІНУ

### 2.1 Загальні відомості з теорії тепломасообміну

#### 2.1.1 Основні положення

**Теорією теплопередачі, або теплообміну,** називається вчення про процеси поширення теплоти в просторі з неоднорідним полем температур. У процесі теплової взаємодії між тілами теплота переходить від тіла з більш високою температурою до тіла з більш низькою температурою. При відсутності різниці температур процес теплообміну припиняється і настає тепла рівновага.

Розрізняють три способи поширення теплоти: **теплопровідність, конвекція і теплове випромінювання.**

**Теплопровідність** це перенос теплоти, здійснюваний за допомогою теплового руху структурних часток речовини (атомів, молекул, електронів). У газоподібних тілах поширення теплоти теплопровідністю відбувається внаслідок обміну енергією при зіткненні молекул, що мають різну швидкість теплового руху. У металах такими структурними частками є вільні електрони, у рідинах і твердих тілах (діелектриках) теплота переноситься шляхом безпосередньої передачі теплового руху молекул і атомів сусіднім часткам речовини у формі пружних хвиль.

**Конвекцією** називається рух окремих макрооб'ємів рідини або газу під дією сил різної природи. Надалі обидва середовища об'єднаємо одним поняттям «рідина» (теплоносії). Якщо рух рідини викликаний різницею щільностей холодних і нагрітих макрооб'ємів у полі гравітаційних сил, то його називають **вільним (вільна конвекція)**. У цьому випадку нагріті шари рідини завдяки дії архімедової піднімальної сили рухаються нагору, а охолоджені – униз. Змушений рух виникає під дією побудника руху: насоса, вентилятора і таке інше. Якщо конвекція здійснюється в середовищі з нерівномірним розподілом температури, то переміщення макрооб'ємів приводить до переносу теплоти, тобто до **конвективного теплообміну**. При наявності в теплоносії нерівномірного розподілу температур, швидкостей і концентрації речовини відбувається одночасний перенос теплоти, кількості руху і речовини.

**Перенос теплоти випромінюванням** це складне явище, що

#### 2.1.2.4. Конвективний теплообмін

Для конвективного теплообміну є характерним перенос кінцевих мас речовини. Конвективний теплообмін кількісно оцінюється формулою Ньютона-Ріхмана:

$$Q = F \cdot \alpha \cdot (t_{cm} - t_p), \quad (2.109)$$

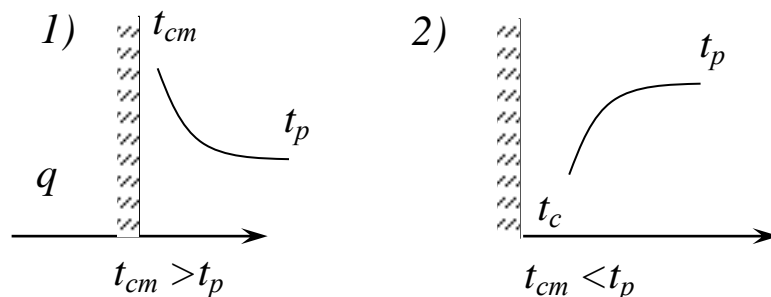
де  $Q$  – кількість теплоти, Вт;

$F$  – площа поверхні тепловіддачі, м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>К);

$t_{cm}$  – температура стінки, °С;

$t_p$  – температура рідини, °С.



### Рис. 2.1. Характер зміни температури

Передача теплоти від якої-небудь рідини до поверхні твердої стінки називається *тепловіддачею* і характеризується коефіцієнтом тепловіддачі ( $\alpha$ ), Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Тепловіддача до поверхні труби від: повітря  $\alpha=2\ldots 80$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); газу  $\alpha=12\ldots 120$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); води  $\alpha= 200\ldots 2000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); пари  $\alpha=22\ldots 110$  Вт/(м<sup>2</sup>·К); при конденсації  $\alpha= 4000\ldots 20000$ Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Для цього випадку термічний опір тепловіддачі для плоскої стінки має вираз:

$$R = \frac{1}{\alpha}, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}} \quad (2.110)$$

Для циліндричної стінки:

$$R = \frac{1}{\pi \cdot d \cdot \alpha}. \quad (2.111)$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha$ ), використовують критеріальну залежність типу:

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \quad (2.112)$$

Наприклад, для випадку вільної конвекції

## 3 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ

### 3.1 Паливо і його характеристика

У сільському господарстві для побутових і виробничих потреб широко використовується перетворення хімічної енергії палива в теплову чи механічну енергію. Горючі речовини використовувані для одержання теплової енергії при їхньому спалюванні називаються *паливом*.

*Використання палива:* кімнатні грубки - опалення,



готування їжі; *газові плити* - готування їжі; *водонагрівачі* - душові, баня; гаряча вода; *водогрійні котли* - опалення, гаряче водопостачання; *котли до 0,07 МПа* - опалення, кормоприготування; технологічна пара; *котли понад 0,07 МПа* - опалення, теплиці. технологічні процеси; *теплогенератори* - обігрів та вентиляція; *калорифери* - обігрів; *конвектори, каміни* - обігрів, опалення гарячим повітрям; *брудери* - місцевий обігрів інфрачервоними променями; *сушарки* - сушка зерна, фруктів; *коптильні* – приготування ковбас, баликів.

**Паливо** – це горючі речовини, що виділяють при спалюванні значну кількість теплоти, яка використовується в технологічних процесах чи перетворюється в інші види енергії.

За агрегатним станом розрізняють тверді, рідкі і газоподібні види палива; по походженню – природні та штучні.

*Види палива:* тверде (вугілля, дрова, тара, торф, побутове пічне паливо), рідке (мазут, солярова олія, дизпаливо, сланці), газоподібне (природний, зріджений газ, биогаз).

**Склад палива:** горюча частина - органічна, пірит ( $FeS_2$ ,  $C, H, O, N, S_{ор}$ ) негорюча частина (баласт) - волога зола мінеральні домішки ( $H_2O, SiO_2, Al_2O_3, CaSO_4, Fe_2O_3$ ).

**Склад твердого і рідкого палива.** Паливо у тому вигляді, у якому воно спалюється (йде в роботу), називається робочим паливом, а речовини, що входять у його склад, утворюють робочу масу палива.

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S_{гор}^p + A^p + W^p = 100\%, \quad (3.1)$$

де  $C, H, O, N, S$  - хімічні речовини: (вуглець, водень, кисень, азот, сірка),

$S_{гор} = S_{ор} + S_n$  - горюча сірка

$FeS_2$  - пірит (сірчаний колчедан).

Кількість твердого палива вимірюють у тоннах (рідше в кілограмах)

### 3.3.3. Тепловий баланс котельного агрегату

При згорянні палива в котельній установці виникають перетворення хімічної енергії палива у теплову. Частина її перетворюється у корисну продукцію – пар, друга частина губиться. Ефективність використання теплоти у котельному агрегаті визначається тепловим балансом.

*Тепловий баланс котельного агрегату* – це рівняння між кількістю підведеної теплоти і сумою корисно використаної та втраченої теплоти. Складання теплового балансу є перший крок теплового розрахунку котельного агрегату. Розрізняють матеріальний та енергетичний баланс котельного агрегату.

Рівняння зберігання речовини:

$$\sum D = 0, \quad (3.45)$$

$$D_{\text{пост}} - D_{\text{кор.вик}} - D_{\text{втр}} = 0. \quad (3.46)$$

Рівняння зберігання енергії:

$$\sum Q = 0, \quad (3.47)$$

Тобто, кількість теплоти, яка *поступає* до котельного агрегату може бути *корисно використана*, або *втрачена*.

$$Q_{\text{пост}} - Q_{\text{кор.вик}} - Q_{\text{втр}} = 0, \quad (3.48)$$

Кількість теплоти, яка поступає до котельного агрегату складається з *нижчої робочої теплоти* згорання палива, *фізичної теплоти палива* та *фізичної теплоти повітря*:

$$Q_{p(\text{пост})}^p = Q_n^p + Q_{\text{фіз.п.}} + Q_{\text{фіз.пов.}}, \quad (3.49)$$

$$Q_H^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (3.50)$$

де  $Q_H^P$  - нижча робоча теплота згоряння палива, кДж;

$Q_1$  - корисно використана теплота, кДж;

$Q_2$  - втрати теплоти з газами, що відходять, кДж;

$Q_3$  -

втрати теплоти від хімічного недопалення, кДж;

$Q_4$  -

втрати теплоти від механічного недопалення, кДж;

$Q_5$  -

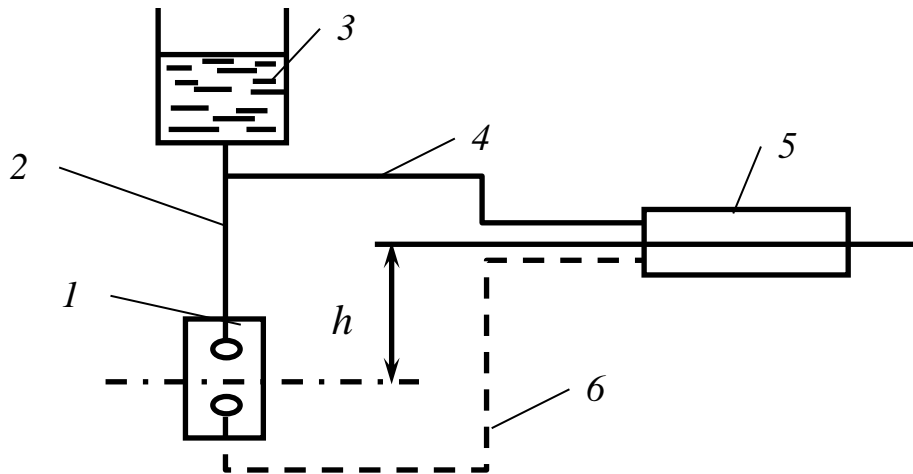


Рис. 4.8 – Принципова схема водяного опалення з натуральною циркуляцією: 1 – котел; 2 – головний стояк; 3 – розширювальний бачок; 4 – трубопровід, що подає; 5 – нагрівальний прилад; 6 – зворотна магістраль

втрати теплоти в навколишнє середовище, кДж.

Більш зручно користуватися рівнянням відповідних значень питомих кількостей теплоти, в процентах, позначивши:

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 = 100, \quad (3.51)$$

**Системи водяного опалення.** По способу забезпечення циркуляції води розрізняють системи з природною і примусовою циркуляцією. По способу прокладки магістральних трубопроводів розрізняють системи з верхнім і нижнім розведенням. По способу приєднання нагрівальних приладів до труб системи поділяють на верти-кальні і горизон-тальні. У залежності від схеми приєд-нання нагрівальних приладів, які підво-дять і відводять трубопроводам системи водяного опалення

підрозділяють на двохтрубні й одноктрубні. У залежності від напрямку руху води в гарячій і зворотній магістралях розрізняють тупикові системи і системи з супутнім рухом. Водяне опалення з природною циркуляцією. Циркуляція води в системі відбувається за рахунок різниці щільностей гарячої й охолодженої води

(рис.4.8).

Циркуляційний тиск:

$$p = 9,81(\rho_0 - \rho_2)h + \Delta p, \quad (4.35)$$

де  $h$  - вертикальна відстань між серединами висот котла і нижнього нагрівального приладу, м;

$\rho_0$  і  $\rho_2$  - щільності охолодженої і гарячої води, кг/м<sup>3</sup>.

Для запобігання підвищення тиску понад допустимий у найвищій точці системи розміщується розширювальний бачок (рис.4.9), що відкритий в атмосферу. Об'єм цього бачка повинний задовольняти умові:

$$V_{p.б.} = 0,045 \cdot V_c, \quad (4.36)$$

### 4.3 Сушіння продуктів сільськогосподарського виробництва

#### *Дійсний процес сушіння*

Дійсний процес сушіння відрізняється від теоретичного наявністю втрат.

Тепловий баланс дійсного сушіння:

$$q = l \cdot (h_B - h_A) = l \cdot (h_C - h_A) = q_M + q_{TP} + q_C - q_{доод} - C \cdot lnt'_M, \quad (4.70)$$

де  $q_M$  - утрати теплоти на прогрів матеріалу, що висушується;

$q_{TP}$  - утрати теплоти на прогрів транспортних пристроїв;

$q_C$  - утрати теплоти в навколишнє середовище;

$q_{доод}$  - додаткова теплота, що вводиться безпосередньо в сушильну камеру;

$C \cdot lnt'_M$  - теплота внесена вологою матеріалу, що висушується;

$t'_M$

- температура матеріалу, що висушується, при вході в камеру.

Варіанти основного сушильного процесу

1. Сушіння з рециркуляцією частини сушильного агента, що відробив.
2. Сушіння безпосередньо димовими газами.
3. Комбінований варіант.

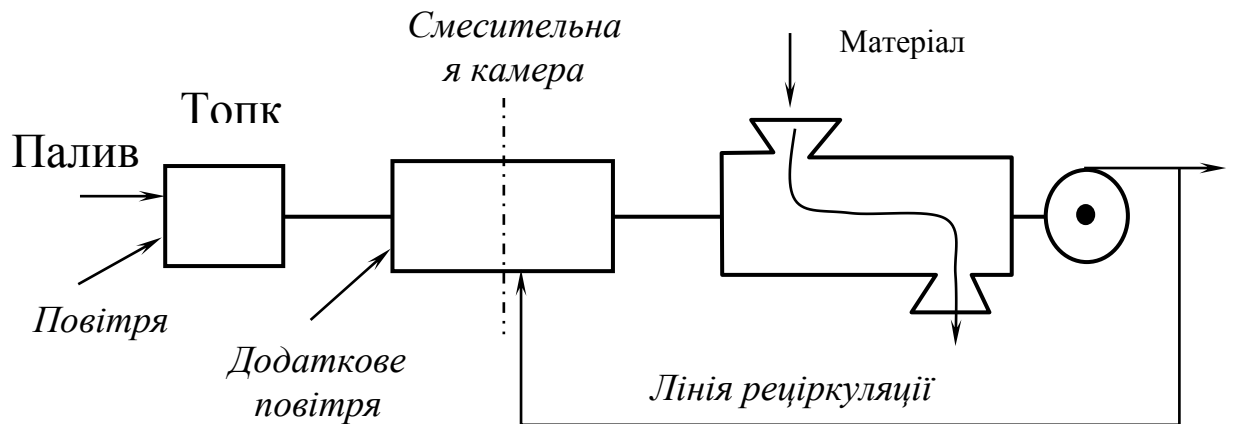


Рис. 4.17 – Схема сушильної установки з рециркуляцією  
Характеристика вологого матеріалу в процесі сушіння  
Вологість на загальну масу

$$\omega^0 = \frac{W_0}{M} \cdot 100 = \frac{W_0}{M_{\text{сух}} + W_0} \cdot 100\%, \quad (4.71)$$

де  $W_0$  – чи волога вода

$M = M_{\text{сух}} + W_0$  – загальна маса