

Гетта В.Г.



# Теплотехніка і теплові машини

Чернігів – 2014

УДК 621.1.

ББК 31.3873

Рекомендовано до друку Вченою радою Чернігівського національного педагогічного університету імені Т. Г. Шевченка

Рецензенти:

**М. А. Пригодій** – доктор пед. наук, професор кафедри педагогіки Національного університету біоресурсів і природокористування;

**О. М. Торубара** – доктор пед. наук, професор, декан технологічного факультету Чернігівського національного педагогічного університету імені Т. Г. Шевченка;

**П. М. Самосюк** – кандидат тех. наук, доцент Чернігівського інституту економіки і управління

Гетта В. Г.

Теплотехніка і теплові машини: Навчальний посібник. – Чернігів :2014.

У навчальному посібнику викладено теоретичні основи з термодинаміки, теплопередачі, тепло масообміну. Розглянуті джерела енергії, в тому числі відновлювальні котельні установки, холодильні установки, компресори та теплові двигуни. Наведемо відомості про системи енергозбереження та захист навколишнього середовища.

Призначено для студентів технологічних факультетів педагогічних університетів.

## ПЕРЕДМОВА

Відомо, що у людини ставлення як до оточуючого світу, так і до себе формується завдяки освіті. Одним з основних завдань освіти є формування світогляду – розуміння явищ природи, взаємодії людини з людиною, людини з природою, людини з технікою і т. д. Пріоритет у формуванні світогляду у підростаючого покоління належить школі. Значний вклад у його формування вносить учитель Технологій. Саме вони в процесі трудового навчання, відповідно до вікових можливостей у поєднанні теорії з практикою, повсякденним життям формують основні складові світогляду в учнівської молоді. Успіх у цій важливій справі значною мірою залежить від якості підготовки випускників технологічних факультетів і перш за все технічної. Серед інших загально – технічних, дисциплін, завдяки яким здійснюється технічна підготовка студентів, важливе місце належить курсу «Теплотехніка і теплові машини». Це зумовлено, по – перше, тим, що процеси отримання, передачі та використання теплоти мають місце у всіх галузях техніки сучасного виробництва. По – друге, теплові явища проявляються не тільки в техніці, а й у природі, повсякденно супроводжують наше життя тому їх знання прямо чи опосередковано сприяють захисту навколишнього середовища.

По – третє, теплові явища і процеси мають місце у побуті, їх знання сприяє грамотній експлуатації побутової техніки, економії енергії, що в даний час є дуже важливим.

Сучасність потребує врахування реальних умов обмеженості результатів традиційних видів енергетичного палива, постійного зростання їх вартості. У зв'язку з цим у світі все більшу увагу приділяють проблем енергозберігання, використанню нетрадиційних джерел енергії. Рівень забезпеченості України власними джерелами енергії на сьогодні становить близько 35%. Найбільш ефективним шляхом поліпшення енергозабезпечення України є максимально можлива енергоощадливість. Варто зауважити, що на

одиницю внутрішнього валового продукту ми витрачаємо енергії в 2 – 3 рази більше, ніж у розвинутих країнах.

Навчальний посібник складається з чотирьох розділів: «Теоретичні основи термодинаміки», «Основи теорії тепло – і масообміну», «Джерела теплової енергії та її використання», «Теплові машини та установки».

Особлива увага в навчальному посібнику приділена альтернативним джерелам енергії, таким як енергія сонячного випромінювання, вітроенергетична, біоенергетична, геотермальна, енергія. Це акцентує увагу читача на необхідність розширювати використання відновлювальних джерел енергії.

Автор висловлює глибоку подяку рецензентам та тим хто надав цінні поради та сприяв виданню навчального посібника.



# ЗМІСТ

## *Розділ I*    **Теоретичні основи термодинаміки**

1.1	Основні поняття і визначення термодинаміки.....	7
1.2	Закони ідеальних газів .....	12
1.3	Взаємозв'язок теплових явищ.....	15
1.4	Перший закон термодинаміки .....	21
1.5	Аналіз основних термодинамічних процесів ідеальних газів ....	23
1.6	Кругові процеси .....	31
1.7	Другий закон термодинаміки .....	33
1.8	Цикл Карно .....	34
1.9	Обернений цикл Карно.....	41
1.10	Третій закон термодинаміки.....	46
1.11	Аналіз циклів теплових двигунів .....	47
1.12	Цикл двигунів внутрішнього згорання.....	50
1.13	Цикл газових турбін .....	66
1.14	Цикл реактивних двигунів .....	68
1.15	Цикл паросилових установок .....	70

## *Розділ II*    **Основи теорії тепло – і масообміну**

1.2	Теплопровідність.....	73
2.2	Конвективний теплообмін.....	77
2.3	Масообмін.....	84
2.4	Променевий теплообмін.....	87
2.5	Теплообмінні апарати.....	92

## *Розділ III*    **Джерела теплової енергії та її використання**

3.1	Загальна характеристика палива.....	103
3.2	Тверде паливо .....	116
3.3	Рідке паливо .....	135
3.4	Газоподібне паливо.....	148
3.5	Атомна енергетика .....	168
3.6	Енергія сонячного випромінювання.....	180
3.7	Вітроенергетика.....	214
3.8	Біоенергетика.....	228
3.9	Геотермальна енергія.....	237

*Розділ IV*    **Теплові машини та установки**

4.1	Котельні установки .....	256
4.2	Теплові й газові турбіни .....	278
4.3	Поршневі теплові двигуни внутрішнього згорання .....	303
4.4	Електричні станції.....	337
4.5	Компресори.....	366
4.6	Холодильні установки .....	386

# РОЗДІЛ I ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

## 1.1 Основні поняття і визначення термодинаміки.

**Теплотехніка** – це наука яка вивчає методи отримання, переробки, передачі і використання тепла і пов'язані з цим апарати та пристрої.

Об'єктом її вивчення є різноманітні термодинамічні системи, тому теплотехніку ще називають **термодинаміка**.

Теплотехніка оперує макроскопічними характеристиками об'єктів, базуючись на декількох експериментально встановлених законах (початках) термодинаміки. Тому термодинамічний метод використовується для теоретичного аналізу загальних закономірностей самих різноманітних теплових явищ і систем.

**Термодинамічною системою** називається сукупність матеріальних тіл, які знаходяться в енергетичній взаємодії між собою і оточуючим середовищем. Термодинамічна система, яка не може обмінюватися енергією з оточуючим середовищем, називається *ізолюваною*.

Термодинамічна система, в середині якої немає поверхонь розділу, що відділяють макроскопічні частини різні за властивостями і складом, називають *гомогенною*. Система, яка складається з декількох різних гомогенних частин, що мають поверхню розділу, називається *гетерогенною*.

Гомогенними системами є, наприклад, суміші газів, рідкі і тверді розчини, а також будь – яке хімічно однорідне тіло, що знаходиться в одному агрегатному стані. Прикладами гетерогенної системи є лід, що тане, волога пара, багато сплавів і гірських порід.

У відповідності з трьома видами агрегатного стану виділяють тверду, рідку і газоподібну *фази*. Наприклад, волога пара складається з двох фаз – киплячої води і сухої насиченої пари .

**Компонентами** термодинамічної системи називаються різні речовини, найменше число яких достатньо для утворення всіх фаз системи.

За ролями окремих тіл, що входять в термодинамічну систему їх розділяють на *робочі тіла, джерела тепла, об'єкти роботи*.

Робочими тілами називаються макроскопічні тіла (гази, водяна пара, суміш газів, що утворюються при згорянні палива і т.д.), між якими здійснюється обмін енергією в формі теплоти і роботи. В теплових двигунах перетворення теплоти в роботу здійснюється за допомогою робочого тіла. Наприклад, в двигунах внутрішнього згорання, а також газотурбінних установках розглядають процеси, в яких робочим тілом є газ. В парових двигунах робочим тілом є пара. Хоча між газом і паром, з точки зору теплотехніки, різниці немає: газ можна розглядати як пару відповідної рідини (дуже перегріта пара), а пару – як реальний газ, близький до стану зкrapлення. Якщо можна знехтувати впливом сил взаємодії між молекулами і розмірами молекул (дуже нагрітий газ при незначному тиску), газ називається *ідеальним*. В протилежному випадку – *реальним*. Найбільш нагріті тіла в системі є джерелами теплоти.

Стан термодинамічної системи визначається сукупністю значень її *термодинамічних параметрів* (параметрів стану) – всіх фізичних величин, що характеризують макроскопічні властивості системи (її густину, енергію, в'язкість, поляризацію, намагніченість тощо). Стан системи вважають *стаціонарним*, якщо він не змінюється з часом. Стаціонарний стан системи називають *рівноважним*, якщо його незмінність необумовлена протіканням якого-небудь зовнішнього по відношенню до системи процесу.

Термодинамічні параметри системи взаємопов'язані. Тому рівноважний стан системи можна однозначно визначити, якщо вказати значення параметрів.

Основними параметрами стану системи є: *тиск, температура і питомий* (або молярний) *об'єм*.

**Тиском** називається фізична величина  $P$ , яка дорівнює границі відношення чисельного значення  $\Delta F_n$  нормальної сили, яка діє на ділянку поверхні тіла площею  $\Delta S$ , до величини  $\Delta S$ , при  $\Delta S \rightarrow 0$ .

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta S} = \frac{dF_n}{dS}$$

Одиницею вимірювання тиску в системі Сі є Паскаль – тиск, який спричиняється силою в 1Н, рівномірно розподілений по поверхні площею  $1\text{м}^2$ . В термодинамічних розрахунках використовують тиск абсолютний і надлишковий (манометричний). Абсолютний тиск – це тиск, що відраховується від абсолютного вакууму або від нуля. Його позначають –  $P_a$ . Надлишковим називають тиск більший за атмосферний, тобто надлишковий тиск – це різниця між абсолютним і барометричним

$$P_m = P_a - P_\sigma$$

Треба відмітити, що надлишковий тиск не визначає стану речовини і не є параметром стану, оскільки залежить також від стану навколишнього середовища.

Вакуумом називають різницю між атмосферним тиском і абсолютним того середовища, де вимірюється тиск. Якщо абсолютний тиск газу чи пари в посудині нижчий барометричного, тобто  $P_a < P_\sigma$ , то різниця  $P_v = P_\sigma - P_a$ , називається вакуумом або розрідженням.

Вакуум показує на скільки тиск газу (пари) менше тиску навколишнього середовища. Тиск атмосферного повітря вимірюється барометрами, надлишковий тиск – манометрами, а вакуум – вакуумметрами.

У термодинамічних рівняннях завжди використовують значення абсолютного тиску, поскільки він є параметром, що характеризує стан системи.

Атмосферний тиск – величина змінна. В техніці застосовується нормальний атмосферний тиск ( $P_0$ ), який дорівнює  $101,32\text{кПа}$  ( $760\text{мм.рт.ст.}$ ).

В технічній термодинаміці розрізняють нормальні, фізичні і нормальні технічні умови. Нормальні фізичні умови:

$t = 0^{\circ}$  ,  $P = 101,325 \text{ кПа}$  (760мм.рт.ст.). Рідше використовуються нормальні технічні умови:  $t = 15^{\circ}\text{C}$ :  $P = 98,0665 \text{ кПа}$  (735 мм.рт.ст.).

**Температурою** називається фізична величина, яка характеризує ступінь нагрітості тіла. При термодинамічній рівновазі температура всіх тіл системи однакова.

Вимірювання температури системи можна здійснювати тільки не безпосереднім шляхом, який заснований на залежності від температури таких фізичних властивостей тіл, які піддаються безпосередньому виміру. Тіла, що застосовуються з цією метою, називають *термометричними*, а шкала з допомогою якої встановлюється температура – емпіричною. В якості вихідних значень, які використовують при побудові шкали температури, для визначення початку відліку температури і одиниці її вимірювання – *градуси*, застосовуються температури переходу хімічно чистих речовин з одного агрегатного стану в інший, наприклад температури плавлення льоду ( $t_0$ ) і кипіння води ( $t_k$ ) при нормальному атмосферному тиску (760 мм.рт.ст.). Величини  $t_0$  і  $t_k$  в залежності від типу шкали такі:

а) *Шкала Цельсія* (стоградусна):  $t_0=0^{\circ}\text{C}$ ,  $t_k=100^{\circ}\text{C}$ .

б) *Шкала Фаренгейта*:  $t_0=32^{\circ}\text{F}$ ,  $t_k=212^{\circ}\text{F}$ .

в) *Шкала Кельвіна*: температура  $T$  відраховується від абсолютного нуля ( $T = -273,15^{\circ}\text{C}$ ) і називається абсолютною температурою.

Зв'язок між значеннями температури по шкалі Кельвіна ( $T^{\circ}\text{K}$ ) і шкалі Цельсія ( $t^{\circ}\text{C}$ ) такий:

$$T^{\circ}\text{K} = t^{\circ}\text{C} + 273,15^{\circ}\text{C}$$

**Питомим об'ємом**  $U$  називається величина обернена до густини,  $U = \frac{1}{\rho}$ . Для однорідного тіла питомий об'єм дорівнює відношенню його об'єму до маси, тобто чисельно рівному об'єму тіла маса якого дорівнює одиниці.

**Грам-молекулою** (молем) називається така кількість однорідної речовини, маса якої виражена в грамі, чисельно дорівнює її молекулярній вазі  $\mu$ . Об'єм  $V_\mu$  одного моля речовини називається її молярним об'ємом:

$$V_\mu = \mu U = \frac{\mu}{\rho}$$

**Грам-атомом** (кілограм – атомом) називається така кількість хімічно простої речовини, маса якої виражається в грамах (кілограмах), що дорівнює її атомній вазі.

Число молекул в грам - молекулі і число атомів в грам - атомі для всіх речовин однакові. Це число називається **числом Авагадро**,  $N_A$

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 6,023 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$$

Внутрішні параметри термодинамічної системи, яка знаходиться в рівновазі, залежить тільки від її зовнішніх параметрів і від температури:

$$Y_k = f(x_1, x_2 \dots x_n, T),$$

де –  $Y_k$  внутрішній параметр, а  $x_1, x_2 \dots x_n$  – зовнішні параметри. Наприклад, рівноважний стан фізично однорідної системи у відповідності з правилом фаз Гіббса повністю визначається двома параметрами. Тому рівноважний тиск в цій системі є функцією її об'єму і температури.

$$P = f_1(V_1 T).$$

**Термодинамічним процесом** називається будь – яка зміна стану термодинамічної системи. **Рівноважним процесом** називається процес при якому система проходить неперервний ряд рівноважних станів. **Круговим процесом** або **циклом** називається термодинамічний процес, в результаті здійснення якого система повертається в початковий стан.

**Ізопроесами** називаються ті, що протікають при незмінному значенні одного з параметрів стану.

**Ізохорним** – при постійному об'ємі. **Ізобарним** – при постійному тиску. **Ізотермічним** – температурі. **Адіабатичним** процесом називають такий, який відбувається без теплообміну із зовнішніми тілами.

**Функцією стану** називається така фізична характеристика системи, зміна якої при переході з одного стану в інший не залежить від виду відповідного цьому переходу термодинамічного процесу, а цілком визначається величинами параметрів початкового і кінцевого станів. Дуже важливими функціями стану в теплотехніці є внутрішня енергія  $u$ , ентальпія  $H$ , ентропія  $S$ , ізохорно-ізотермічний потенціал і ізобарно – ізотермічний потенціал  $\Phi$ .

Рівноважні стани фізично однорідної системи і рівноважні процеси, що з нею відбуваються, можна зображати графічно відповідно точками і кривими в прямокутних декартових координатах, вздовж осей яких відкладають параметри стану системи або однозначно пов'язі з ними функціями стану. Таке графічне зображення називається *термодинамічною діаграмою*. Найбільш поширеними є діаграми  $V - P$ ,  $S - T$ ,  $S - H$ .

## 1.2 Закони ідеальних газів

**Ідеальним** газом називається такий, в якого відсутні сили міжмолекулярної взаємодії, а розмірами молекул можна знехтувати. З невеликою похибкою гази можна вважати ідеальними, коли їх стани далекі від областей фазових перетворень.

Для ідеальних газів справедливі такі закони: Бойля – Маріотта, Гей – Люссака, Шарля і Авагадро.

**Закон Бойля-Маріотта:** при постійній температурі і масі добуток численних значень тиску і об'єму газу є постійним:

$$PV = \text{const}.$$

**Закон Гей-Люссака:** при постійному тиску об'єм даної маси газу прямопропорційний його абсолютній температурі:

$$V = \alpha \cdot V_0 T = V_0 \frac{1}{T_0},$$

де  $V_0$  – об'єм газу при температурі,  $T_0 = 273,15^0$ ,  $\alpha = \frac{1}{T_0}$ ,  $K$  – коефіцієнт об'ємного розширення.



**Закон Шарля:** при постійному об'ємі тиск даної маси газу прямо пропорційний його абсолютній температурі:

$$P = P_0 \frac{1}{T_0},$$

де  $P_0$  – тиск газу при температурі  $T_0 = 273,15^\circ\text{K}$ .

**Закон Авагадро:** при однаковому тиску і температурі в рівних об'ємах різних ідеальних газів знаходиться однакове число молекул. Або, що те саме: при однаковому тиску і температурі грам-молекули різних ідеальних газів займають однакові об'єми. Так, наприклад, при нормальних умовах ( $t = 0^\circ\text{C}$  і  $P = 1\text{атм} = 760\text{ мм. рт. ст.}$ ) грам – молекула всіх ідеальних газів займає об'єм  $V_\mu = 22,414\text{ л}$ . Число молекул, що знаходиться в  $1\text{см}^3$  ідеального газу при нормальних умовах, називається числом Лошмідта, воно дорівнює  $2,687 \cdot 10^{19}\text{ см}^{-3}$ .

**Рівняння стану ідеального газу**, як відомо з фізики, має такий вигляд:

$$PV_\mu = RT,$$

де  $P, V_\mu$  і  $T$  – тиск, молярний об'єм і абсолютна температура газу, а  $R$  – універсальна газова постійна, чисельно рівна роботі, яка здійснюється одним молем ідеального газу при ізобарному нагріванні на один градус:

$$\begin{aligned} R &= 8,31 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{ккал} \cdot \text{град}} = 0,0821 \frac{\text{л} \cdot \text{атм}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 0,848 \frac{\text{кГм}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \\ &= 8,31 \cdot 10^7 \frac{\text{ерг}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 1,987 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \end{aligned}$$

Для довільної кількості маси  $M$  газу об'єм

$$V = \frac{M}{\mu} V_\mu$$

і рівняння стану матиме вигляд:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT.$$

Це рівняння називається – **рівнянням Менделєєва – Клайперона**. Оскільки

$\frac{V}{M} = V$  – питомий об'єм газу, то

$$PV = \frac{R}{\mu} T = BT,$$

де  $B = R/\mu$  – питома газова постійна, яка залежить від молекулярної ваги газу.

З рівняння Менделєєва – Клайперона виходить, що число  $n_0$  молекул, яке міститься в одиниці об'єму ідеального газу, дорівнює

$$n_0 = \frac{N_A}{V_\mu} = \frac{PN_A}{RT} = \frac{P}{kT},$$

де  $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{град}} = 1,38 \cdot 10^{-16} \frac{\text{ерг}}{\text{град}}$  – постійна Больцмана,

$N_A$  – число Авагадро.

Для реального газу, в якого відчутні сили взаємодії між молекулами і об'єм, рівняння стану

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

і називається **рівнянням Ван-дер-Ваальса**.

На практиці часто в якості робочого тіла використовується не однорідні (чисті) гази, а їх суміш. Наприклад, повітря, продукти горіння палива тощо, які часто можна розглядати як ідеальні. Складові таких газів називають *компонентами*. Завдяки хаотичному руху молекул і відсутності взаємодії між ними, кожний компонент суміші рівномірно розташовується по всьому об'єму посудини і веде себе так ніби він займав би весь об'єм посудини при тій же температурі, що і суміш. Тиск окремих компонентів суміші на стінки посудини називають *парціальним*.

Відповідно закону Дальтона, абсолютний тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків її компонентів, тобто

$$P_{\text{см}} = P_1 + P_2 \dots + P_n = \sum P_i.$$

Таким чином, кожний компонент суміші займає весь об'єм суміші  $V_{\text{см}}$  і знаходиться під своїм парціальним тиском  $P_i$ . Однак, якщо цей компонент буде знаходитись під тиском  $P_{\text{см}}$ , при тій же температурі суміші  $T_{\text{см}}$ , то він займе об'єм  $V_i$ , менший об'єму всієї суміші.

Об'єм даного компонента  $V_i$ , який він мав би, якщо б знаходився при повному тиску суміші і її температурі називають *приведеним*, або *порційним*. Відповідно закону Амага,

$$V_{см} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum V_i,$$

де  $V_{см}$  – повний об'єм суміші газів.

Отже, для чистих газів достатньо знати тільки два параметри стану, щоб визначити останні, а для суміші треба ще знати її склад.

Тоді в загальному вигляді рівняння стану для суміші газів записується так:

$$f(P, V, T, Z) = 0.$$

Склад суміші газів може бути заданий масовими, об'ємними і мольними долями.

При розрахунку параметрів стану суміші ідеальних газів можна користуватися рівнянням Менделєєва – Клайперона, записаним в формі:

$$PV = \frac{M}{\mu_{см}} RT$$

або

$$PV = MB_{см} T,$$

де  $\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\mu_i}}$  – уявна молекулярна вага суміші,  $q_i$  – масова доля

компонента.

$$B_{см} = \frac{R}{\mu_{см}} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\mu_i}$$

де  $B_{см}$  – питома газова постійна суміші.

### 1.3 Взаємозв'язок теплових явищ

Для розуміння теплових явищ важливо з'ясувати поняття внутрішня енергія, теплоємність, ентальпія, теплота і робота.

**Внутрішньою енергією  $U$**  називається енергія системи, яка залежить тільки від її термодинамічного стану. Для системи, яка не зазнає дії

зовнішніх сил і знаходиться в стані макроскопічного спокою, внутрішня енергія є повною енергією системи. В деяких простих випадках внутрішня енергія дорівнює різниці між повною енергією  $W$  системи і сумою кінетичної енергії  $W_k$  її макроскопічного руху і потенціальної енергії  $W_n$ , обумовленої діями на систему зовнішніх силових полів:

$$U = W - (W_k + W_n).$$

Внутрішня енергія системи дорівнює сумі:

- а) кінетичної енергії хаотичного руху мікрочастинок системи (молекул, атомів, іонів, вільних електронів тощо);
- б) потенціальної енергії взаємодії мікрочастинок тіла;
- в) енергії взаємодії атомів чи іонів в молекулах;
- г) енергії електронних оболонок атомів і іонів;
- д) ядерної енергії;
- е) енергії електромагнітного випромінювання.

Внутрішня енергія є однозначною функцією стану системи. Її зміна  $\Delta U$  при переході системи з стану 1 в стан 2 не залежить від виду процесу і дорівнює

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Якщо система здійснює процес, то повна зміна її внутрішньої енергії дорівнює нулю:

$$\oint du = 0$$

Внутрішня енергія може бути визначена тільки з точністю до постійної складової  $U_0$ , яка не може бути знайдена методами термодинаміки. Однак це не є суттєвим, оскільки при термодинамічному аналізі системи мають справу не з абсолютним значенням її внутрішньої енергії, а з незалежними від  $U_0$  змінами цієї енергії в різних процесах. Тому часто приймають  $U_0 = 0$ , а під внутрішньою енергією системи розуміють тільки ті її складові, які змінюються в процесі, що розглядається. Наприклад, при не дуже високих температурах внутрішню енергію ідеального газу можна вважати сумою кінетичних енергій хаотичного руху його молекул. Внутрішня енергія

гомогенної системи є адитивною величиною. Вона дорівнює внутрішній енергії всіх її макроскопічних частин, тобто пропорційна межі системи.

Внутрішня енергія гетерогенної системи включає в себе не тільки суму внутрішніх енергій всіх гомогенних частин системи, але також енергію молекулярної взаємодії їх поверхневих шарів. Але в багатьох випадках внутрішню енергію гетерогенної системи також можна вважати адитивною величиною, що дорівнює сумі внутрішніх енергій всіх фаз системи. Однак так не можна поступити, наприклад, для дрібнодисперсних гетерогенних систем.

**Теплоємністю системи** (робочого тіла) називають відношення елементарної кількості отриманої нею теплоти  $\partial Q$  в якому – небуть процесі до відповідної зміни температури  $dT$  в цьому процесі.

$$C = \frac{\partial Q}{dT}, \text{ Дж/К}^\circ.$$

*Численно теплоємність дорівнює кількості теплоти, яку необхідно надати системі, щоб при заданих умовах підвищити її температуру на 1 градус.*

При різних температурах, а в загальному випадку і при різних тисках, теплоємність даного робочого тіла змінюється, тобто на протязі процесу змінюється. В зв'язку з цим в теплотехніці використовують середню теплоємність, молярну теплоємність і об'ємну теплоємність.

*Середню* теплоємністю  $C_{cp}$  тіла в інтервалі температур від  $T_1$  до  $T_2 > T_1$  називається відношення тепла  $Q$ , необхідного для підвищення температури тіла від  $T_1$ , до  $T_2$ , до  $T_2 - T_1$ :

$$C_{cp} = \frac{Q}{T_2 - T_1}.$$

зв'язок між середню теплоємністю тіла і його теплоємністю такий:

$$C_{cp} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} C dT.$$

**Питомою теплоємністю** ( $c$ ) називається теплоємність одиниці маси однорідної речовини

$$c = \frac{C}{M}$$

де  $M$  маса тіла.

**Атомною теплоємністю** ( $C_a$ ) називається теплоємність грам-атома простої речовини:

$$C_a = Ac,$$

де  $A$  – атомна вага речовини.

**Молярною теплоємністю** ( $C_\mu$ ) називається теплоємність одного моля речовини:

$$C_\mu = \mu c,$$

де  $\mu$  – молекулярна вага речовини.

**Об'ємною теплоємністю**  $\epsilon$  відношення теплоємності робочого тіла (системи) в даному його стані (при даних  $P:T$ ) до б'єму робочого тіла при нормальних фізичних умовах

$$C_{об} = \frac{C}{V_0} = C \cdot \rho_n,$$

де  $\rho_n$  – густина робочого тіла при нормальних фізичних умовах ( $\rho = 101,325 \text{ кПа}; t = 0^\circ\text{C}$ ).

Збільшення теплоємності при зростанні температури газу не значне. Так, наприклад, ізобарна теплоємність повітря при зміні температури від  $0^\circ\text{C}$  до  $100^\circ\text{C}$  зростає на 0,6%, але при зміні температури від  $0^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$  збільшується на 27%. Тому при значних змінах температури газу у процесах, які відбуваються в двигунах внутрішнього згоряння і газових турбінах, а також при охолодженні продуктів згоряння палива в газових котлах необхідно враховувати залежність теплоємності від температури.

**Ентальпією  $H$**  (тепловмістом і тепловою функцією) називається функція стану термодинамічної системи, що дорівнює сумі її внутрішньої енергії і добутку тиску на об'єм системи, вираженої в тих же одиницях:

$$H = U + PV$$

Для системи, що містить 1 кг робочого тіла питома ентальпія  $h$  записується так:

$$h = u + pV$$

Величина  $pV$  має назву потенціальної енергії тиску і є роботою, яку треба виконати, щоб ввести тіло об'ємом  $V$  в середовище з тиском  $p$ . Таким чином, якщо робоче тіло знаходиться в зовнішньому середовищі з тиском  $p$ , то з будь-яким його станом зв'язана енергія  $u+pV$ , численно рівна ентальпії  $h$  робочого тіла в даному стані. Значить, ентальпія, будучи складеною з параметрів стану  $u$ ,  $p$  і  $V$ , є однозначною функцією стану, тобто параметром стану. Отже, зміна  $\Delta h$ , як і зміна  $\Delta u$ , не залежить від характеру процесу, а залежить від початкового і кінцевого стану

$$\Delta h = h_2 - h_1 = (u_2 + P_2V) - (u_1 + P_1V_1)$$

Ентальпія ідеального газу, як і внутрішня енергія, є функцією тільки температури

$$h = u + pV = u(T) + RT$$

тобто для ідеального газу дві складові залежать тільки від температури, а значить  $h = f(T)$ .

Поняття ентальпії широко застосовується в розрахунках (особливо графічних) теплових і термодинамічних процесах. Особливо велике значення має ентальпія при розгляді термодинамічних потоків газів або пари, де вона набуває змісту внутрішньої потенціальної енергії потоку.

Важливими поняттями технічної *термодинаміки* є *робота* і *теплота*. Будь-який термодинамічний процес є послідовною зміною стану тіла в результаті взаємного обміну енергією робочого тіла і оточуючого середовища. Передача енергії від одного тіла до іншого може здійснюватись двома принципово різними способами.

Перший спосіб передачі енергії полягає у дії одного тіла на інше, що приводить до переміщення останнього. При цьому одне тіло над іншим виконує механічну роботу  $L$ , яка вимірюється добутком сили, котра діє на тіло, на шлях його переміщення.

Величина роботи  $L$  дорівнює зменшенню запасу енергії одного тіла і збільшенню запасу енергії у другого.

В технічній термодинаміці механічна робота, яка здійснюється газом або парою, пов'язана не з переміщенням, а зміною об'єму.

Робота розширення здійснювана системою проти сил зовнішнього тиску знаходиться за виразом

$$\partial L = P_{\text{зов}} \cdot dV;$$

а для одного кілограма речовин

$$dl = PdV.$$

Другий спосіб передачі енергії пов'язаний з наявністю різниці температур. Передача теплоти в цьому випадку здійснюється або шляхом безпосереднього дотику тіл, або за допомогою випромінювання. В такому випадку кількість переданої енергії називається теплотою, а сам процес – *теплопередачею*.

Таким чином, робота і теплота є двома способами (формами) передачі енергії в термодинамічному процесі і одночасно мірою переданої енергії. В багатьох випадках може бути одночасна передача енергії цими двома способами. Отже, робота і теплота є основними характеристиками термодинамічного процесу, а їх величина залежить від виду процесу. З математичної точки зору це означає, що елементарні величини  $dL$  і  $dQ$  не є повними диференціалами, а є безмежно малими кількостями роботи і теплоти, передані в елементарному термодинамічному процесі.

Однак не дивлячись на спільність понять робота і теплота як міри переданої енергії в процесі, все ж між ними є якісна різниця. В той час як енергія, що передається першим способом, може безпосередньо витратитися



на збільшення будь-якого виду енергії, теплота безпосередньо, тобто без попереднього перетворення в роботу, може витратитись тільки на збільшення внутрішньої молекулярної енергії.

#### 1.4 Перший закон термодинаміки

Загальний закон збереження енергії, який має таку формулювання: *енергія не може бути не створена, не знищена, а може бути тільки перетворена з одного виду в інший в ході різних фізичних і хімічних процесів*, є фундаментальним. В його відкритті прийняло участь багато видатних вчених і перш за все М.В. Ломоносов, який виходячи із молекулярно-кінетичної теорії речовини, відкинув пануючу в той час метафізичну теорію і вперше запропонував формулювання принципу збереження матерії і енергії.

Звичайно з того часу розширилось уявлення про енергію, встановлений взаємозв'язок між двома якісно різними характеристиками матерією – енергією і масою тіла.

Перший закон термодинаміки є окремим випадком загального закону збереження і перетворення енергії стосовно до процесів, які відбуваються в термодинамічних процесах. В загальному випадку його можна сформулювати так: *повна енергія ізольованої термодинамічної системи при будь-яких процесах, що відбуваються в ній, залишається незмінною*, тобто

$$E = \text{const}, \text{ або } E_2 - E_1 = 0,$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – відповідно повна енергія системи в початковому і кінцевому станах.

Якщо система знаходиться в енергетичній взаємодії з оточуючим середовищем, то повна енергія системи або тіла в кінцевому стані  $E_2$  буде дорівнювати повній енергії стану  $E_1$  з алгебраїчною сумою всіх енергій  $\sum \Delta E$ , які отримані або віддані тілом в процесі енергообміну

$$E_2 = E_1 + \sum \Delta E.$$

Для термодинамічних процесів, в яких енергія підводиться або відводиться тільки в формі роботи і теплоти, і враховуючи, що при підведенні теплоти  $Q$  має додатній знак, а робота  $L$  – від’ємний, маємо

$$\sum \Delta E = Q - L,$$

тоді попередній вираз можна записати так

$$Q = E_2 - E_1 + L = \Delta E + L$$

Ця формула називається *аналітичним вираженням першого закону термодинаміки*.

Якщо тіло не має видимої швидкості руху і відсутнє зовнішнє поле сил, то повна енергія тіла буде складатись тільки з внутрішньої енергії  $E = U$ . Тоді аналітичний вираз першого закону термодинаміки можна записати так:

$$Q = \Delta U + L$$

Для 1 кг речовини

$$q = \Delta u + l,$$

або в диференціальній формі

$$dq = du + dl.$$

Таким чином, в термодинамічному процесі підведена теплота в загальному випадку витрачається на зміну внутрішньої енергії і на роботу проти зовнішніх сил.

Для кругового процесу, в якому початковий і кінцевий стан співпадають, диференціальне рівняння першого закону термодинаміки записується так :

$$\oint dq = \oint du + \oint dl$$

Враховуючи, що для кругового процесу

$$\oint dq = q_0, \oint dl = l_0, \oint du = 0, \text{ отримаємо } q_0 = l_0,$$

тобто робота в круговому процесі може здійснюватись тільки за рахунок теплоти, яка надається зовні.

Якби виявилось, що  $q_0 < l_0$ , то можна було б побудувати вічний двигун першого роду, тобто двигун, який виконував би роботу без витрати енергії.

В зв'язку з цим перший закон термодинаміки часто формулюють так:  
*вічний двигун першого роду неможливий.*

Поскілки робота, яку треба виконати, щоб ввести тіло об'ємом  $V$  в середовище з тиском  $P$  дорівнює  $PV$  то перший закон можна записати так

$$dq = du + pdV.$$

З іншої сторони  $u + pdV = h$  (ентальпія), тоді перший закон термодинаміки можна записати так

$$dh = d(u + pV) = du + pdV + Vdp, \text{ або}$$

$$dh = dq + Vdp, \text{ звідки}$$

$$dq = dh - Vdp$$

### **1.5 Аналіз основних термодинамічних процесів ідеальних газів**

Аналіз будь-якого термодинамічного процесу полягає у встановленні закономірностей зміни параметрів стану робочого тіла та виявлення особливостей перетворення енергії.

При проведенні аналізу здійснюють такі операції:

- 1) виводиться рівняння процесу в  $p - V$ - координатах;
- 2) встановлюється залежність між параметрами процесу, що змінюються;
- 3) визначається зміна внутрішньої енергії  $\Delta u$ ;
- 4) визначається термодинамічна робота газу  $l$ ;
- 5) визначається зовнішня теплота  $q$ , яка необхідна для здійснення процесу.

Крім того, знаходиться зміна ентальпії  $\Delta h$  і ентропії  $\Delta S$  між початковим і кінцевим станом процесу.

Термодинамічні процеси можуть бути різними. Серед їх різноманіття виділяють *зворотні і не зворотні*.

*Зворотним* називають такий термодинамічний процес, який допускає можливість повернення системи в початковий стан без змін в оточуючому

середовищі. Необхідною і достатньою умовою зворотності процесу є його рівноважність.

*Незворотним* називається процес, при якому не відбувається повернення системи в попередній стан без змін в оточуючому середовищі. Всі реальні процеси відбуваються з кінцевою швидкістю. Вони супроводжуються тертям, дифузією і термообміном. Значить, всі вони нерівноважні і незворотні.

Будь-який незворотний процес в одному (прямому) напрямі відбувається самодовільно, а для здійснення його в зворотному напрямі так, щоб система повернулася в початковий стан, необхідний компенсуючий процес за рахунок зовнішніх тіл, що оточують термодинамічну систему.

Основними термодинамічними процесами є: ізохорний (при постійному об'ємі), ізобарний (при постійному тиску), ізотермічний (при постійній температурі), а також адіабатичний (без зовнішнього теплообміну).

### ***Ізохорний процес*** ( $V = \text{const}$ )

Аналітичний запис першого закону термодинаміки може бути застосований для будь-якого газового процесу. Застосуємо його для ізохоричного процесу

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A$$

При ізохорному нагріві об'єм газу не змінюється, а значить, ніякої роботи проти зовнішніх сил газ не виконує, тобто  $\Delta A = 0$ . Тоді

$$\Delta Q = \Delta U,$$

тобто *вся теплота, яка надається газу зовні при його ізохоричному нагріві витрачається на збільшення його внутрішньої енергії.*

В координатах  $P - V$  графік процесу буде прямою лінією паралельною  $P$ , причому процес може відбуватись з підвищенням (1-2) і зниженням тиску  $(1 - 2^1)_c$  (Рис. 1.1.а). В координатах  $T - S$  графік зображений на рисунку 1.1.б.

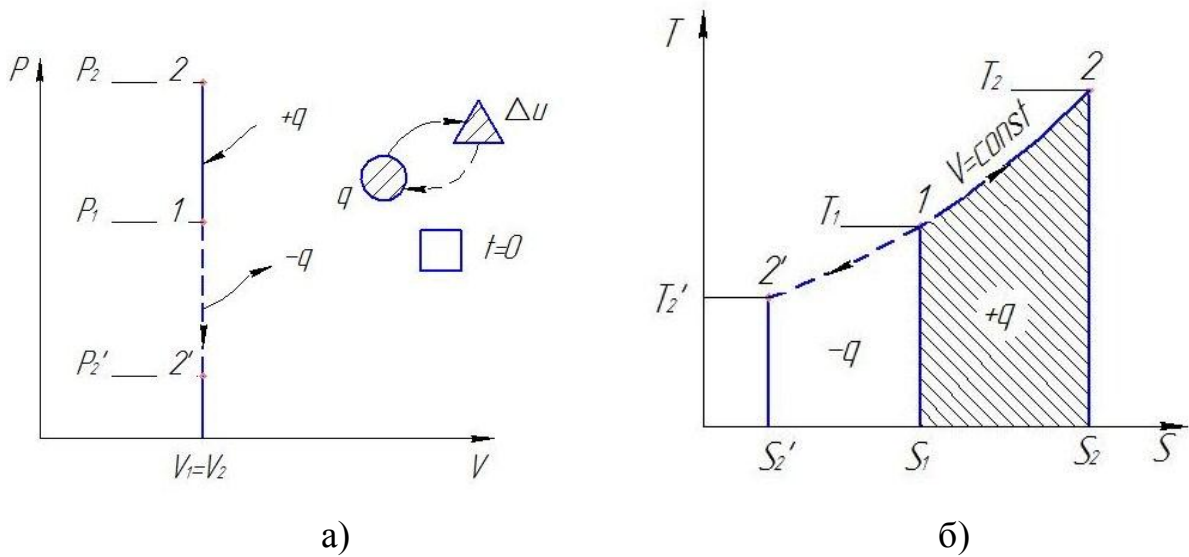


Рис. 1.1. Графік ізохорного процесу  
 а) в  $p - V$ - координатах; б) в  $T - s$ - координатах.

### Ізобарний процес ( $P = \text{const}$ ).

Підрахуємо роботу при ізобарному розширенні газу. Сила з якою газ давить на поршень в циліндрі дорівнює  $F = PS$ , де  $P$ – тиск в циліндрі, а  $S$ – площа поперечного перетинуциліндра.

При розширенні газу поршень підніметься на висоту  $\Delta h$  і виконає роботу

$$\Delta A = F \cdot \Delta h = PS\Delta h, \text{ але } S\Delta h = \Delta V,$$

тоді

$$\Delta A = P \cdot \Delta V .$$

Отже, *робота при ізобарному розширенні газу дорівнює добутку тиску газу на збільшення його об'єму* В той же час частина тепла витрачається на збільшення внутрішньої енергії газу.

Таким чином, *при ізобарному нагріванні газ розширюється, частина наданого йому тепла йде на збільшення внутрішньої його енергії, а решта на роботу газу проти зовнішніх сил.*

В координатах  $P - V$  ( $P = \text{const}$ ) процес буде зображуватись прямою 1-2 (Рис. 1.2. а). Робота газу чисельно дорівнює заштрихованій площі.

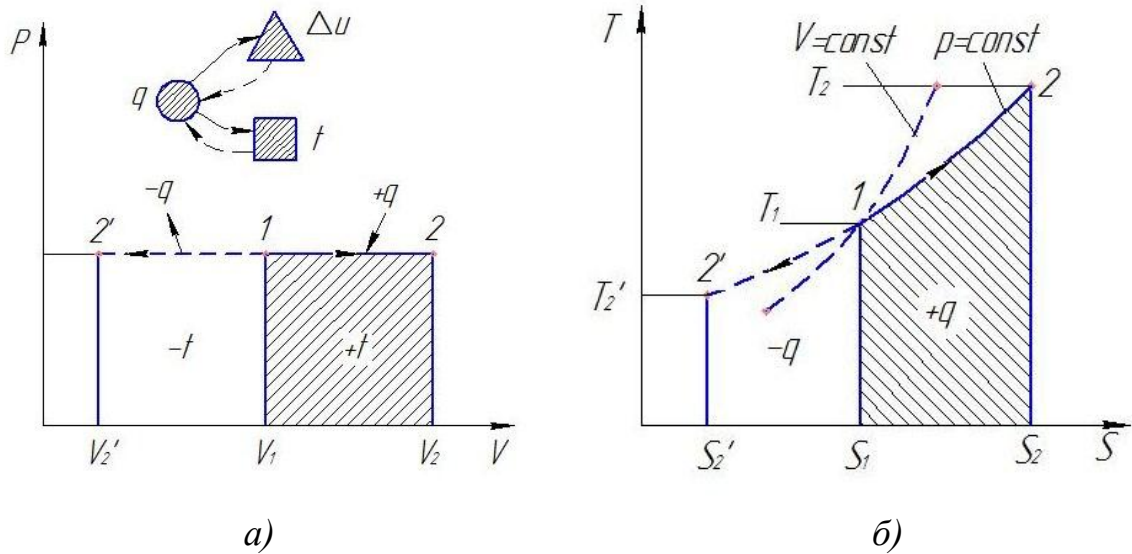


Рис. 1.2. Графік ізобарного процесу:  
 а) в  $p - V$ - координатах; б) в  $T - s$ - координатах.

**Ізотермічний процес** ( $T = \text{const}$ ).

Поскільки  $T = \text{const}$ , то  $\Delta U = 0$ . Тоді рівняння першого закону термодинаміки запишеться так

$$\Delta Q = \Delta A.$$

Отже, при ізотермічному нагріванні вся надана газу теплота витратиться на роботу газу проти зовнішніх сил

$$dA = PdV, \text{ або } dA = \frac{RT}{V} dV.$$

Повна енергія при розширенні газу з  $V_1$ , до  $V_2$  буде

$$A = \int_{V_1}^{V_2} dA = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT(\ln V_2 - \ln V_1),$$

або

$$A = RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

В  $P - V$ -координатах ізотерма зображається гіперболою (Рис. 1.3. а)

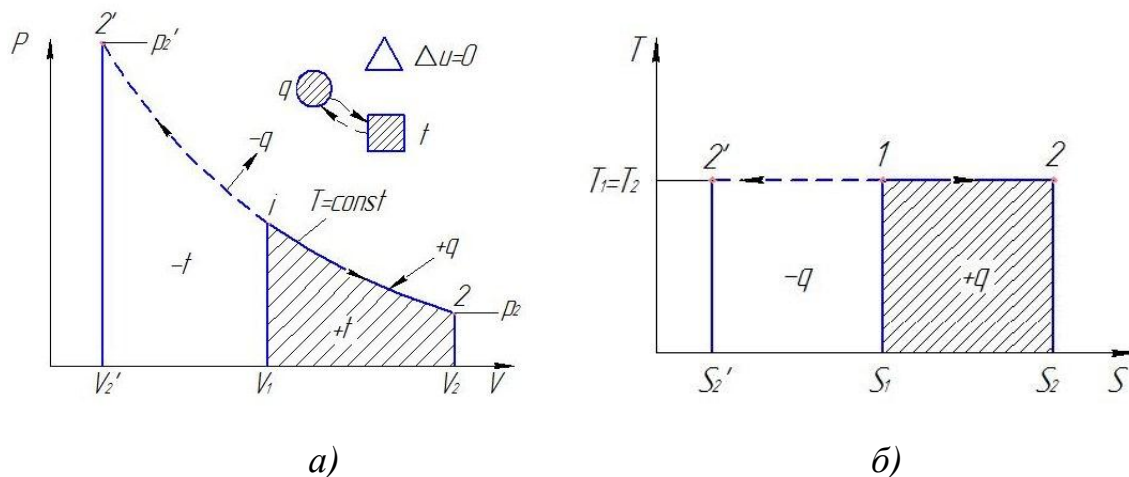


Рис. 1.3. Графік ізотермічного процесу  
 а) в  $p - V$  – координатах; б) в  $T - s$  – координатах.

### **Адіабатичний процес.**

Адіабатичним називається процес, при якому робоче тіло не обмінюється теплом з навколишнім середовищем. Він відбувається так ніби газ оточений абсолютно нетеплопровідною оболонкою. Перший закон термодинаміки тоді запишеться так:

$$\Delta U + \Delta A = 0, \text{ або } \Delta A = -\Delta U,$$

тобто *робота при адіабатичному процесі відбувається тільки за рахунок внутрішньої енергії*.

При розширенні газ здійснює роботу проти зовнішніх сил і охолоджується, втрачаючи свою внутрішню енергію. При стискуванні зовнішні сили здійснюють роботу, викликаючи нагрівання газу, тобто збільшення його внутрішньої енергії.

Процеси стискування і розширення газу, які відбуваються швидко, можна наближено вважати адіабатичними, оскільки за короткий час тепло не встигає відводитись із об'єму, що розглядається. Виходячи з цього, близьким до адіабатичного можна вважати процес стискування газу в дизельних двигунах. При першому такті роботи дизельного двигуна повітря всмоктується в циліндр, при другому такті повітря стискується і так швидко нагрівається, що вприснуте при третьому такті паливо загоряється. Оскільки

стискування в циліндрі дизельного двигуна відбувається дуже швидко, то нехтуючи втратами теплоти за цей короткий час через стінки циліндра, цей процес можна вважати адіабатичним.

В  $P - V$ -координатах адіабата зображається нерівнобічною гіперболою (Рис. 1.4. а), яка проходить дещо крутіше ізотерми.

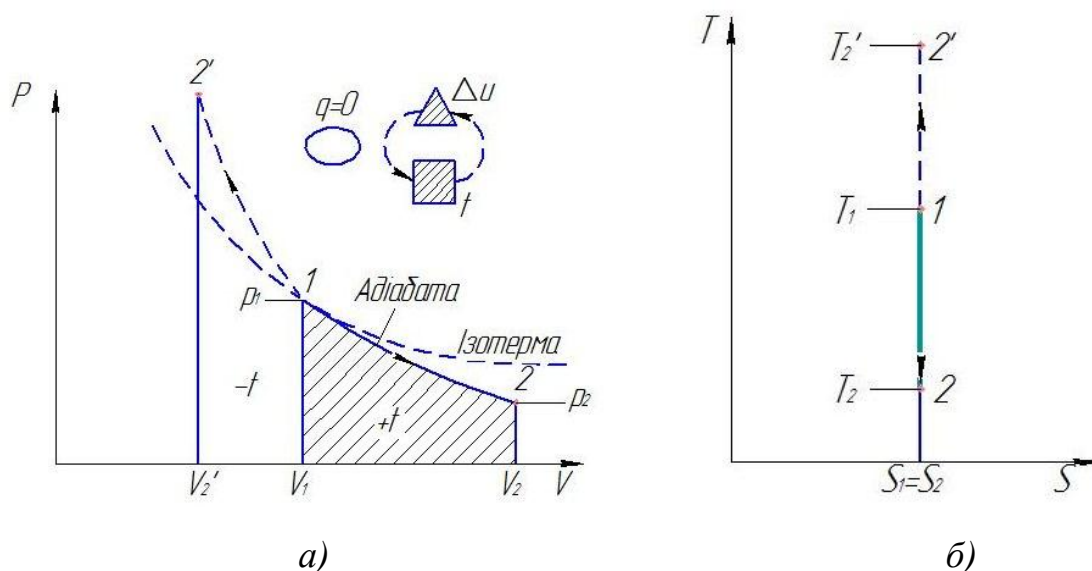


Рис. 1.4. Графік адіабатичного процесу  
а) – в  $P - V$ -координатах; б) – в  $T - s$ -координатах.

Пуассоном для адіабатичного процесу встановлена така залежність  $PV^\gamma = const$ , яка називається рівнянням Пуассона,  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ .

### Політропний процес

Політропним називається процес в якому питома теплоємність газу постійна.

Величина  $n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$  називається показником політропи. Політропний процес є узагальнюючим. Розглянуті вище процеси є окремими його випадками.

Дійсно, з рівняння політропи  $PV^n = const$  при різних  $n$  маємо :

$n = 0$ ;  $PV^0 = P = const$  – ізобарний процес;

$n = \pm\infty$ ;  $V = const$  – ізохорний процес;

$n = 1$ ;  $PV = const$  – ізотермічний процес;

$n = k$ ;  $PV^k = const$  – адіабатичний процес.



Щоб прослідкувати за розташуванням політропних процесів при різних значеннях  $n$  в  $P - V$  і  $T - S$  – координатах, на діаграмах наносять криві окремих процесів. По них можна визначити відносно розташування політроп при різних  $n$ , а також знайти знак  $q$  і  $\Delta u$  в цих процесах

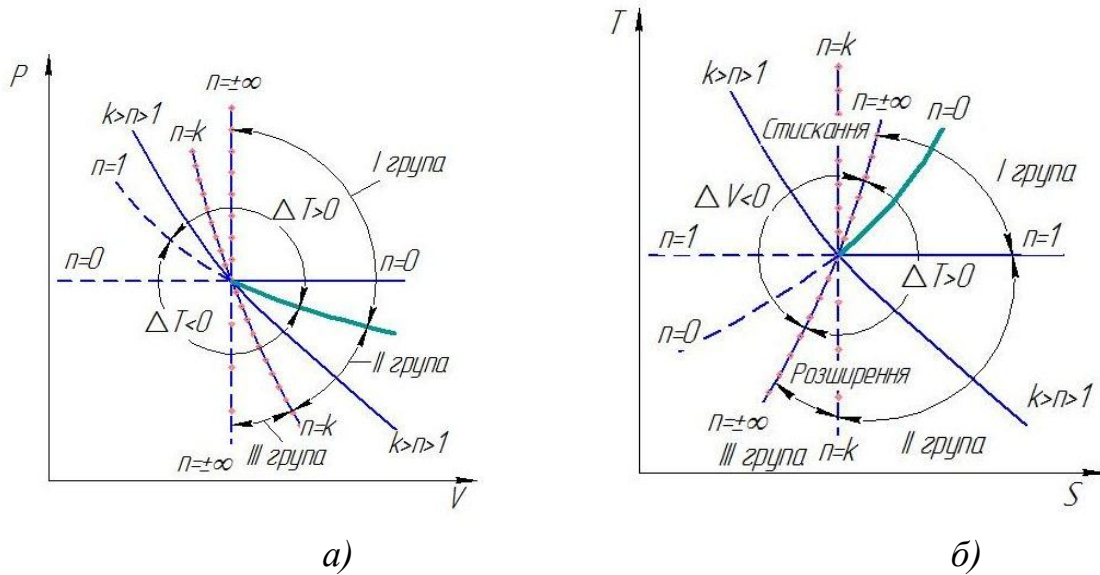


Рис. 1.5. Сумісний графік часткових випадків політропного процесу:  
 а) – в  $p - V$ – координатах; б) – в  $T - s$ – координатах – - - - - процеси з підводом теплоти; - - - - процеси з відводом теплоти; -°-°-°- процеси з  $q=0$  ( $dq=0$ )).

Графік залежності теплоємності  $C$  ідеального газу в політропному процесі від показника політропи  $n$  зображена на Рис. 1.6.

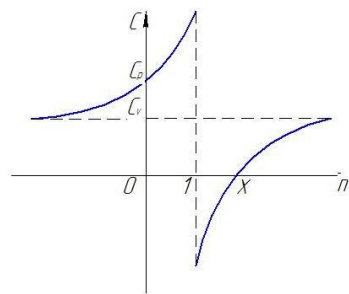


Рис. 1.6. Графік залежності  $C$  від  $n$

В таблиці 1.1. приведені основні співвідношення для рівноважних ізохорного, ізобарного, ізотермічного, адіабатного і політропного процесів, які здійснюються ідеальним газом, маса яких вважається незмінною,

теплоємності  $C_v$  і  $C_p$  не залежать від температури, а робота відбувається проти зовнішніх сил.

В цій таблиці індекси 1 і 2 відповідають початковому і кінцевому станам; в формулах всі величини виражені в одиницях однієї і тієї ж системи.

Таблиця 1.1.

Найпростіші термодинамічні процеси

Назва процесу	Рівняння процесу	Зв'язок між параметрами стану	Робота в процесі	Тепло, надане в процесі
Ізохорний	$V = \text{const}$	$\frac{P}{T} = \text{const}$	$\delta A = 0$ $A = 0$	$\delta Q = C_v dT$ $Q = C_v(T_2 - T_1)$
Ізобарний	$p = \text{const}$	$\frac{V}{T} = \text{const}$	$\delta A = p dV$ $A = p(V_2 - V_1)$	$\delta Q = C_p dT$ $Q = C_p(T_2 - T_1)$
Ізотермічний	$T = \text{const}$	$pV = \text{const}$	$\delta A = p dV$ $A = \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} =$ $= \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\delta Q = \delta A$ $Q = A$
Адіабатичний	$\delta Q = 0$	$pV^x = \text{const}$ $pT^{\frac{x}{1-x}} = \text{const}$ $VT^{\frac{1}{x-1}} = \text{const}$	$\delta A = p dV = -dU$ $A = -\Delta U = C_v(T_1 - T_2) =$ $= \frac{1}{x-1}(p_1 V_1 - p_2 V_2)$ $A = \frac{M}{\mu} \frac{RT_1}{x-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} \right] =$ $= \frac{p_1 V_1}{x-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1-x} \right]$	$\delta Q = 0$ $Q = 0$
Політропний	$C = \text{const}$	$pV^n = \text{const}$ $pT^{\frac{n}{1-n}} = \text{const}$ $VT^{\frac{1}{n-1}} = \text{const}$	$\delta A = p dV$ $A = \frac{1}{n-1}(p_1 V_1 - p_2 V_2)$ $A = \frac{M}{\mu} \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] =$ $= \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{1-n} \right]$	$\delta Q = C dT$ $Q = C(T_2 - T_1)$

Назва процесу	Зміна внутрішньої енергії	Зміна ентальпії	Теплоємність	Показник політропи
Ізохорний	$dU = C_v dT$ $\Delta U = C_v(T_2 - T_1)$	$dH = dU + V dp = C_p dT$ $\Delta H = C_p(T_2 - T_1)$	$C_v = \frac{M}{\mu} \frac{R}{x-1}$	$n = \pm \infty$

Ізобарний	$dU=C_V dT$ $\Delta U=C_V(T_2 - T_1)$	$dH=dU+pdV= \delta Q$ $\Delta H=\Delta U+A=Q$	$C_p = \frac{M}{\mu} \frac{xR}{x-1}$	$n=0$
Ізотермічний	$dU=0$ $\Delta U=0$	$dU=0$ $\Delta U=0$	$C_T = \begin{cases} +\infty \text{ при } dV > 0 \\ -\infty \text{ при } dV < 0 \end{cases}$	$n=1$
Адіабатичний	$dU=C_V dT = -\delta A$ $\Delta U = -A = C_V(T_2 - T_1)$	$dH=C_p dT = -x \delta A$ $\Delta H = -xA =$ $= C_p(T_2 - T_1)$	$C_p = 0$	$n=d=\frac{C_p}{C_V}$
Політропний	$dU=C_V dT$ $\Delta U=C_V(T_2 - T_1)$	$dH=C_p dT$ $\Delta H= C_p(T_2 - T_1)$	$C$ $= \frac{M}{\mu} \frac{R(n-x)}{(x-1)(n-1)}$	$n=\frac{C-C_p}{C-C_V}$

## 1.6 Кругові процеси

Нехай стиснутий газ, який знаходиться в циліндрі, має тиск  $P_1$  і займає об'єм  $V_1$ . Його стан на графіку з координатними осями  $PV$  відповідає точці 1 (Рис. 1.7.). При розширенні газу його об'єм зросте до значення  $V_2$ , а тиск зменшиться до  $P_2$  кінцевий стан газу відповідає точці 2. Позначимо початкову температуру газу  $T_1$ , а кінцеву  $T_2$ .

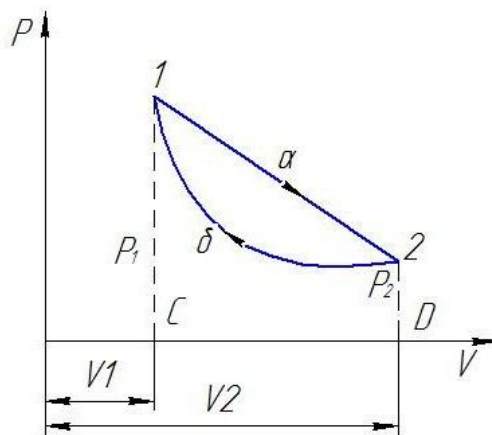


Рис.1.7. Графік кругового процесу

Робота  $A_1$  виконана при розширенні газу, могла здійснюватись внаслідок надання йому деякої теплоти  $Q_1$  із зовні, або в результаті зменшення його внутрішньої енергії  $\Delta U = U_2 - U_1$ , де  $U_1$  — внутрішня енергія газу в початковому стані, а  $U_2$  — в кінцевому стані, або внаслідок двох цих причин разом. Тоді, виходячи з першого закону термодинаміки

$$Q_1 = (U_2 - U_1) + A_1.$$

Роботу  $A_1$  можна знайти з графіку як площа фігури  $C1$  а  $2D$ .

Почнемо стискувати газ і повернемо його в початковий стан таким чином, щоб він знову зайняв об'єм  $V_1$ , а його тиск –  $P_1$ . За формулою Клайперона – Менделєєва  $PV = RT$  виходить, якщо об'єм і тиск газу зберегли початкове значення, то і температура його залишиться  $T_1$ , інакше кажучи, внутрішня енергія газу знову стане рівно  $U_1$ .

Якщо процес стискування буде відбуватись при більш низьких температурах, ніж процес розширення, то крива  $2b1$ , яка характеризує стискання газу, розташується нижче кривої  $1a2$ , яка зображає процес розширення. При стисканні зовнішні сили виконують роботу  $A_2$ , частина якої може бути передана зовнішнім тілам у вигляді деякої теплоти  $Q_2$ , частина ж піде на збільшення внутрішньої енергії газу ( $U_1 - U_2$ ), тобто

$$A_2 = (U_1 - U_2) + Q_2.$$

Весь процес зобразиться кривою  $1a2b1$ . Він називається *круговим процесом*, або *циклом*.

Всю роботу, яку виконав газ проти зовнішніх сил в циклі, можна знайти віднявши від  $A_1 - A_2$

$$\Delta A = A_1 - A_2 = Q_1 - (U_2 - U_1) - Q_2 - (U_1 - U_2);$$

$$\text{поскілки } (U_2 - U_1) = -(U_1 - U_2), \text{ то } \Delta A = A_1 - A_2 = Q_1 - Q_2.$$

Ця робота була виконана внаслідок того, що  $Q_1 > Q_2$ , тобто за рахунок різниці ( $Q_1 - Q_2$ ). Цикл такого роду має назву *прямого*, а процес, що характеризується таким циклом, застосовується в *теплових машинах*. В них робоче тіло (газ або пара) отримує від нагрівника теплоту  $Q_1$ , а віддає холодильнику –  $Q_2$ . Відношення

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

показує, яка частина отриманої від нагрівача теплоти перетворена в роботу, і називається *коефіцієнтом корисної дії теплової машини*.

Якщо при круговому процесі газ, розширюючись, здійснює роботу проти зовнішніх сил, меншу тієї роботи, яку виконують зовнішні сили при його стисканні, тобто  $A_1 < A_2$ , то такий цикл має назву **зворотного**.

Машина, які працюють, по зворотному циклу, називаються **холодильниками**.

В холодильних машинах розширення газу відбувається при більш низькій температурі, ніж стискання. Тому машина відбирає від більш холодного тіла деяку теплоту  $Q_1$  і передає більш нагрітому теплоту  $Q_2$ , що викликає подальше охолодження більш холодного тіла. *Цей процес переносу теплоти від холодного тіла до більш гарячого потребує витрати роботи зовнішніх сил ( $A_2 - A_1$ ).*

### **1.7 Другий закон термодинаміки**

В попередньому параграфі було з'ясовано, що

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

коефіцієнт корисної дії теплової машини, яка отримує від нагрівника теплоту  $Q_1$  і частину її  $Q_2$  віддає холодильнику, виконує роботу за рахунок теплоти  $Q_1 - Q_2$ .

Найкращою була б така тепла машина, в якій  $\eta = 1$ , тобто всю отриману теплоту перетворювала в роботу, нічого не віддаючи холодильнику. Численні досліди показали неможливість створення такої машини.

Французький вчений Саді Карно в 1824 році вперше зробив такий висновок, в подальшому (1850р.) Клазійус і Кельвін (1852р.) підтвердили його. Було встановлено, що *неможливо здійснити такий періодично діючий процес, єдиним наслідком якого було б повне перетворення в роботу теплоти отриманої від нагрівника*. Це положення отримало назву **другий початок термодинаміки (другий закон термодинаміки)**.

Двигун, який мав би коефіцієнт корисної дії 100%, називається *вічним двигуном другого роду*.

Другий початок термодинаміки говорить про те, що *вічний двигун другого роду побудувати неможливо*.

Вільям Томсон другий закон термодинаміки сформулював так: «Неможливий циклічний процес, єдиним результатом якого було б виконання роботи за рахунок охолодження теплового резервуара».

Аналогічне формулювання закону дав Планк «Неможливо побудувати періодично діючу машину, єдиним результатом якої було б підняття вантажу за рахунок охолодження теплового резервуара».

Більшість формулювань другого закону термодинаміки, які відображають властивість теплоти, спирається на практичний досвід, хоча наслідки, які витікають з нього виходять далеко за межі теорії теплових двигунів.

Другий закон термодинаміки узагальнює особливості теплоти як форми передачі енергії, виявлені при макрофізичному підході до явищ природи. Він виражає закон про існування ентропії і визначає закономірності її зміни при протіканні оборотних і необоротних процесів в ізольованих системах.

В загальному вигляді другий закон термодинаміки стосується питання, що зв'язані з спрямованістю теплових процесів. Всі природні самовільні процеси полягають в самовільному переході теплоти від більш нагрітих тіл до менш нагрітих. Зворотний перехід можливий тільки при допомозі витрати (компенсації) енергії із зовні.

## **1.8 Цикл Карно**

Розглянемо тепер круговий процес, в результаті якого тепло, відібране від якогось тіла, можна перетворити в роботу, і притому якнайкраще, тобто так, щоб робота була максимально можливою.

Щоб здійснити цей процес, потрібно мати три тіла: джерело тепла, від якого тепло відбирається (нагівник); холодніше тіло, якому передається

тепло (холодильник); і робоче тіло, через яке передається тепло і виконується сама робота (пара чи газ). Будемо вважати ще, для простоти міркування, що нагрівник і холодильник мають таку велику теплоємність, що їх температура не змінюється від того, що від першого відбирається, а другому передається певна кількість тепла. Побачимо як у таких умовах робоче тіло дійсно виконає роботу за рахунок тепла, відданого нагрівником.

Почнемо такий круговий процес над робочим тілом з того, що воно, стиснуте до певного тиску, перебуває в контакті з нагрівачем і, отже, має таку саму, як і він температуру (точка 1 на Рис. 1.8.). Процес теплопровідності при цьому не відбувається, бо немає різниці температур.

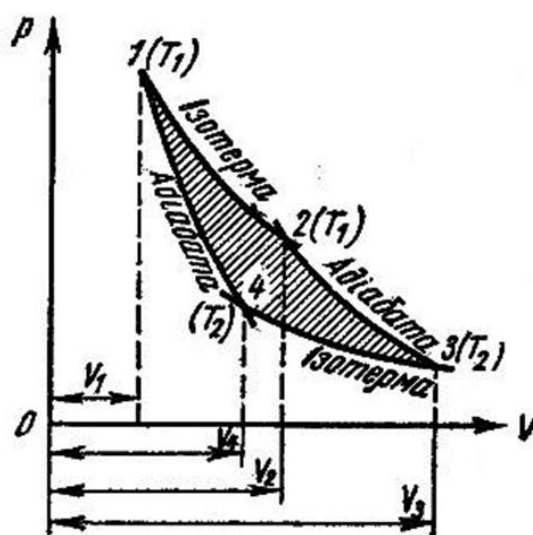


Рис. 1.8. Круговий процес Карно

Отже, не відбувається і передача тепла без виконання роботи. Оскільки завданням є мати максимальну роботу, ми не повинні допускати в циклі таких процесів.

Дамо тепер робочому тілу можливість розширитися, тобто здійснити переміщення якогось тіла, не припиняючи його контакту з нагрівником. Отже, розширення буде ізотермічне (крива 1-2 на рисунку). При цьому буде виконана робота. Вона виконується теплом, відібраним від нагрівника, який, однак, завдяки своїй великій теплоємності не змінює своєї температури.

Здобуте робочим тілом тепло тепер треба передати холодильнику. Цю передачу теж не слід здійснювати прямим стиканням робочого тіла з

холодильником, бо температура ізотермічно розширеного робочого тіла вища за температуру холодильника і передавання тепла при контакті не супроводжується виконанням корисної роботи. Тому робоче тіло спочатку треба охолодити до температури холодильника і тільки після цього їх можна привести в стикання між собою. А для охолодження робочого тіла його треба ізолювати від нагрівника, а потім йому треба дати можливість адіабатично розширюватись (крива 2-3 на малюнку) доти, поки воно не набуде температури холодильника (при адіабатичному розширенні тіла охолоджуються). На цьому другому етапі тіло, розширяючись і переміщуючи, наприклад поршень, додатково виконує роботу. Після досягнутого таким чином охолодження робочого тіла його приводять у контакт з холодильником. На цьому закінчується перша половина циклу, під час якої тіло виконало корисну роботу теплом, здобутим від нагрівника. Щоб не переривати думку цю роботу підрахує пізніше.

Тепер треба вернути робоче тіло в початковий стан, тобто відновити початкові тиск і температуру. Це означає що робоче тіло треба стиснути і привести знову в контакт з нагрівником. Цей контакт, як і раніше, не слід здійснювати поки температура робочого тіла нижча за температуру нагрівника. Тому повернення до початкового стану теж здійснюється двома етапами. Спочатку робоче тіло стискають, не порушуючи його контакту з холодильником, тобто ізотермічно (крива 3-4). Потім, ізолювавши робоче тіло від холодильника, його додатково стискають адіабатно, так щоб воно нагрівалося до температури нагрівача (крива 4-1). При адіабатному стисканні тіло нагрівається від зовнішньої роботи, яка здійснюється над ним. Після того, як у процесі адіабатного стиснення температура робочого тіла дорівнюватиме температурі нагрівника, їх приводять у контакт, і цикл на цьому завершується.

Описаний круговий процес складається, таким чином, з двох ізотермічних і двох адіабатичних розширень і стиснень. При розширеннях



робоче тіло виконує корисну роботу: стиснення, навпаки, відбувається в результаті роботи, яка здійснюється над робочим тілом зовнішніми силами.

На всіх стадіях розглянутого кругового процесу ніде не допускається стикання двох тіл з різними температурами, і, таким чином, не може виникнути необоротний процес теплопровідності. Отже, весь цикл проводиться оборотно, (для повної оборотності самі розширення стискання треба проводити дуже повільно, в принципі нескінченно повільно, так щоб ці процеси були квазістатичними).

Описаний цикл, здійснюваний робочим тілом має назву *циклу Карно*, за ім'ям французького вченого, який уперше його розглянув.

У результаті кругового процесу Карно деяка кількість тепла передається через робоче тіло від нагрівника до холодильника. Під час процесу робоче тіло здійснює, крім того, певну роботу. В свою чергу над робочим тілом здійснюють роботу зовнішні сили. Чи здійснюється при цьому корисна механічна робота, тобто чи досягається мета всього процесу?

На перший погляд здається, що робота робочого тіла при його розширенні на перших двох стадіях циклу повністю компенсується роботою, здійсненою зовнішніми силами у наступних двох стадіях, так що корисна робота в кінцевому підсумку дорівнює нулю. Проте в дійсності не важко переконатися, що позитивна робота, яку виконує тіло при його розширенні, більша, ніж негативна робота, яка виконується над ним при його стисканні і що частина тепла, здобута від нагрівника, перетворюється в механічну роботу.

Найпростіше в цьому можна переконатися у випадку, коли робочим тілом є ідеальний газ, для якого можна точно обчислити роботу розширення і стискання. Як побачимо, висновки, які дістанемо при цьому, не залежать від природи робочого тіла, тобто справедливі для будь-якого тіла. Тому розглянемо кількісно увесь цикл Карно, коли робочим тілом є ідеальний газ.

Нехай робочим тілом є один моль ідеального газу, а вихідний стан характеризується тиском  $P_1$  і об'ємом  $V_1$ , тобто точка 1 (на малюнку).

Температура газу  $T_1 = \frac{P_1 V_1}{R}$  за нашою умовою дорівнює температурі нагрівника. Температуру холодильника позначимо через  $T_2$ . Отже,  $T_1 > T_2$ .

У початковому стані робоче тіло контактує з нагрівником. Перша стадія кругового процесу, який здійснює газ – це ізотермічне розширення (зберігається контакт з нагрівником) до об'єму  $V_1$ . Відповідно тиск спадає по ізотермі до значення  $P_1$  (точка 2).

Позитивна робота, яку виконує газ при розширенні, дорівнює:

$$A_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1$$

де  $Q_1$  – кількість тепла, відібрана газом від нагрівника. Це тепло і виконує роботу  $A_1$ .

Друга стадія полягає в тому, що газ ізолюється від нагрівача і далі його розширення відбувається адіабатично, внаслідок чого газ охолоджується. Це адіабатичне розширення припиняють, коли температура газу дорівнюватиме температурі холодильника  $T_2$ . Значення об'єму, до якого повинен розширитися газ, можна визначити, враховуючи, що при адіабатичному розширенні справедлива рівність:

$$V_2 T_1^{\gamma-1} = V_3 T_2^{\gamma-1}, \text{ звідки } V_3 = V_2 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma-1},$$

$$\text{де } \gamma = \frac{c_p}{c_v}.$$

Тиск при цьому змінюється по адіабаті до значення  $P_2$  (точка 2).

Робота, яку виконує газ на цій, другій, стадії процесу, дорівнює  $A_2 = \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}$ .

Таким чином, вся позитивна робота, яку виконує газ при його розширенні, дорівнює:

$$A_1 + A_2 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1}.$$

На третьому етапі процесу газ ізотермічно стискається зовнішніми силами при температурі холодильника  $T_2$  від об'єму  $V_3$  до об'єму  $V_4$ . Затрачена на стискання робота

$$A_3 = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = Q_2$$

виділяється у вигляді тепла і передається холодильнику.

Нарешті, остання зміна, якої зазнає газ, щоб повернутися до початкового стану – це адіабатичне стиснення до початкового об'єму  $V_1$  і тиску  $P_1$ , при яких його температура знову дорівнювати  $T_1$ .

Для цього потрібно, щоб об'єм  $V_{\text{сер}}$ , до якого ізотермічно стиснули газ, дорівнював:

$$U_{\text{сер}} = U_1 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma-1},$$

бо як і раніше  $V_4 T_2^{\gamma-1} = V_1 T_1^{\gamma-1}$ .

Робота стискання на цьому останньому етапі циклу, яку виконують зовнішні сили, дорівнює:

$$A_4 = \frac{R(T_2 - T_1)}{\gamma - 1}.$$

Газ тепер знову в початковому стані, цикл Карно завершений, і процес можна почати знову. Загальна робота, яку виконав газ (з урахуванням знаків), дорівнює:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1} - RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} - \frac{R(T_2 - T_1)}{\gamma - 1}.$$

Якщо позначити  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} = \rho$ ,

то  $A = R(T_1 - T_2) \ln \rho$

і через те що  $T_1 > T_2$  то  $A > 0$ . Отже, робота, яку виконав газ при розширенні, перевищує роботу зовнішніх сил, затрачену на його стиснення. Тепло, що його дістало робоче тіло від нагрівача, здійснило, таким чином, певну корисну роботу  $A$ . Проте ця робота не дорівнює тій кількості тепла  $Q$ , яку робоче тіло дістало від нагрівника.

З відданої нагрівником кількості теплоти

$$Q_1 = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

частина, яка дорівнює

$$Q_2 = RT_2 l_n \frac{V_4}{V_3},$$

була передана холодильнику при ізотермічному стисненні газу від об'єму  $V_3$  до об'єму  $V_4$  (газ у цей час був у контакті з холодильником). У корисну роботу вдалось, таким чином, перетворити лише частину здобутого тепла, яка дорівнює:

$$Q_1 - Q_2 = R(T_1 - T_2) l_n \rho = A.$$

Робота  $A$  графічно визначається площею, яка обмежується кривою 1-2-3-4 (на малюнку заштрихована).

Цим процес перетворення тепла в роботу відрізняється від зворотного процесу перетворення роботи в тепло. *Механічна робота в певних умовах може бути цілком перетворена в тепло. Тепло тільки частково перетворюється в роботу.*

Зауважимо тут, що з попередніх рівнянь можна вивести дуже важливе співвідношення

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{A}{T_1 - T_2}.$$

Знайдемо **коефіцієнт корисної дії циклу Карно**.

Наведений аналіз кругового процесу Карно показує, що з його допомогою не можна повністю перетворити відібране від нагрівника тепло в механічну енергію. Частина його неодмінно повинна бути передана холодильнику – тілу з нижчою, ніж у нагрівника, температурою.

Якщо кількість тепла, яку робоче тіло дістало від нагрівника  $Q_1$ , а в роботу переведено частину  $Q_1 - Q_2$  цього тепла, то відношення

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

є коефіцієнтом корисної дії для кругового процесу (точніше машини, яка працює за цим процесом). Як це видно з попереднього виразу, коефіцієнт корисної дії  $\eta$  циклу Карно визначається рівністю

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Отже, коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) завжди менший від одиниці і залежить від співвідношення між температурами нагрівника і холодильника. Розглянутий цикл Карно на всіх етапах був проведений так, що ніде не було дотику тіл з різними температурами, а це виключає можливість необоротних процесів теплопровідності. Об'єм робочого тіла теж змінювався шляхом, що забезпечує максимум роботи, яка при цьому здійснюється. Це означає, що були забезпечені найкращі умови для використання теплової енергії. А тому вищий к. к. д., ніж у зазначеній вище формулі, отримати принципово не можна. *Теплова машина, яка працює при даних значеннях температур нагрівника і холодильника, не може мати к.к.д. більший, ніж машина, що працює за циклом Карно при тих самих значеннях температур нагрівника і холодильника(це твердження називають **першою теоремою Карно**).*

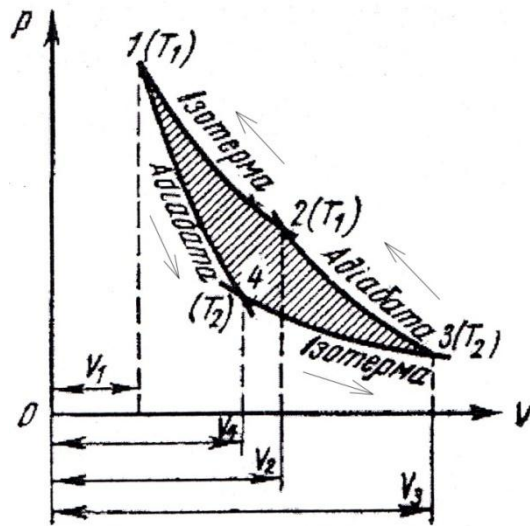
З формули, що виражає к.к.д. видно, що к.к.д. циклу Карно не залежить від роду робочого тіла, а тільки від температур нагрівника і холодильника ( $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ ). Це твердження називають **другою теоремою Карно**.

В розрахунках, як робоче тіло, брали ідеальний газ тільки тому, що для нього точно відоме рівняння стану, що і дало можливість обчислити величину к.к.д.

### 1.9 Обернений цикл Карно

Цикл Карно характеризується тим, що коли його провести в зворотному напрямі, то тіло, яке бере участь у процесі, пройде через ті самі стани, але в зворотному порядку. При цьому не від нагрівника до холодильника, а навпаки – від холодильника до нагрівника.

Обернений цикл Карно починається з того, що робоче тіло, яке перебуває, наприклад, у стані, що відповідає точці 1 (Рис.1.9.), адіабатно розширюється до стану, що відповідає точці 4. Далі йде ізотермічне розширення до стану 3.



Мал. 1.9. Графік оберненого циклу Карно

На цих перших двох стадіях циклу робоче тіло, розширюючись виконує роботу. У другій половині циклу – вздовж адіабати 3-2 і адіабати 2-1 робоче тіло стискається, і робота стиснення виконується над тілом зовнішнім джерелом енергії. Як було щойно показано, ця робота перевищує роботу, виконану самим тілом у першій половині циклу. Тому результатом оберненого циклу Карно буде не зовнішня корисна робота, а перенесення тепла від холодильника до нагрівача, тобто від менш нагрітого тіла до більш нагрітого. Отже, робоче тіло при зворотному процесі Карно проходить через ті самі проміжні стани, що й при прямому, але в зворотному порядку.

Якщо установка, яка працює за прямим циклом Карно, призначена для перетворення тепла в механічну роботу, тобто є тепловий двигун, то машина, яка діє за зворотним циклом Карно, використовується для передавання тепла від менш нагрітого тіла, до більш нагрітого, тобто є **холодильною машиною**. З її допомогою внаслідок зовнішньої механічної роботи тепло відбирається від більш холодного тіла і передається тілу з більш високою температурою.

Тепер можна точніше сформулювати теореми Карно: *к.к.д. теплової машини, яка працює при даних значеннях температур нагрівника і холодильника, не може бути більшим, ніж к.к.д. машини, яка працює за*

циклом Карно при тих самих значеннях температур нагрівника і холодильника.

При розгляді циклу Карно треба також звернути увагу на те, що внутрішню енергію системи не завжди можна використати для перетворення в механічну роботу. Треба відрізнити загальну енергію, яку має тіло або система тіл, від тієї частини, яку в даних умовах можна використати для отримання роботи. *Та частина енергії системи, яку в даних умовах можна використати для перетворення в механічну роботу, називається вільною енергією.* Отже, система не може виконати роботу, яка перевищує значення її вільної енергії.

Так внутрішня енергія ідеального газу не залежить від того об'єму, який він займає; один моль газу, стиснутий у балоні, має таку саму внутрішню енергію, як і не стиснутий газ при тій самій температурі. Але стиснутий газ має більшу вільну енергію тому, що він при ізотермічному розширенні може виконати більшу роботу. Отже, вільна енергія є функцією стану газу.

Треба звернути також увагу на те, що кількість тепла  $Q_1$  передана тілу від нагрівника при температурі  $T_1$  і  $Q_2$ , яку тіло передало холодильнику при температурі  $T_2$ , не дорівнюють одна одній, то відношення цих теплот до тих температур, при яких вони були ввібрані або віддані, чисельно рівні між собою,

$$\left| \frac{Q_1}{T_1} \right| = \left| \frac{Q_2}{T_2} \right|$$

Відношення  $\frac{Q}{T}$  іноді називають зведеною теплотою. Ця особливість дає можливість ввести особливу термодинамічну величину – ентропія, яка має фундаментальне значення. Вона є функцією стану, і тим значенням, яке вона має в усіх процесах у природі.

Коли система в результаті яких – небудь змін стану оборотним шляхом переходить із стану 1 в стан 2, то сума зведених кількостей теплоти, тобто

величина  $\int_1^2 \frac{dQ}{T}$  не залежить від шляху, по якому відбувається перехід. При процесі, коли початковий і кінцевий стани збігаються, цей інтеграл дорівнює нулю

$$\oint \frac{dQ}{T} = 0.$$

Отже, можна стверджувати, що є якась величина (позначимо її літерою  $S$ ), яка є функцією стану системи, зміна якої  $S_2 - S_1$  при оборотному переході системи від стану 1 до стану 2 дорівнює

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Але завжди можна вибрати певний стан, якому приписується значення  $S$ , що дорівнює нулю, і порівняти з ним всі інші стани. Наприклад, ентропія дорівнює нулю при абсолютному нулі температури. А тому можна вважати, що якраз функція  $S$  дорівнює інтегралу

$$S = \int \frac{dQ}{T}.$$

Зміна ентропії системи, якій надано нескінченно малу кількість тепла  $dQ$  визначається співвідношенням

$$dS = \frac{dQ}{T}.$$

З математичного погляду це рівняння цікаве тим, що величина  $dQ$ , яка не є повним диференціалом, бо  $Q$  не є функцією стану; стан, однак,  $f$  повним диференціалом після ділення на  $T$ . Величина  $\frac{1}{T}$  є, таким чином, інтегруючим множником для  $dQ$ .

Скориставшись рівнянням першого закону термодинаміки ( $dQ = dU + dA$ ), дістанемо:

$$TdS = dU + dA.$$

Цей вираз часто називають **другим законом термодинаміки для оборотних процесів**.



Найважливішою особливістю ентропії і є її поведінка при необоротних процесах, це тим більше важливо, що поняття оборотний процес є ідеалізацією. Адже при оборотному процесі система на будь-якій його стадії повинна перебувати в стані термодинамічної рівноваги. Для встановлення рівноваги потрібний час і тому процес, щоб він був цілком оборотним, повинен відбуватися нескінченно повільно, чого, звичайно, ніколи не буває.

А для необоротних процесів у замкнутих системах ентропія, як показує досвід і теорія, завжди зростає, і ця властивість теж притаманна ентропії, так само, як енергії властиво зберігатись при будь-яких процесах у замкнутих системах.

Саме тому, що енергія має властивість зберігатись у замкнутій системі, вона не може бути функцією, що показує, в якому напрямі йдуть процеси в такій системі; адже при будь-якій зміні стану енергія на початку і в кінці процесу та сама і вона тому не дає можливості відрізнити один від одного початковий і кінцевий стан. А ентропія, яка в природних процесах завжди зростає, дає можливість зробити висновок, який напрям процесу можливий і який ні, який стан є початковим і який кінцевим.

Зростання ентропії в будь – якому процесі триває не безмежно, а лише до певного максимального значення характерного для даної системи. Це максимальне значення ентропії відповідає стану *рівноваги* і після того, як його досягнуть будь – які зміни стану без зовнішнього впливу припиняються.

Таким чином, ентропія як функція стану істотно відрізняється від енергії. В той час як енергію не можна *ні створити, ні знищити, ентропія може створюватись і вона постійно створюється у всякому процесі переходу до рівноваги. Але один раз створена, вона вже не може бути знищена: зворотній процес із зменшенням ентропії відбуватися не може.*

Цей закон зростання ентропії при не оборотних процесах є *змістом другого закону термодинаміки.*

## 1.10 Третій закон термодинаміки

Досліди показують, що із зниженням температури у будь – якій системі спостерігається тенденція до все більшого ступеня впорядкованості.

Можна вважати, що впорядкований стан відповідає меншій енергії частинок, з яких складається тіло, але що встановленому порядку при високих температурах заважає тепловий рух.

Якби можна було охолодити тіло до абсолютного нуля, коли теплові рухи не можуть заважати встановленню порядку, то в системі встановлювався б максимально можливий порядок і цьому стану відповідала б мінімальна ентропія.

Але виникає питання: як поведилося б тіло при абсолютному нулі, якби над ним виконувалась зовнішня робота (наприклад, прикладено тиск)? Чи може змінюватись ентропія тіла, що перебуває при абсолютному нулі?

З багатьох дослідів, що проводились при низьких температурах, можна зробити важливий висновок, який формулюється так: (Нернст, 1960р.): *при абсолютному нулі температури будь-які зміни стану відбуваються без зміни ентропії.*

Це твердження називають *теоремою Нерста*, а також **третім законом термодинаміки**.

З того факту, що при  $T = 0$  і  $S = 0$ , виходить, що *абсолютний нуль температури принципово не можливий.*

Якби існувало тіло з температурою, яка дорівнює нулю, то можна було б побудувати вічний двигун другого роду, що суперечить другому закону термодинаміки.

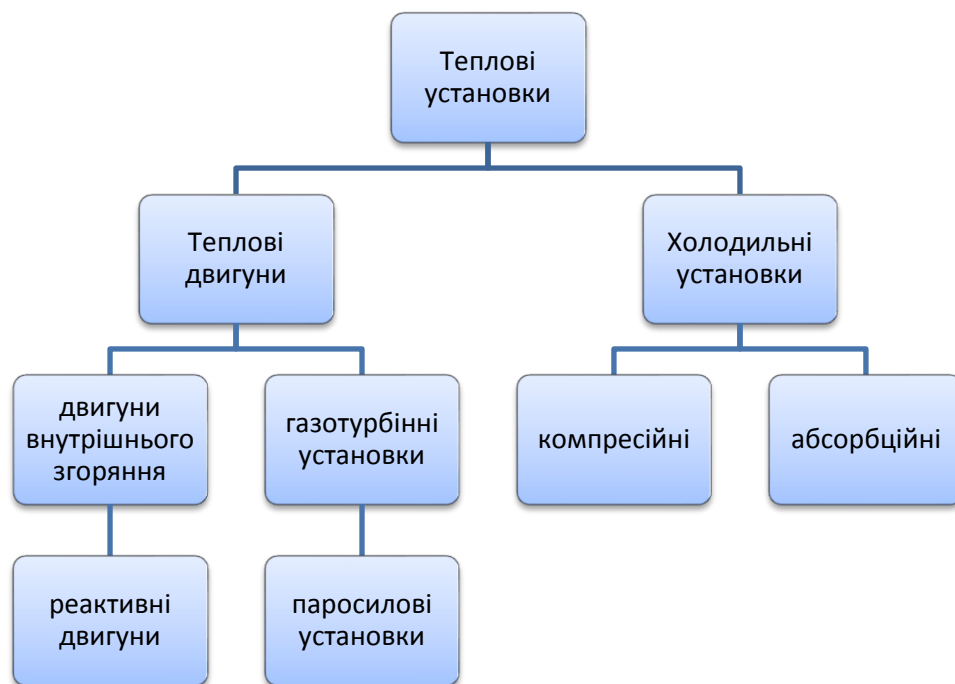
З третього закону термодинаміки випливають важливі висновки про поведінку речовини при дуже низьких температурах. Так, наприклад, з нього випливає висновок, що із зниженням температури теплоємність тіл повинна прямувати до нуля разом з температурою, а при абсолютному нулі вона повинна дорівнювати нулю. Дослід добре підтверджує цю тенденцію.

Можна показати, що повинні прямувати до нуля (а при  $T = 0$  дорівнювати нулю) коефіцієнт теплового розширення тіл, коефіцієнт стисливості і т.п.

### 1.11 Аналіз циклів теплових двигунів

Теплові установки розділяються на *теплові двигуни*, в яких здійснюється прямий цикл (за годинниковою стрілкою), з віддачею роботи зовнішньому споживачу, і на *холодильні установки*, які працюють на зворотному циклі (проти годинникової стрілки) з витратою роботи, яка підводиться із зовні.

Крім того, теплові двигуни можна розділити на такі основні групи: *двигуни внутрішнього згоряння* (д.в.з.), в яких процес підводу тепла (спалювання палива) і перетворення його в роботу відбувається всередині циліндра двигуна; *газотурбінні установки* (г.т.у.) і *реактивні двигуни*, в яких процес спалювання палива також є складовою частиною робочого процесу; *паросилові установки*, де теплота надається робочому тілу в окремому агрегаті – паровому котлі, а перетворення теплоти в роботу в паровій турбіні.



Спільним для циклів теплових двигунів перших двох груп є використання як робочого тіла газоподібних продуктів згоряння палива, які

протягом всього циклу знаходяться в одному і тому ж агрегатному стані і при відносно високих температурах вважається ідеальним газом.

Характерною рисою теплових двигунів з паросиловою установкою є використання таких робочих тіл, які в циклі зазнають агрегатних і фазових змін (рідина, волога пара, перегріта пара) і підпорядковується законом реальних газів.

В реальних теплових двигунах перетворення теплоти в роботу пов'язано з складними необоротними процесами, врахування яких робить термодинамічний аналіз циклів неможливим. В зв'язку з цим для виявлення основних факторів, які впливають на ефективність роботи установок, дійсні процеси замінюють оборотними термодинамічними процесами, які допускають застосування для їх аналізу термодинамічних методів. Такі цикли називають *теоретичними*.

В зв'язку з цим аналіз циклів теплових двигунів проводять в два етапи: спочатку аналізують теоретичний (оборотний), а потім реальний (необоротний) з урахуванням основних джерел необоротності.

Ступінь досконалості теоретичних циклів повністю характеризується величиною термічного к.к.д.  $\eta_t$ , який враховує тільки неминучу термодинамічну втрату  $q_2$ :

$$\eta_t = \frac{l_0}{g_1} = \frac{q_1 - q_2}{g_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Ефективність реального необоротного циклу оцінюється внутрішнім к.к.д.

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_1},$$

де  $l_i$  – дійсна робота в необоротному циклі.

Для визначення ступеня необоротності циклу використовують поняття *відносного внутрішнього к.к.д.*, який є відношенням роботи  $l_i$  до теоретичної  $l_0$

$$\eta_{bi} = \frac{l_i}{l_0}.$$

і показує, наскільки реальний цикл менш досконаліший, ніж теоретичний. Легко побачити, що

$$\eta_i = \eta_t \cdot \eta_{bi}.$$

Крім необоротних втрат, які враховуються внутрішнім к.к.д., в теплосиловій установці є ряд інших втрат (втрати теплоти в навколишнє середовище в камерах згоряння і паропроводах, втрати на тертя в підшипниках, втрати в генераторах і т.д.). Тому робота, що передається зовнішньому споживачу  $l_l$ , менше роботи, яка отримана в циклі  $l_i$ .

Відношення дійсної корисної роботи  $l_l$ , що віддається споживачу, до кількості витраченої теплоти  $q_1$ , називається ефективним к.к.д. установки:

$$\eta_e = \frac{l_l}{q_1}$$

Таким чином, ефективний к.к.д. характеризує долю використаної теплоти з урахуванням всіх втрат і, як наслідок, економічність установки в цілому.

Варто звернути увагу на те, що в реальних (необоротних) циклах теплових двигунів спостерігається необоротність двох видів: викликані наявністю тертя і завихрення в потоці робочого тіла (внутрішня) і обумовлені наявністю кінцевої різниці температур в процесах підведення і відведення теплоти (зовнішня).

Оцінка ефективності циклів двигунів методом к.к.д., враховує втрати, обумовлені тільки внутрішньою необоротністю циклу, але не враховує втрати, обумовлені кінцевою різницею температур в процесах теплообміну.

Зовнішня необоротність приводить до втрати роботоздатності теплоти, тобто до недовикористання її температурного рівня, який у випадку термодинамічно більш досконалої організації процесу підведення і відведення теплоти дозволив би отримувати більшу роботу.

В теплосилових установках найбільша зовнішня необоротність має місце в процесах підведення теплоти від зовнішнього джерела до робочого тіла, температура якого, як правило, значно менше температури джерела теплоти.

Виявити джерела необоротності в елементах теплових установок і оцінити втрати роботоздатності дозволяє ексергетичний метод аналізу ефективності теплових установок, який використовується в спеціальних розрахунках. (Величину максимальної можливої роботи (роботоздатності) називають *ексергією* тепла  $e_g$ ).

З теоретичної точки зору необхідно всіляко прагнути до підвищення термічного к.к.д. циклу  $\eta_t$  (а значить і ефективності к.к.д. установки  $\eta_e$ ). Однак в окремих випадках це пов'язано із значним ускладненням і подорожчанням установки і економія коштів, обумовлена економією палива, буде пов'язана із збільшенням витрат на виготовлення установки. Тому рішення про доцільність виготовлення установки з більш високим к.к.д. може бути прийнято тільки на основі техніко – економічних розрахунків.

### **1.12 Цикли двигунів внутрішнього згорання.**

Першим, хто вказав на можливість створення двигунів внутрішнього згорання, був Саді Карно. Ідеї, висловлені ним у роботі « Роздуми про рушійну силу вогню », в подальшому були повністю реалізовані.

У 1860 р. француз Ленуар побудував двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), що працював на газі. Однак він не набув широкого поширення зважаючи на те, що мав низький к.к.д. (не вище, ніж к.к.д. парових машин).

У 1862 р. французький інженер Бо-де-Роша запропонував (запатентував) двигун, принцип створення якого збігався з ідеями Карно. Цей принцип був використаний німецьким інженером Отто в створеному ним в 1877 р. бензиновому двигуні.

У 1897 р. німецьким інженером Дизелем був розроблений двигун високого стиснення, який працював на гасі. Розпилення гасу здійснювалося повітрям високого тиску, отриманого від компресора.

1904 р. російський інженер Г. В. Трінклер побудував безкомпресорний двигун зі змішаним згоранням палива – спочатку при постійному об'ємі, а

потім при постійному тиску. Такий двигун отримав в даний час значне поширення.

У поршневих двигунах внутрішнього згоряння паливо спалюється безпосередньо в робочому циліндрі. В результаті цього в циліндрі двигуна різко підвищується тиск газів, який передається на поршень. При цьому поступальний рух поршня через шатунно–кривошипний механізм перетворюється в обертальний рух колінчастого вала.

Двигуни внутрішнього згоряння застосовують у промисловості з кінця XIX століття. Особливістю цих двигунів є те, що вони мають найвищий серед теплових двигунів к.к.д., не потребують додаткового устаткування (парогенератора) і тому за конструкцією не громіздкі. Як паливо в двигунах внутрішнього згоряння в основному використовують нафтові продукти – бензин, солярове масло, дизельне паливо.

Чотиритактним називається двигун, в якому робочий цикл здійснюється за чотири ходи (такти) поршня, що відповідає двом обертам колінчастого вала.

Робота двигуна по чотиритактному циклу здійснюється таким чином. При першому ході поршня з ліва направо через впускний клапан А, розташований в кришці (Мал. 1.10), в циліндр поступає чисте повітря, або горюча суміш. Цей перший такт носить назву такту *впускання*.

В обох випадках при впусканні тиск  $p_a$  в циліндрі буде нижчий атмосферного  $p_0$  і в системі координат  $pV$  цей процес зобразиться лінією  $ga$ . Зазвичай  $p_a = 0,85:0,9 \text{ кг/см}^2$ .

На початку другого ходу поршня справа наліво впускний клапан закривається і робоче тіло, що знаходиться в циліндрі, піддається стискуванню ( другий такт – *стискування*). Процес стискування, показаний лінією  $ac$ , є політропним. Оскільки умови теплообміну в процесі стискування змінюються ( температура робочого тіла і стінок циліндра підвищується), кожна ділянка політропи стискування матиме свій показник  $n_1$ , але при

розрахунках значення  $n_1$  усереднюється. Середній показник політропи приймається  $n_1 = 1,28: 1,35$ .

У кінці такту стискування (точка  $C$ ) температура може бути нижча і вища за температуру самозаймання палива, прийнятого для роботи двигуна.

Якщо в двигун під час такту впускання поступає горюча суміш, температура у кінці стискування має бути нижча температури самозаймання горючої суміші, чим усувається передчасне її займання. У таких двигунах займання горючої суміші проходить від стороннього джерела – електричної іскри або спеціальної запальної кулі.

Для того, щоб займання горючої суміші сталося в лівому мертвому положенні поршня (точка  $C$ ), електрична іскра повинна проскочити дещо раніше (точка  $n$ ).

Випередження запалення вимірюється зазвичай в градусах кута повороту колінчастого валу і для чотиритактних двигунів складає залежно від їх швидкості від 15 до 35°.

Поширення двигунів внутрішнього згоряння пояснюється їх перевагами порівняно з іншими тепловими двигунами. Ці переваги стали ще значнішими, коли було розв'язано проблему створення економічного двигуна високого тиску, який працював на дешевому рідкому паливі-важких продуктах нафтопереробки. Перший такий двигун потужністю 18 кВт було збудовано у 1898р. на петербурзькому заводі. Двигуни цього типу, які називають *дизелями*, відзначаються високою економічністю і знайшли широке застосування.

За способом здійснення циклу двигуни діляться на **чотиритактні** і **двотактні**. Під тактом мається на увазі частина робочого циклу в інтервалі між двома суміжними точками мінімального і максимального об'ємів робочого циліндра, тобто в інтервалі між двома крайніми положеннями поршня, або, що те ж саме, в межах одного ходу поршня.



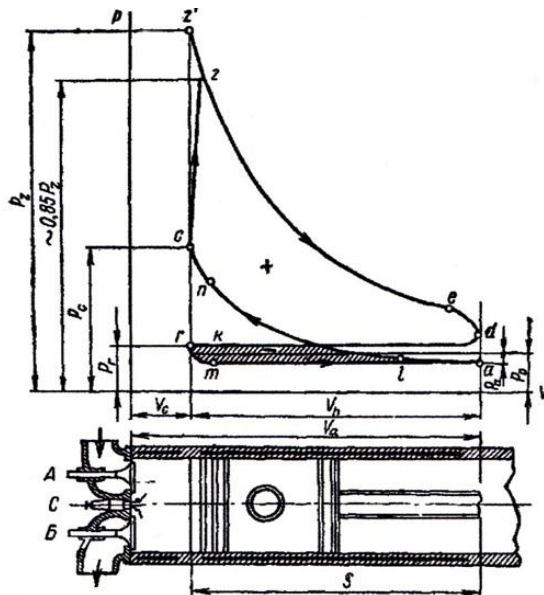


Рис. 1.10. Циліндр і індикаторна діаграма чотирьохтактного двигуна  
*A* – впускний клапан; *B* – випускний клапан; *C* – свічка запалювання;

Якщо в циліндр під час впускання поступає чисте повітря, температура у кінці стискування має бути вища температури самозаймання палива, прийнятого для роботи двигуна. Паливо в таких двигунах подається у кінці стискування з деяким випередженням в точці *n* і спалахує від безпосереднього зіткнення з нагрітим повітрям.

Третій такт носить назву *робочого ходу* – лінія *czed*. Він включає процеси згоряння палива *cz*, розширення продуктів згоряння *ze* і часткового випуску *ed*. Характер процесу згоряння залежить від типу двигуна. На малюнку 1.10, показаний робочий процес двигуна, в якому стискуванню піддається горюча суміш – двигун швидкого горіння. Усі процеси робочого ходу також являються політропними. В процесі розширення проходить теплообмін між газами і стінками циліндра і поршня, при цьому середнє значення показника політропи розширення менше середнього значення показника політропи стискування і рівне  $n_2 = 1,25: 1,32$ . Тепло, що виділилося при горінні палива в процесі розширення перетвориться в механічну роботу.

Четвертий такт є тактом *випуску*. Він складається з трьох різних за характером протікання процесів, а саме: процесу з моменту відкриття випускного клапана Б – вільного вихлопу газів(лінія *ed*), що відпрацювали, який відбувається під дією тиску в циліндрі; процесу *dr* – виштовхування газів, що відпрацювали, поршнем при його русі від нижнього до верхнього мертвого положення і процесу на ділянці *rt* – видалення продуктів згоряння за рахунок відсмоктуючої дії потоку вихлопних газів.

Виштовхування газів, що відпрацювали, відбувається при тиску, що дещо перевищує атмосферний ( $p_r = 1,1 : 1,2 \text{ кг/см}^2$ ). Тиск випуску залежить від конструкції вихлопної системи і швидкохідності двигуна.

Як видно з діаграми, відкриття випускного клапана проходить не в нижньому мертвому положенні поршня, як це прийнято в теоретичному циклі, а з деяким випередженням – *випередженням випуску*. Так само і закриття випускного клапана відбувається не у верхньому мертвому положенні поршня, а з деяким запізненням, після мертвого положення (точка *t*). З цього виходить, що такт випуску, строго кажучи, не відповідає ходу поршня від одного мертвого положення до іншого. Те ж саме слід сказати про такт впускання, оскільки відкриття впускного клапана відбувається до приходу поршня у верхнє мертве положення (точка *k*), а закриття після проходу поршнем нижнього мертвого положення (точка *l*).

Випередження відкриття і запізнення закриття впускних і випускних клапанів здійснюється для кращого очищення циліндра від газів, що відпрацювали, більшого наповнення його свіжим зарядом, для отримання більшої корисної роботи.

Впродовж циклу кожен клапан відкривається один раз, тому розподільний вал, що приводить в рух клапани, має число обертів, в два рази менше, ніж число обертів колінчастого валу.

З розглянутих чотирьох тактів, з яких складається чотиритактний цикл, тільки в третьому такті виконується корисна робота. На здійснення інших

трьох тактів робота витрачається. Її віддає маховик, що накопив механічну енергію впродовж робочого ходу. Причому, з трьох тактів, що витрачають енергію маховика, процеси впускання і випуску протікають при низьких тисках в циліндрі, близьких до атмосферного.

Середній індикаторний тиск  $p_i$  також є роботою газів за один повний цикл, віднесеною до роботи об'єму циліндра. Проте, при визначенні середнього індикаторного тиску по індикаторній діаграмі чотиритактного двигуна доводиться враховувати ряд особливостей.

Площа, яка між процесами впускання і випуску на індикаторній діаграмі, представляє негативну роботу. При визначенні середнього індикаторного тиску з площі індикаторної діаграми  $f_1$ , яка характеризує позитивну (+) роботу циклу, слід відняти площину  $f_2$ , що характеризує негативну (-) роботу, так що  $f = f_1 - f_2$ .

При визначенні індикаторної потужності багаточиліндрового двигуна внутрішнього згорання з циліндрами простої дії користуються формулами:

$$N_i = \frac{\pi D^2}{4} p_i S \frac{nRz}{6 \cdot 10^4} \text{ кВт}$$

та

$$N_i = \frac{\pi D^2}{4} p_i S \frac{nRz}{60 \cdot 75} \text{ К. С.},$$

де  $p_i$  – середній індикаторний тиск,  $\text{Н/м}^2$  і  $\text{кГ/м}^2$ ;  $D$  і  $S$  – відповідно діаметр і хід поршня,  $m$ ;  $n$  – число обертів за хвилину;  $z$  – число циліндрів;  $k$  – коефіцієнт тактності.

Коефіцієнт тактності показує число циклів, здійснених в циліндрі двигуна за один оберт колінчатого валу. Для даного чотиритактного циклу  $k=1/2$ , оскільки повний робочий цикл здійснюється за два оберти колінчастого валу.

Як впливає з розглянутого, чотиритактний двигун, розрахований на роботу при високих тисках, половину часу працює як повітряно – газовий насос низького тиску, що вкрай нераціонально. Цей недолік, властивий

чотиритактним двигунам, відсутній в двохтактних двигунах, в яких робочий цикл здійснюється впродовж двох ходів поршня або одного оберту колінчастого валу.

У двотактних двигунах допоміжні процеси впускання і випуску займають лише частину двох основних тактів – стискування і розширення, властивих будь – якому поршневному тепловому двигуну.

Циліндр двотактного двигуна має випускні *A* і продувні *B* вікна, відкриває і закриває які поршень при русі в циліндрі (Рис. 1.11.).

Робочий процес двотактного двигуна здійснюється наступним чином. В процесі розширення газів поршень, рухаючись зліва направо, нижньою кромкою відкриває випускні вікна (точка *e*), і гази, що відпрацювали, через вихлопну систему випускаються в атмосферу; при цьому тиск в циліндрі знижується. При подальшому русі своєю верхньою кромкою поршень відкриває продувальні вікна, через які повітря з надлишковим тиском поступає в циліндр і виштовхує ті, гази що знаходяться в ньому, які відпрацювали.

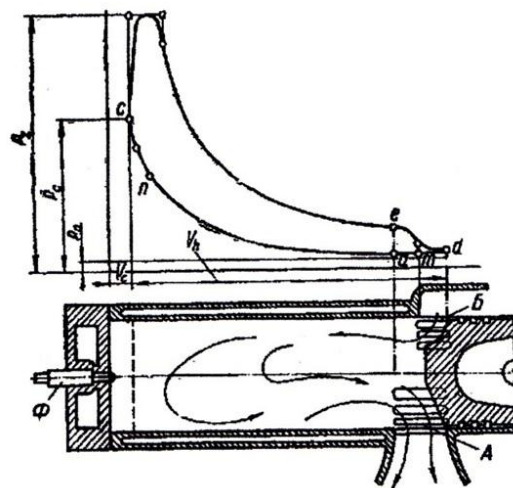


Рис. 1.11. Циліндр і індикаторна діаграма двотактного двигуна з внутрішнім сумішоутворенням і займанням палива від стискування:

*A* – випускні вікна; *B* – продувальні вікна,  $\Phi$  – паливний клапан (форсунка).

При русі поршня справа на ліво послідовно закриваються продувні, а потім випускні вікна, і в циліндрі починається процес стискування.

Оскільки робочий цикл двотактного двигуна здійснюється за один оберт колінчатого валу ( $k=1$ ), а чотиритактного – за два ( $k=1/2$ ), теоретично при однакових числах обертів і розмірів двотактний двигун повинен розвивати у двічі більшу потужність.

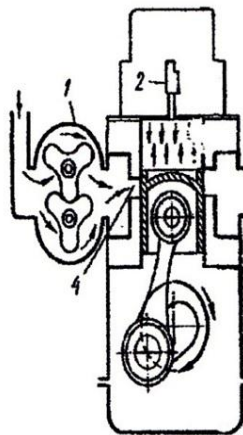


Рис. 1.12 Схема робочого механізму двотактного двигуна.

*1 – продувний насос; 2 – форсунка; 3 – випускні вікна; 4 – продувні вікна.*

Проте за рівних умов потужність двотактного двигуна більше потужності чотиритактного на 60-70%. Причина цього полягає, по-перше, в наявності втраченого ( до 25% ) ходу поршня в період випуску і продування, по-друге, в недосконалості процесу продування, внаслідок чого в циліндрі до моменту початку стискування залишається більше, ніж в чотиритактних двигунах, газів, що відпрацювали, і, по-третє, у витраті потужності на привід насоса, призначеного для отримання продувного повітря.

Окрім великих ускладнень, викликаних проблемою очищення і наповнення циліндра, особливо при високих числах обертів, є і інші труднощі в створенні двотактного двигуна великої потужності. Головна причина їх полягає у більш високій середній температурі процесу із-за наявності робочого ходу при кожному оберті колінчастого валу. Це веде до підвищення теплової напруженості поршня, стінок і кришки циліндра, поршневих кілець і створює важкі умови для роботи основних вузлів двигуна.

Процес горіння палива, залежно від типу двигуна, може відбуватись:

- 1) при сталому об'ємі і різкому підвищенні тиску (в газових та карбюраторних двигунах), двигуни цього типу умовно називають двигунами із згорянням при  $V = \text{const}$  (цикл Отто);
- 2) при сталому тиску  $p = \text{const}$  (цикл Дизеля);
- 3) при змішаному циклі, коли горіння в першій частині процесу відбувається при сталому об'ємі, а в другій – при сталому тиску, ці двигуни умовно називають двигунами із згорянням при  $V = \text{const}$  і  $p = \text{const}$  (цикл Трінклера).

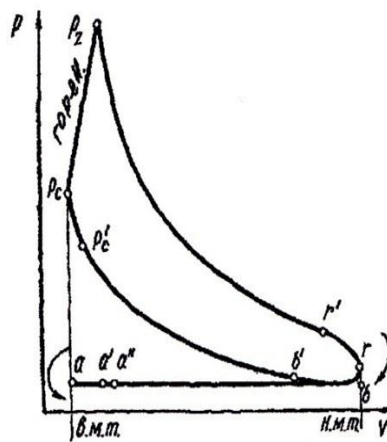


Рис. 1.13 Процеси згоряння і розширення в повній індикаторній діаграмі

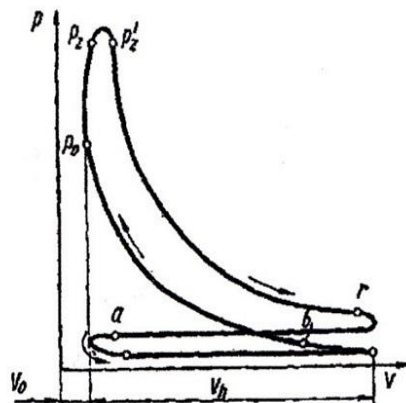


Рис. 1.14. Згоряння палива при змішаному циклі

Дослідження роботи реального поршневого двигуна доцільно здійснювати по так званій індикаторній діаграмі (знятої за допомогою

спеціального приладу – індикатора). Індикаторна діаграма двигуна, що працює зі згорянням палива при постійному об'ємі, показана на рисунку 1.15.

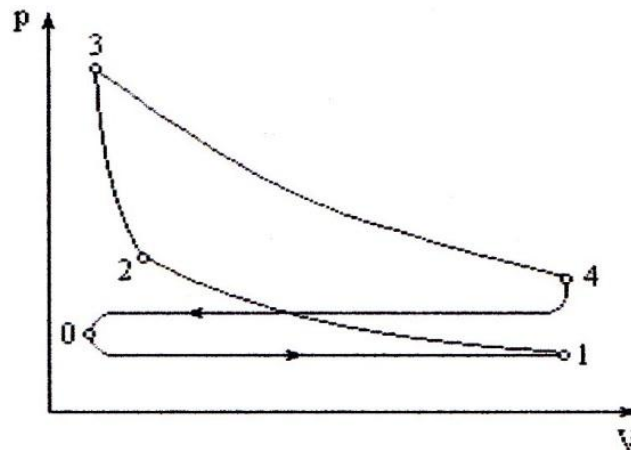


Рис. 1.15. Індикаторна діаграма двигуна, що працює зі згорянням палива при постійному об'ємі.

При русі поршня від верхньої мертвої точки до нижньої відбувається всмоктування горючої суміші (лінія 0-1). Ця лінія не є термодинамічним процесом, так як основні параметри при всмоктуванні не змінюються, а змінюються тільки маса і об'єм суміші в циліндрі. Крива 1-2 (лінія стиснення) відображає процес стиснення (поршень рухається від нижньої мертвої точки до верхньої). В точці 2 від електричної іскри відбувається миттєве займання горючої суміші (при постійному об'ємі). Цей процес зображується кривою 2-3. У ході цього процесу температура і тиск різко зростають. Процес розширення продуктів згоряння на індикаторній діаграмі зображується кривою 3-4, яка називається *лінією розширення*. У точці 4 відбувається відкриття вихлопного клапана, і тиск в циліндрі зменшується до зовнішнього тиску. При подальшому русі поршня (від нижньої мертвої точки до верхньої) через вихлопний клапан відбувається видалення продуктів згоряння з циліндра при тиску дещо більшому тиску навколишнього середовища. Цей процес на діаграмі зображується кривою 4-0 і називається *лінією вихлопу*.

В даному випадку робочий процес відбувається за чотири ходи поршня (такти). Колінчастий вал робить за цей час два оберти. У зв'язку з чим, розглянуті двигуни називаються чотиритактними.

З аналізу роботи реального двигуна видно, що робочий процес не є замкнутим і в ньому присутні всі ознаки необоротних процесів: тертя, теплообмін при кінцевій різниці температур, змінні швидкості поршня і інші.

Так як в термодинаміці досліджуються лише ідеальні оборотні цикли, то для дослідження циклу ДВЗ приймемо такі припущення: робоче тіло – ідеальний газ з постійною теплоємністю; кількість робочого тіла постійна, між робочим тілом і джерелами теплоти має місце нескінченно мала різниця температур; підведення теплоти до робочого тіла виробляється не за рахунок спалювання палива, а від зовнішніх джерел теплоти. Те ж саме справедливо і для відводу теплоти.

Прийняті допущення призводять до вивчення ідеальних термодинамічних циклів ДВЗ, що дозволяє робити порівняння різних двигунів і визначати фактори, що впливають на їх к.к.д. Діаграма, побудована з урахуванням зазначених вище припущень, буде вже не індикаторною діаграмою двигуна, а  $pV$  – діаграмою його циклу.

Розглянемо ідеальний термодинамічний цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти. Цикл в  $pV$  координатах представлений на рисунку 1.16.

Ідеальний газ з початковими параметрами  $p_1, V_1, T_1$  стискається по адіабаті 1-2. У ізохорному процесі 2-3 робочому тілу від зовнішнього джерела теплоти передається кількість теплоти  $q_1$ . У адіабатному процесі 3-4 робоче тіло розширюється до початкового об'єму  $V_4 = V_1$ . У ізохорному процесі 4-1 робоче тіло повертається в початковий стан з відведенням від нього теплоти  $q_2$  в теплоприймач.

*Характеристиками циклу є:*

$$\varepsilon = V_1/V_2 - \text{Ступінь стиснення};$$

$$\lambda = P_3/P_2 - \text{Ступінь підвищення тиску};$$



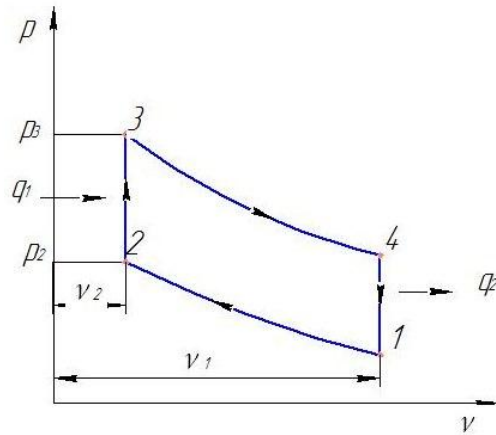


Рис. 1.16. Ідеальний термодинамічний цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти. Цикл в  $pV$  – координатах.

Кількість підведеної і відведеної теплоти визначаються за формулами:

$$q_1 = C_p(T_3 - T_2);$$

З урахуванням знайдених значень температур формула для к.к.д. прийме вигляд:

$$\eta_{iv} = 1 - \frac{1}{\xi^{R-1}}.$$

Однак підвищення ступеня стиснення в двигунах даного типу обмежується можливістю передчасного samozapalювання горючої суміші. У зв'язку з чим, розглянуті типи двигунів мають відносно низькі к.к.д. В залежності від роду палива ступінь стиснення в таких двигунах змінюється від 4 до 9.

Робота циклу визначається за формулою:

$$I_u = q_1 \eta_i = C_v(T_3 - T_2) \left(1 - \frac{1}{\xi^{R-1}}\right).$$

Цикли з підведенням теплоти при постійному об'ємі застосовуються в карбюраторних типах двигунів з використанням примусового займання від електричної іскри.

Дизельні двигуни, в основу роботи яких покладено цикл з підведенням теплоти при постійному тиску ( з поступовим згоранням ), мають ряд переваг в порівнянні з двигунами, що працюють за циклом з підведенням теплоти при постійному об'ємі. Вони пов'язані з тим, що в двигунах з поступовим

згорянням здійснюється роздільне стиснення палива і повітря. Тому тут можна досягати значно більш високих ступенів стиснення. Повітря при високих тисках має настільки високу температуру, що паливо, яке подається в циліндр самозаймається без всяких спеціальних запальних пристроїв. Крім того, роздільне стиснення повітря і палива дозволяє використовувати будь-яке рідке дешеве паливо – нафта, мазут, смоли та ін.

У двигунах з поступовим згорянням палива повітря стискається в циліндрі, а рідке паливо розпорошується стисненим повітрям від компресора. Роздільне стиснення дозволяє застосовувати високі ступені стиснення (до  $\epsilon = 20$ ), виключаючи передчасне самозаймання палива. Сталість тиску при горінні палива забезпечується відповідним регулюванням паливної форсунки. Конструкція такого двигуна вперше була розроблена німецьким інженером Дизелем.

Розглянемо ідеальний цикл двигуна з підведенням теплоти при постійному тиску на діаграмі (Рис. 1.17).

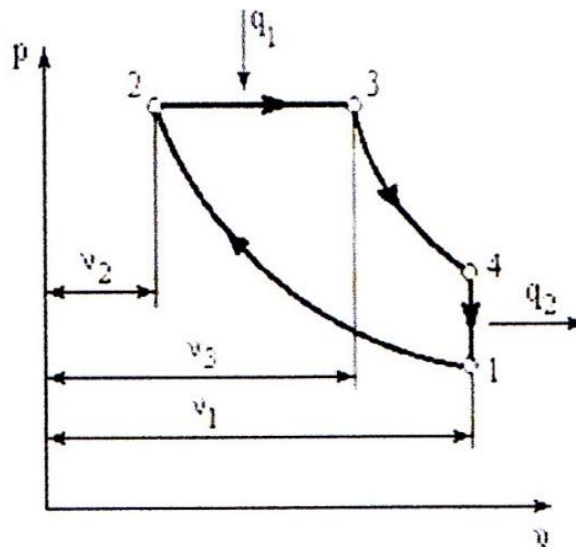


Рис. 1.17. Ідеальний цикл двигуна з підведенням теплоти при постійному тиску в –  $pV$  координатах.

Цей цикл здійснюється наступним чином. Газоподібне робоче тіло з початковими параметрами  $p_1$ ,  $V_1$ ,  $T_1$ , стискається по адіабаті 1-2. В ізобарному процесі 2 - 3 надходить деяка кількість теплоти  $q_1$ . У адіабатному процесі 3 - 4 відбувається розширення робочого тіла до початкового об'єму.

У ізохорному процесі 4-1 робоче тіло повертається в попередній стан з відведенням в теплопримач теплоти  $q_1$ .

Характеристиками циклу є:

Ступінь стиснення –  $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$  Ступінь попереднього розширення –

$$\rho = \frac{V_3}{V_2}$$

Робота циклу визначається за формулою:

$$l_u = q_1 \eta_i = C_p (T_3 - T_2) \left[ 1 - \frac{\rho^{k-1}}{R \varepsilon^{k-1} (P - 1)} \right]$$

Порівняння к.к.д. циклів ДВЗ з підведенням теплоти при  $p = const$  і  $V = const$  при однакових тисках і температурах, але при різних  $\varepsilon$  показує, що

$$\eta_{ip} > \eta_{iv}$$

При цьому ступінь стиснення  $\varepsilon$  в циклі з підведенням теплоти при  $p = const$  більше, ніж у циклі з підведенням теплоти при  $V = const$ .

Величина  $e$  в циклі з підведенням теплоти при постійному тиску вибирається таким чином, щоб забезпечувалися умови самозаймання палива. Таким умовам у компресорних дизелях відповідає  $e=14 - 18$ .

Одним з недоліків двигунів, в яких застосовується цикл з підведенням теплоти при постійному тиску, є необхідність використання компресора, який застосовується для подачі палива. Наявність компресора ускладнює конструкцію і зменшує економічність двигуна, тому на його роботу затрачається 6-10% від загальної потужності двигуна.

З метою спрощення конструкції і збільшення економічності двигуна російський інженер Г. В. Трінклер розробив проект безкомпресорного двигуна високого стиснення. Цей двигун позбавлений недоліків розглянутих вище двох типів двигунів. Основна його відмінність у тому, що рідке паливо за допомогою паливного насоса подається через форсунку в головку циліндра, де воно спалахує і горить спочатку при постійному об'ємі, а потім

при постійному тиску. На рисунку. 1.18. представлений ідеальний цикл двигуна із змішаним підведенням теплоти в  $pV$ - координатах.

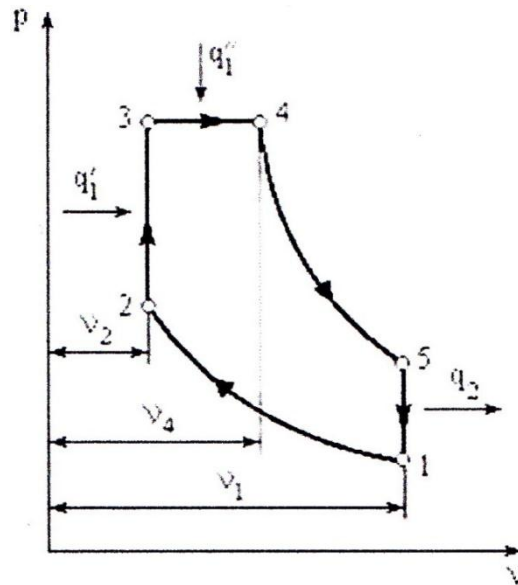


Рис. 1.18. Ідеальний цикл двигуна із змішаним підведенням теплоти в  $pV$  - координатах.

У адіабатному процесі 1-2 робоче тіло стискається до параметрів у точці 2. У ізохорному процесі 2-3 до нього підводиться перша частина теплоти  $q'$  штрих, а в ізобарному процесі 3-4 – друга  $q''$  два штрихи. У процесі 4-5 відбувається адіабатне розширення робочого тіла і по ізохорі 5-1 воно повертається в початковий стан з підведенням теплоти  $q_2$  в теплоприймач.

*Характеристиками циклу є:*

Ступінь стиснення –  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$

Ступінь підвищення тиску –  $\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ .

Ступінь попереднього розширення –  $\rho = \frac{v_4}{v_3}$ .

Кількість підведеної теплоти –  $q_1 = q_{1r} = q_{1n}$

і відведеної  $q_2$  теплоти визначається за формулами:

$$q_{1r} = C_v(T_3 - T_2)$$

$$q_{1n} = C_p(T_4 - T_3)$$

$$q_2 = C_v(T_3 - T_1)$$

Підставивши знайдені значення температур в формулу для к.к.д., будемо мати:

$$\eta_i = 1 - \frac{\lambda \rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]}$$

Звідси випливає, що зі збільшенням  $k$  і  $l$  к.к.д. циклу зростає, а зі збільшення  $r$  зменшується.

Цикл із змішаним підведенням теплоти узагальнює цикли з ізобарним і ізохорним підведенням теплоти. Якщо припустимо що  $\lambda = 1$  (що означає відсутність підведення теплоти при постійному об'ємі ( $P_2 = P_3$ )), то формула  $\rho = \frac{V_4}{V_3}$  зводиться до формули  $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$ , тобто до формули для ККД циклу ДВС з ізобарним підведенням теплоти. Якщо прийняти  $\rho = 1$  (що означає відсутність підведення теплоти при постійному тиску ( $V_3 = V_4$ )), то формула  $\rho = \frac{V_4}{V_3}$  зводиться до формули  $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$  для к.к.д. циклу з ізохорним підведенням теплоти.

Цикл із змішаним підведенням теплоти лежить в основі роботи більшості сучасних дизелів.

При однакових ступенях стиснення цикл з ізохорним підведенням теплоти має більший к.к.д., ніж цикл з ізобарним підведенням. Однак практично двигуни з ізобарним підведенням теплоти мають більш високу ступінь стиснення, через те вони більш економічні, ніж двигуни з ізохорним підведенням. (В перших двигунах  $\varepsilon = 6 \div 8$ , в других  $\varepsilon = 12 \div 18$ ).

Тому доцільно порівнювати ці цикли при однакових кінцевих тисках і температурах, тобто в умовах однакових допустимих термічних і механічних напружень.

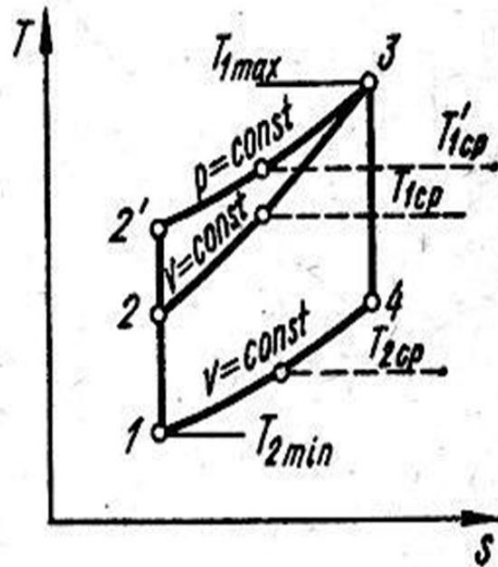


Рис. 1.19. Порівняння циклів д. в. з.

На рисунку 1.19. зображені цикли з ізохорним та ізобарним підведенням теплоти в одному і тому ж інтервалі температур. Як видно середня температура підводення теплоти  $T_{1cp}$  в циклі  $p = const$  більше, ніж в циклі  $V = const$ , тому к.п.д. циклу  $P = const$  вище, ніж к.п.д. циклу  $V = const$ . З цього порівняння витікає висновок, що для кращого використання теплоти  $q_1$  доцільно частину її  $q_1'$ , подавати при  $V = const$  до моменту отримання в двигуні допустимих максимальних тисків, а другу  $q_1''$  подавати при  $P = const$ , тобто коли в двигуні внутрішнього згоряння процес відбувається по циклу із змішаним підводом тепла.

### 1.13 Цикли газових турбін

В газовій турбіні, як і в д.в.з., робочим тілом є продукти згоряння рідкого або газоподібного палива, але зворотно – поступальний принцип замінений на обертальний, що значно спрощує конструкцію двигуна. Привід робочого колеса здійснюється струменем газу. Схема газотурбінної установки дана на рисунку 1.20.

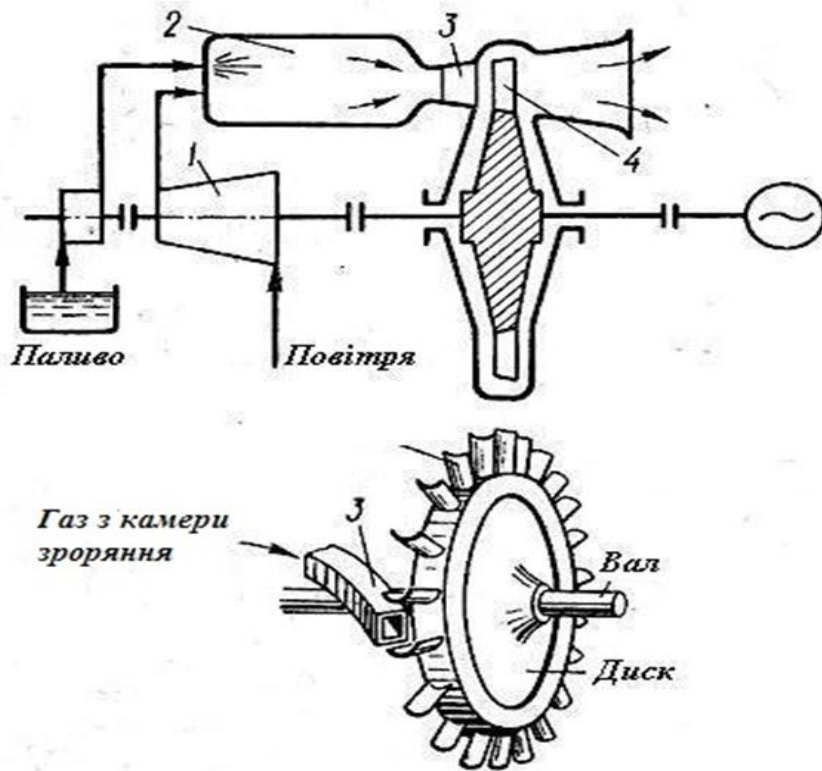


Рис. 1.20. Схема газотурбінної установки.

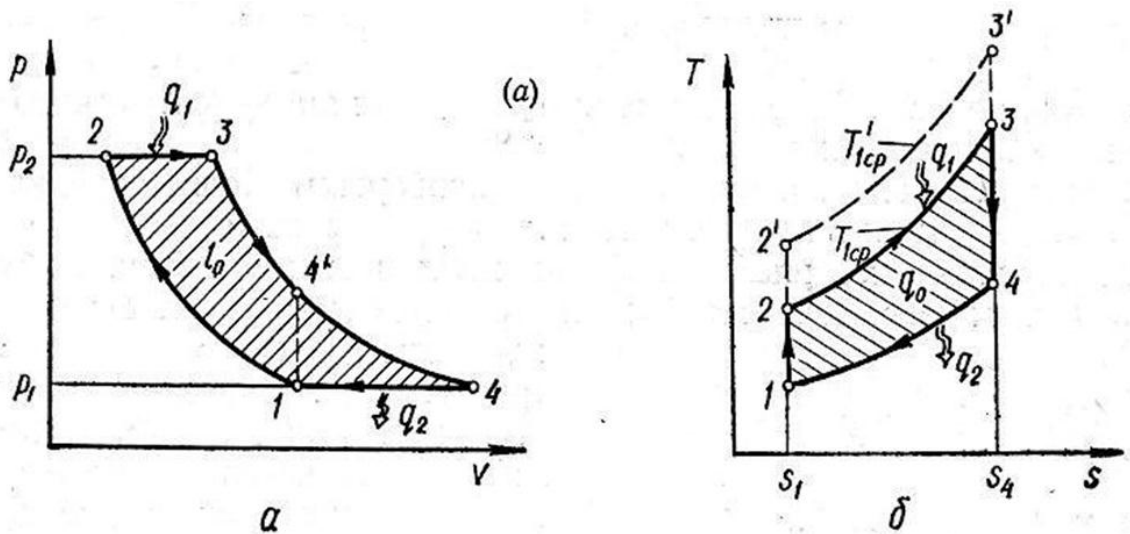


Рис.1.21. Цикл г. т. у. з підводом теплоти ( $p = const$ ) в  $p - V$  (а) і  $T - s$  -координатах (б).

В турбінах здійснено повне адіабатичне розширення продуктів згоряння до зовнішнього тиску повітря. Це дає додатковий приріст в роботі. (На рисунку 1.21. заштрихована ділянка діаграми пл.4', 4,1).

Найпростішими циклами в газотурбінних установках є: цикл з ізобарним підведенням теплоти і цикл з ізохорним підведенням теплоти. Ці

цикли відрізняються від відповідних циклів д.в.з. процесом відведенням теплоти ізохорний процес відведення замінено на ізобарний.

Теоретичний цикл г.т.у. з ізобарним підведенням теплоти складається з процесу адіабатного стиснення повітря 1 - 2 (Рис. 1.21.) в компресорі (Рис. 1.21.), процесу ізобарного підведення теплоти 2-3 в камері згоряння 2, процесу адіабатного розширення 3-4 продуктів згоряння в соплах 3 і перетворення кінетичної енергії струменя газу на робочих лопатях 4, процесу відведення теплоти 4 - 1 від газу в навколишнє середовище при постійному тиску  $P_1$ .

Корисна робота в циклі дорівнює різниці між теоретичною роботою турбінами  $l_t$  (пл.34  $P_1P_23$ ) і технічною роботою, яка витрачена на привід компресора  $l_k$  (пл. 12  $P_2P_11$ ), тобто

$$l_0 = l_t - l_k = \text{пл. 12341}$$

в компресорі. При цьому чим більше ступеней підігріву і стиснення повітря, тим більше цикл г.т.у. наближається до регеративного циклу Карно, який має, як відомо, найбільший к.к.д. Однак регенерація багатоступеневих процесів пов'язана з ускладненням і дорожчанням.

### **1.14 Цикли реактивних двигунів**

В даний час широко використовуються реактивні двигуни і не тільки в авіації, а й в інших транспортних і промислових установках. Вони мають велику потужність при порівняно невеликих габаритах. В них сила тяги розвивається за рахунок реакції потоку продуктів згоряння, що витікають з великою швидкістю з сопла в навколишнє середовище.

Реактивні двигуни розділяють на *ракетні* і *повітряно – ракетні*. В ракетних окислювач, необхідний для горіння палива ( зріджений кисень, перекись водню та ін.) знаходиться на борту літального апарату, а в повітряно – реактивних – атмосферне повітря.



За принципом роботи повітряно – реактивні двигуни розділяються на безкомпресорні ( прямоточні ) і компресорні (турбокомпресорні).

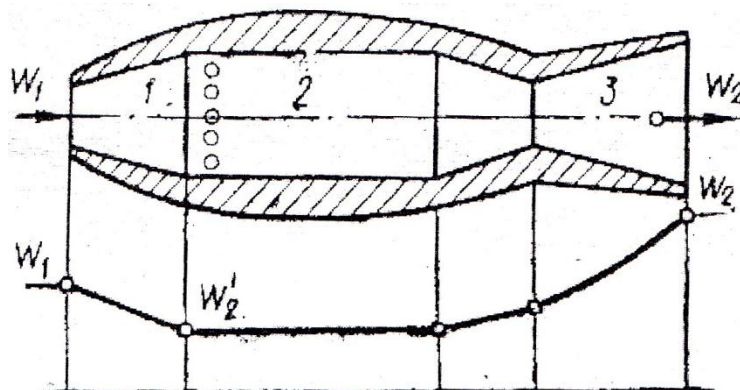


Рис. 1.22. Схема прямоточного повітряно – реактивного двигуна

В прямоточному двигуні (Рис. 1.22.) в дифузорі 1 відбувається стиснення зустрічного повітря за рахунок зменшення його великої зустрічної швидкості відносно літака. В камері згоряння 2 суміш палива і стиснутого повітря згоряють при  $p = const$ . В соплі 3 відбувається адіабатне розширення продуктів згоряння і велике збільшення швидкості газів на виході із сопла.

В результаті збільшення відносної швидкості виникає реактивна сила вздовж проточної частини двигуна, прикладена до сопла

$$F = m(W_p - W_c).$$

Ідеальний цикл прямоточних повітряно-реактивних двигунів аналогічний циклу газотурбінних двигунів з ізобарним підводом тепла, термічний к.к.д

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{K-1}{K}}}$$

де  $\beta = \frac{P_2}{P_1}$  – ступінь збільшення тиску повітря в дифузорі, яка зростає із збільшенням швидкості польоту.

Коефіцієнт корисної дії можна збільшити, збільшивши  $\beta$ , якщо за дифузором додатково встановити турбокомпресор  $K$ .

Ця ж корисна робота дорівнює теплоті  $g_0$ , яка знаходиться як різниця між кількістю підведеної теплоти  $q_1$  (пл. 23  $S_4S_12$ ) і відведеної  $g_2$  (пл.41 $S_1S_44$ ), тобто  $g_0 = g_1 - g_2 = \text{пл}1234$  (Мал. 1.24.б).

Термічний к.к.д. циклу г.т.у. можна визначити з виразу

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{1}{\kappa}}}$$

де  $K = \frac{c_1}{c_v}$ , а  $\beta = \frac{P_2}{P_1}$  – степінь збільшення тиску повітря в дифузори, яка зростає із збільшенням швидкості польоту.

Коефіцієнт корисної дії можна збільшити, якщо за дифузореом додатково встановити турбокомпресор  $K$  (Рис. 1.23.).

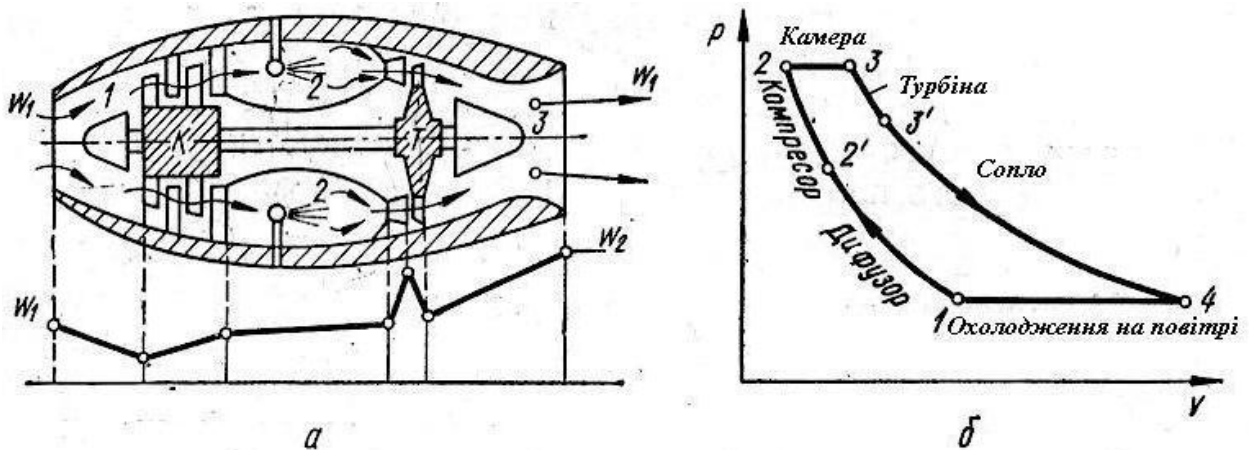


Рис. 1.23. Схема (а) і цикл (б) турбокомпресивного повітряно – реактивного двигуна

Він приводиться в рух від невеликої газової турбіни, яка використовує частину роботи продуктів згорання. На малюнку 1.24, б показний цикл такого двигуна в  $p - V$  координатах.

### 1.15 Цикли паросилових установок

Паросилові установки є базою сучасної великої енергетики. Їх робота заснована на перетворенні енергії органічного або ядерного палива в механічну за допомогою водяної пари.

Принципова теплова схема паросилової установки показана на (Рис. 1.24.).

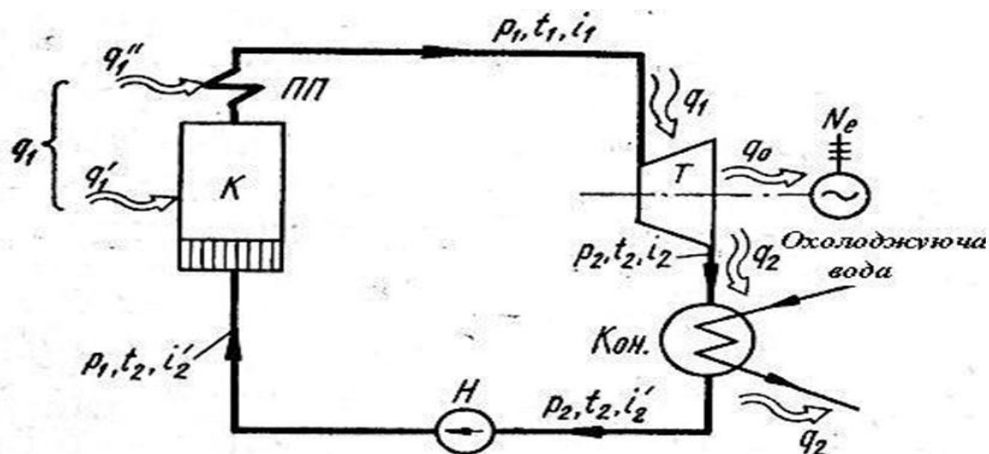


Рис. 1.24. Принципова теплова схема паросилової установки

За початковий стан тут принята вода при певній температурі (точка яка стискується насосом (по 3 – 4) і подається в котел **К** при тиску  $P_1$  (Рис. 1.25.).

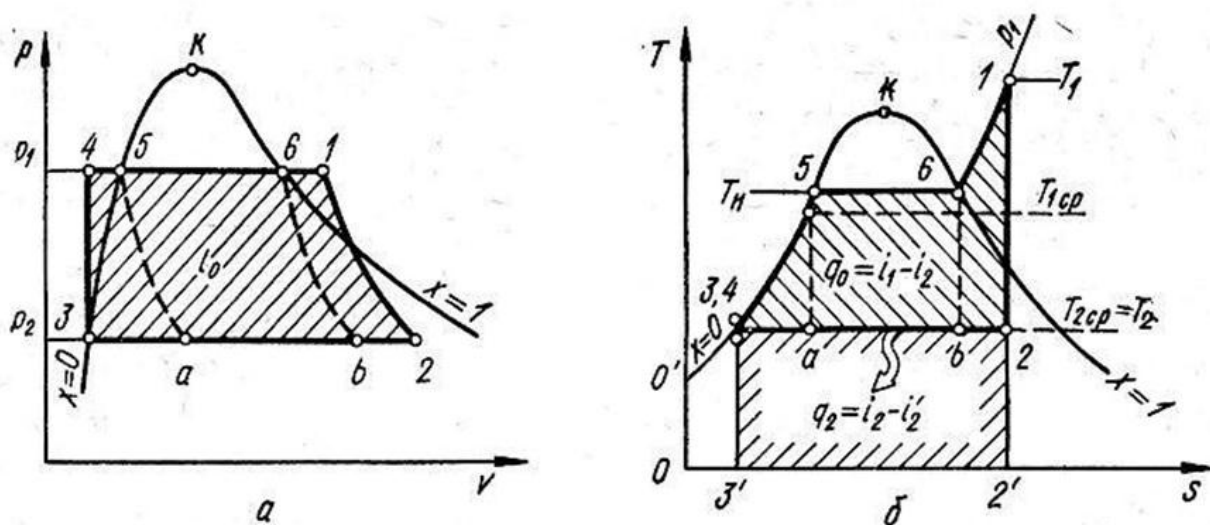


Рис. 1.25. Основний цикл п. с. у. (цикл Ренкіна) в  $p - V$  (а) і  $T - s$  координатах (б).

В котлі відбувається нагрівання води при постійному тиску (процес 4 – 5) до температури кипіння 5, потім відбувається пароутворення (процес 5 – 6). Отримана суха насичена пара в пароперегрівному пристрої ПП перегрівається до необхідної температури  $T_1$  (процес 6 – 1).

Перегріта пара з параметрами  $P_1$  і  $t_1$  по паропроводу поступає в парову турбіну  $T$ , де відбувається адіабатичне розширення до тиску  $P_2$  з виконанням роботи ( процес 1-2 ). Після турбіни пара поступає в конденсор, який є трубчатим теплообмінником. Внутрішня поверхня трубок охолоджується водою, яка циркулює. В конденсорі пара конденсується, переходить у рідину з  $P_2$  і  $T_2$  (процес конденсації 2-3 ). Далі цикл повторюється. Розглянутий основний цикл паросилової установки називається циклом Ренкіна або простим конденсаційним циклом.

Для паросилових установок термодинамічно найбільш вигідним циклом міг бути цикл Карно (цикл а 5б б). Однак при цьому треба б було використовувати вологу пару, для використання якої потрібне складне, дороге обладнання.

Коефіцієнт корисної дії паросилової установки можна визначити за такою формулою:

$$\eta_{t_{\text{ренк}}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{h_1 - h'_2 - (h_2 - h'_2)}{h_1 - h'_2} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}$$

де  $h_1$  – ентальпія пару, який поступає в турбіну;

$h_2$  – ентальпія пару, який виходить із турбіни;

$h_3$  – ентальпія рідини, яка поступає у котел.

Ентальпії  $h_1$  і  $h_2$  визначають за таблицями насиченої пари для тиску  $P_2$ .

Підвищення к.к.д. паросилової установки пов'язане з підвищенням початкових параметрів пари  $P_1$  і  $T_1$  і зниженням кінцевого її тиску  $P_2$ . Однак, це пов'язано із ускладненням вартості установок.

## РОЗДІЛ II ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕПЛО – І МАСООБМІНУ

### 2.1 Теплопровідність

Розглянемо схему передавання теплоти крізь одношарову плоску стінку (Мал.). Зліва надходить теплота  $q$ , з температурою  $t_1$ , а праворуч міститься середовище з нижчою температурою  $t_2$ . Зрозуміло, що температура поверхні стінки  $t_{c1}$  з боку нагрівального тіла буде нижча за  $t_1$  і відповідно температура з другого боку стінки  $t_{c2}$  буде вища за  $t_2$ . Внаслідок цього крізь стінку проникає теплота. Величина переданої теплоти залежить від фізичних властивостей тіла і пропорційна градієнтові температур:

$$q = -\lambda grad = -\frac{\partial t}{\partial n} Bm$$

де  $q$  – густина теплового потоку,  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності.

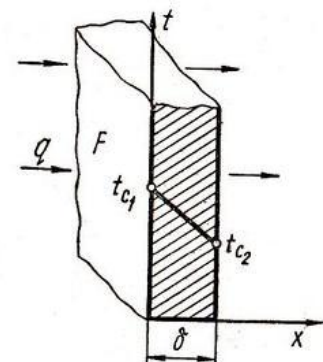
Знак мінус показує, що температурний градієнт від'ємний, бо він направлений у бік зменшення температури. Це зрозуміло, оскільки теплота поширюється від нижчих до вищих температур.

Звернемося ще раз до малюнку. На поверхнях плоскої однорідної стінки площею  $F$  і товщиною  $\delta$  будуть температури, як показано вище,  $t_{c1}$  і  $t_{c2}$ . Щоб визначити величину теплового потоку, помножимо густина потоку  $q$  на площу стінки  $F$  і проінтегруємо рівняння Фур'є за напрямком потоку від

нуля до  $\delta$  ( $\int_0^\delta dn$ ) і температурою  $t_{c1}$  до  $t_{c2}$  ( $\int_{t_{c1}}^{t_{c2}} dt$ ). При цьому для зручності

розрахунків змінимо границі інтегрування за температурою, бо завжди  $t_{c1} > t_{c2}$ . Відповідно зміниться знак у рівнянні. В інтегральному вигляді за законом Фур'є тепловий потік крізь стінку

$$Q = qF = \lambda F \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} Bm.$$



Мал. Схема передавання теплоти крізь одношарову плоску стінку

Якщо площа стінки  $F=1 \text{ м}^2$ , товщина стінки  $\delta=1 \text{ м}$  і  $t_{c1}-t_{c2}=1 \text{ град}$ , то  $Q=\lambda$ .

Таким чином, коефіцієнт теплопровідності характеризує здатність матеріалу проводити теплоту і показує потужність теплового потоку, що проходить протягом 1 сек від однієї поверхні площею  $1 \text{ м}^2$  до протилежної при товщині стінки  $1 \text{ м}$  і різниці температур  $1 \text{ град}$ . Його можна визначити за формулою

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{F(t_{c1} - t_{c2})} \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}.$$

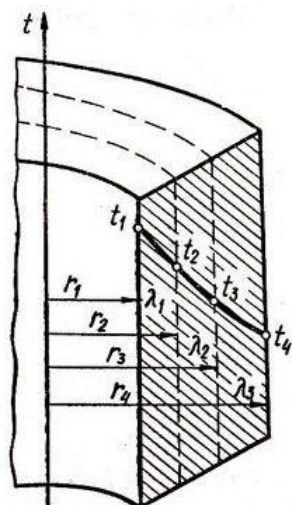
Нижче подані значення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  для деяких матеріалів,  $\text{Вт/(м} \cdot \text{град)}$ :

Срібло . . . . .	418	Водень . . . . .	0,173
Чавун . . . . .	62,5	Азбест . . . . .	0,116
Бетон . . . . .	1,28	Шлаковата. . . . .	0,07
Вода . . . . .	0,545	Повітря. . . . .	0,0243

Коефіцієнт теплопровідності перебуває в прямій залежності від об'ємної маси  $\rho$  матеріалу; із збільшенням  $\rho$  матеріалу його  $\lambda$  зростає, тому що зменшується кількість пор і порожнин, заповнених повітрям, яке має найменшу теплопровідність.

Збільшення вологості матеріалу супроводиться збільшенням його теплопровідності, бо при цьому повітря в порах замінюється водою, теплопровідність якої в 49 раз більше, ніж повітря.

З підвищенням температури збільшується теплопровідність будівельних та теплоізоляційних матеріалів. Так, теплопровідність цегли в топці збільшується в 3-4 рази порівняно відповідних значень на вільному повітрі.



Мал. До виведення формули теплопровідності крізь одношарову циліндричну стінку

На цих принципах базуються способи створення термоізоляторів. Ці пристрої повинні мати

якнайбільше дрібних замкнати пор і порожнин, бути негігроскопічними й захищеними від зволоження.

Графік зміни температури по товщині стінки має вигляд прямої лінії, якщо коефіцієнт теплопровідності всюди однаковий. Пояснюється це тим, що при стаціонарному режимі у кожному шарі плоскої стінки проходить одна і та ж кількість теплоти, а тому зниження температури (при інших рівних умовах) пропорціональне товщині шару. Отже, тут має місце лінійна залежність. У зв'язку з цим усі точки площини, що лежать на однаковій відстані від зовнішньої поверхні, мають однакову температуру. Такі поверхні, як вказувалось, називаються ізотермічними.

Для полегшення розрахунків теплопровідності багат шарових стінок, в яких кожний шар має свій відмінний коефіцієнт  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  і товщину  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , використовують поняття *термічного опору*  $R$ . Взагалі термічний опір є величина, обернена до теплопровідності. Так, при коефіцієнті теплопровідності  $\lambda$  і товщині шару  $\delta$  м термічний опір

$$R = \frac{\delta}{\lambda},$$

а при товщині шару  $\delta$

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}.$$

Із запровадженням поняття  $R$  формулу, що стосується площі  $F = 1 \text{ м}^2$ , можна записати так:

$$q = \frac{Q}{F} = \lambda \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R}.$$

Термічні опори на шляху теплового потоку додаються, а тому сумарний термічний опір для багат шарової стінки

$$R_{\text{сум}} = \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}.$$

Потужність теплового потоку за 1 сек крізь багат шарову стінку визначається за формулою

$$q_{\text{бш}} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\sum_1^n R_i} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}$$

З цих формул видно, що величина теплового напору залежить від різниці температур крайніх поверхонь стінок і термічного опору.

Розглянемо теплопровідність крізь циліндричну стінку. У цьому випадку поверхня входу теплоти з середини трубки менша за зовнішню поверхню виходу теплоти. Якщо всередині трубки виділити елементарний кільцевий шар радіусом  $r$ , то при довжині труби  $l$  його поверхня  $F = 2\pi r l$ .

Виходячи з рівняння Фур'є, потужність теплового потоку, що проходить крізь цей шар, визначимо за формулою

$$Q = -2\pi r \lambda l \frac{dt}{dr}, \quad \text{тоді}$$

$$\frac{Q dr}{2\pi \lambda l} = -dt.$$

Після інтегрування за температурою в границях  $t_1$  і  $t_2$  і за товщиною стінки від  $r_1$  до  $r_2$  одержимо:

$$\frac{Q dr}{2\pi \lambda l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = - \int_{t_1}^{t_2} dt.$$

Остаточно рівняння теплопровідності матиме вигляд

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{2\pi \lambda l} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Після зміни радіусів на діаметри потужність теплового потоку

$$Q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi \lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{t_1 - t_2}{R}.$$

Як видно з даного виразу, розподіл температур у стінках підпорядковується логарифмічному закону.

За цією ж формулою визначимо потужність теплового потоку, що проходить крізь циліндричну стінку. Щоб знайти тепловий опір такої стінки, розіб'ємо її концентричними колами на нескінченно велику кількість шарів товщиною  $dr$ . Оскільки поверхні шарів неоднакові між собою ( $2\pi r_1 l \neq 2\pi r_n l$ ),



то приріст  $dr$  треба відносити до відповідних поверхонь. Тоді  $R$  знайдемо інтегруванням:

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{\lambda 2\pi r l} = \frac{1}{2\pi\lambda l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi\lambda l} \ln \frac{d_2}{d_1}.$$

Якщо багатошарова циліндрична стінка має  $n$  шарів діаметром від  $d_1$  до  $d_{n+1}$ , то потужність теплового потоку можна визначити за правилом складання термічних опорів, а саме:

$$Q = \frac{\pi d (t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{2\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}} = \frac{\pi d (t_{c1} - t_{c2})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}.$$

Прикладом багатошарової циліндричної стінки може бути труба з внутрішнім шаром накипу і верхнім шаром сажі.

## 2.2 Конвективний теплообмін

*Конвекцією* називають процес перенесення теплоти при переміщенні газу або рідини. Отже, конвекція можлива лише в середовищі, частинки якої легко переміщаються.

*Конвективним* називають теплообмін, обумовлений спільною дією конвективного і молекулярного переносу теплоти. Іншими словами, конвективний теплообмін здійснюється одночасно двома процесами: конвекцією та теплопровідністю.

Конвективний теплообмін між рухомим середовищем і поверхнею її розділу з іншим середовищем (твердим тілом, рідиною або газом) називають **тепловіддачею**.

Для зручності в подальшому середовища, рідина і газ об'єднують одним поняттям «рідина». Тим більше, що при інженерних розрахунках визначається теплообмін між рідиною і твердою стінкою.

Відповідно закону Ньютона – Ріхмана, тепловий потік  $Q$  від рідини до стінки пропорційний поверхні теплообміну і різниці температур між твердою стінкою  $t_c$  і рідини  $t_p$ .

$$Q = \alpha F(t_c - t_p) (B_T);$$

$$q = \alpha (t_c - t_p) B_T / m^2,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $B_T / m_{\text{газ}}^2$ ; К.

Коефіцієнт  $\alpha$  залежить від багатьох факторів: фізичних властивостей рідини, ( густини, в'язкості, теплоємності, теплопровідності та ін.), форми і розмірів поверхні, яка омивається рідиною, природи виникнення руху рідини, швидкості її руху тощо.

Газ із природною конвекцією.....	5,8---35
Газ із рухом у трубах або між ними.....	11,6----116
Пара в трубах перегрівника .....	116-----2320
Вода з природною конвекцією.....	116----1160
Вода з рухом у трубах.....	580-----11600
Кипляча вода.....	2320----116 00
Водяна пара, що конденсується.....	4640----16 00

З наведених даних видно, що гази віддають стінці теплоту значно гірше, ніж пара, а тому в теплообмінних апаратах за теплоносії слід брати воду або пару, що конденсується. Коли теплота передається від одного середовища до іншого і ці середовища відгороджені одне від одного якоюсь стінкою, то тепловий потік потрапляє на три термічних опори: при підході до стінки, при проходженні крізь товщу і на виході з неї. Рух рідини може бути вільним, з незначною і великою швидкістю.

Вільний рух рідини відбувається внаслідок різної густини нагрітих і холодних її шарів під дією земного тяжіння. Наприклад, рух рідини у водоймищах в холодну пору року. Температура води на дні озера вища ніж на поверхні, відповідно і густина води на дні буде нижча ніж на поверхні. Тому вода з поверхні під силою земного тяжіння буде опускатись на дно і переносити тепло.

Вільний рух ще називають природною конвекцією.

Вимушений рух рідин, виникає внаслідок дії зовнішніх сил (насоса, вентилятора, вітру тощо). Проте часто може проявлятися як вільний так і вимушений рух.

При ламінарному русі рідина рухається – навпаки, не перемішуючись, а при турбулентному – навпаки відбувається завихрення рідини, яке приводить до її перемішування. Тобто при ламінарному русі тепло переноситься вздовж течії, а при турбулентному як вздовж, так і впоперек потоку.

Тонкий шар рідини, який прилягає до твердої поверхні має швидкість близьку, до нуля (ламінарна плівка або гідродинамічний шар).

Температура в цьому шарі змінюється від значення, яке дорівнює температурі стінки  $t_c$ , до значення температури рідини віддалений від стінки  $t_p$ . В загальному випадку товщини гідродинамічного  $\delta$  і теплового  $\delta_t$  шарів пропорційні, а для газів практично однакові.

Поскільки товщина гідродинамічного шару залежить від режиму руху рідини, то і інтенсивність переносу тепла залежить від режиму руху рідини, а значить і товщини примежевого шару. При ламінарному русі в примежевому шарі тепло від рідини до стінки переноситься тільки теплопровідністю. При турбулентному русі примежевий шар складається з тонкої ламінарної плівки, яка поступово переходить в турбулентну. Отже, при турбулентному русі рідини тепло переноситься до твердої стінки спочатку конвекцією, а безпосередньо біля стінки теплопровідністю.

Поскільки біля поверхні твердого тіла є шар нерухомої рідини, то для нього можна використати закон Фур'є. Якщо вісь  $oy$  направлена перпендикулярно до поверхні твердого тіла, то

$$q = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right),$$

але

$$q = \alpha (t_c - t_p).$$

Поскільки ліві частини рівняння рівні, то і праві можна прирівняти і визначити  $\alpha$ .

$$\alpha = - \frac{\lambda}{t_c - t_{ж}} \left( \frac{\partial t}{\partial y} \right)$$

Цей вираз називають *диференціальним рівнянням тепловіддачі*.  
Базуючись на законах фізики, можна скласти рівняння для конвективного теплообміну

$$\frac{\partial t}{\partial T} + \frac{\partial t}{\partial x} W_x + \frac{\partial t}{\partial y} W_y + \frac{\partial t}{\partial z} W_z = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

де  $W$  – швидкість руху рідини.

При  $W_x = W_y = W_z = 0$  дане рівняння переходить у рівняння теплопровідності для твердих тіл при  $q_U = 0$

$$\frac{\partial t}{\partial T} = a \nabla^2 t = q_U,$$

де  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  – коефіцієнт температуропровідності і  $\nabla^2 t$  – оператор Лапласа.

Це рівняння описує в самому загальному вигляді всі без винятку задачі теплопровідності – клас явищ теплопровідності – явищ з однаковим механізмом теплопровідності. Вивід диференціального рівняння руху в'язкої рідини (рівняння Нав'є – Стокса) базується на другому законі Ньютона. В проекції на  $ox$  це рівняння має такий вигляд

$$\rho \left( \frac{\partial w_x}{\partial T} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \right) = \rho q_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right),$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості.

В зв'язку з складністю математичного описання процесів конвективного теплообміну часто для розв'язання конкретних задач застосовують теорію подібності – з погляду про подібність фізичних явищ.

Фізичні явища вважаються подібними, якщо вони відносяться до одного і того класу, відбуваються в геометрично подібних системах і якщо подібні всі однорідні фізичні величини, що характеризують ці явища.

Аналогічно геометричній подібності, рівняння, що описують подібні фізичні явища, після приведення до безрозмірного вигляду, стають тотожно однаковими.

Безрозмірний комплекс  $N_u = \frac{\alpha l_0}{\lambda}$  – називають числом Нуссельта, яке виражає безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі.

Числа подібності, складені тільки із заданих параметрів математичного описання задачі, називаються критеріями подібності.

Аналіз рівнянь конвективного теплообміну дозволяє отримати наступні основні критерії подібності:

$$R_e = \frac{\omega l_0}{\nu} \text{ – критерій Рейнольдса;}$$

$$G_r = \frac{q l_0^3}{\nu^3} \beta V_c \text{ – критерій Грасгофа;}$$

$$P_t = \frac{\gamma}{a} \text{ – критерій Прандтля.}$$

Величини, що входять до критеріїв подібності,  $\gamma, \alpha, \beta, \nu_c$  задаються умовами однозначності. Функціональна залежність між числами подібності називається рівнянням подібності.

При конвективному теплообміні рівняння подібності в загальному випадку має такий вигляд:

$$N_u = f(R_e, G_r, P_2).$$

Конвективні явища можна вивчати і експериментально, застосувавши метод моделювання, замість натурального об'єкта використати його модель. Щоб процеси в моделі і натуральному зразку були подібні, необхідно дотримуватися таких умов подібності:

- 1) моделювати можна тільки якісно однакові процеси, тобто ті, які мають однакову фізичну природу і описуються однаковими диференціальними рівняннями;
- 2) умови однозначності повинні бути однакові в усьому, крім числових значень постійних, які містяться в цих умовах;
- 3) однойменні критерії подібності для моделі і зразка повинні мати однакові числові значення.

В тих випадках, коли повну подібність між моделлю і зразком встановити неможливо, застосовують наближене моделювання (автомодельність). Крім того, можна застосувати локальне моделювання. Подібність встановлюється не в усьому агрегаті, а тільки в окремих його частинах.

Процеси теплообміну часто супроводжуються переносом маси однієї речовини в іншу, тобто масообміном (наприклад, при випаровуванні, сушінні, конденсації пари із парогазової суміші та ін.).

Перенос речовини в суміші називають дифузією.

Густину потоку маси речовини визначають **законом Фіка**.

$$i = D_c \frac{\partial C}{\partial n},$$

де  $D_c$  – коефіцієнт дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$C$  – місцева концентрація даної речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$n$  – напрям нормалі до поверхні однакової концентрації;

В руховому середовищі речовина переноситься не тільки дифузією, а й конвекцією.

Рівняння конвективного масообміну отримують на основі матеріального балансу елемента об'єму в потоці рідини:

$$\frac{\partial c}{\partial x} w_x + \frac{\partial c}{\partial y} w_y + \frac{\partial c}{\partial z} w_z = D_c \left( \frac{\partial^2 C^1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C^1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C^1}{\partial z^2} \right)$$

Конвективний масообмін між рідкою і газоподібною фазами називають масовіддачею. Для практичних розрахунків масовіддачі використовують рівняння

$$i = \beta_c (C_c - C_p),$$

де  $\beta_c$  – коефіцієнт масовіддачі, віднесений до різниці концентрації,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$C_c$  – концентрація речовини, що переноситься, на поверхні розділу фаз,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$C_p$  – концентрація речовини, що переноситься, на відстані від поверхні розділу фаз,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Якщо концентрацію речовини в газоподібній фазі виразити через її пропорційний тиск, то рівняння масовіддачі прийме вигляд

$$i = \frac{\beta_c}{RT} (p_0 - p_p) = \beta_p (p_c - p_p).$$

*Тепловіддача при протіканні рідини в трубах.* Вивчення процесу тепловіддачі в трубах представляє значний практичний інтерес, оскільки труби є елементом різних теплообмінних апаратів.

Розглянемо деякі особливості протікання рідини в прямій трубці. Якщо рідина надходить в трубу з великого об'єму і стінки труби на вході заокруглені, розподіл швидкості на вході є рівномірним. При русі рідини уздовж труби у стінок утворюється гідродинамічний граничний шар, товщина якого за течією зростає і стає рівною радіусу труби. У цьому місці граничний шар заповнює собою увесь переріз труби і в ній встановлюється постійний розподіл швидкостей, характерний для даного режиму протікання (Рис. 2.3 а, б)

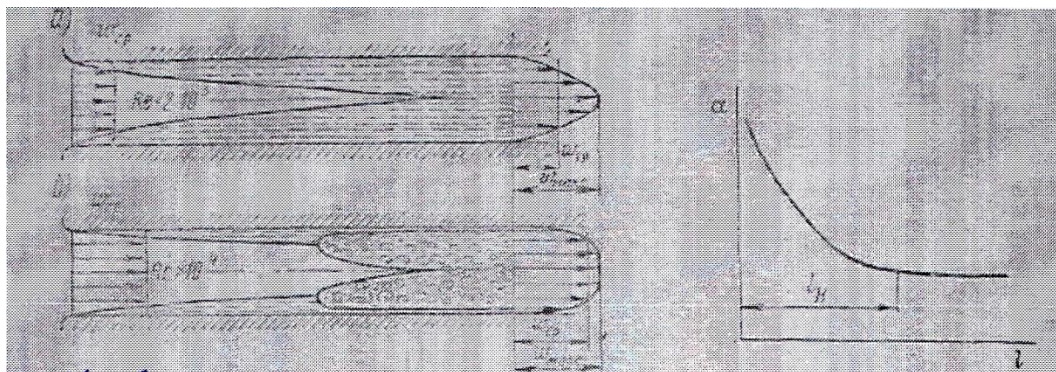


Рис. 2.3 Стабілізація потоку рідини в трубці

*в середині труби і ламінарний (а) і турбулентний (б) рух.*

Рис. 2.4 Зміна  $\alpha$  по довжині труби.

Коефіцієнт тепловіддачі по довжині труби змінюється (Рис. 2.3, б): максимальне значення  $\alpha$  біля входу в трубу, потім  $\alpha$  зменшується і на ділянці стабілізації набуває певного середнього значення, яке залишається незмінним по усій довжині труби, оскільки вплив окремих чинників по довжині

згладжується. Залежність  $\alpha = f(l)$ , представлена на Рис. 2.3 б, якісно однакова як при ламінарному, так і турбулентному граничних шарах.

*Тепловіддача при поперечному обтіканні пучка труб.*

Багато теплообмінних апаратів виконують у вигляді пучків (пакетів) труб, що омиваються рідиною. Труби в пучках розташовують в коридорному, або в шаховому порядку.

### **2.3 Масообмін**

В природі і техніці процеси теплообміну можуть супроводжуватись переносом маси однієї речовини в іншу, тобто *масообміном*. Наприклад, при випаровуванні рідини чи твердого тіла (сублімація) атоми або молекули, в наслідок отримання достатньої енергії від оточуючих атомів чи молекул, покидають рідину чи тверде тіло і несуть з собою певну кількість енергії, що спричиняє їх охолодження. При конденсації в рідину повертаються молекули збільшуючи її внутрішню енергію.

Аналогічні явища відбуваються з пористими матеріалами – деревиною, цеглою тощо. При їх висушуванні волога виходить з речовини, а при зволоженні – навпаки, заходить в її пори. В приведених прикладах наявний простий масообмін – *масовіддача*. Однак речовина може переноситись із однієї фази в іншу через поверхню розділу, складним шляхом – *масо передачею*.

Масообмін відбувається *шляхом дифузії*. Дифузією називається процес переміщення молекул речовини однієї фази в міжмолекулярний простір іншої фази. Аналогічно теплообміну, дифузія може відбуватись як молекулярним, так і конвективним шляхом. Молекулярна – обумовлена тепловим рухом молекул. Конвективна – виникає при переміщенні окремих фаз відносно одна іншої в просторі.

В реальних умовах часто масообмін здійснюється конвективним шляхом і в одночас молекулярною дифузією. В такому разі його називають *конвективним масообміном*.



Доведено, що процес дифузії речовини, як і теплопровідність, мають аналогічне математичне описання. Дійсно механізм переносу теплоти і маси однаковий.

Тоді у відповідності із законом Фур'є потужність теплового потоку

$$dq = -\lambda dF \frac{\partial \tau}{\partial x}$$

Закон молекулярної чи концентраційної дифузії – закон Фіка – записується так

$$dM_D = -D \left( \frac{dC_i}{dx} \right) dF,$$

де  $dM_D$  – потік або кількість маси, переданої шляхом молекулярної дифузії за секунду/кг;

$D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії одного компонента по відношенню до іншого, м<sup>2</sup>/с;

$C_i$  – концентрація речовини, тобто відношення маси компонента до його об'єму, кг/м<sup>3</sup>;

$dC_i/dx$  – градієнт концентрації, кг/м<sup>3</sup>.

Знак мінус в рівнянні свідчить, що відповідно до закону Фіка, переміщення речовини відбувається в сторону зменшення градієнта концентрації.

Коефіцієнт молекулярної дифузії росте із збільшенням температури і зменшується із зростанням тиску. Він також залежить і від пропорційного співвідношення компонентів суміші: якщо концентрація якогось компонента мала, то залежність ця слабка. В технічних розрахунках цим нехтують.

Якщо температура суміші не однакова, то виникає *термічна дифузія* (ефект Соре), відповідно до якого: якщо маси молекул компонентів різні, більш важкі молекули прагнуть перейти в холодні області; при однакових масах молекул в холодні області прагнуть більш великі по розміру молекули. Термодифузія утворює градієнт концентрації, однак цьому завадить процес концентраційної дифузії.

Також може відбуватись *бародифузія*, яка виникає внаслідок неоднорідності тиску компонентів суміші. В цьому випадку важкі молекули прагнуть перейти в область підвищеного тиску, а легкі – пониженого. Як термодифузія, бародифузія, при наявності різниці концентрації речовини, супроводжується звичайним переносом маси.

В кінцевому рахунку закон Фіка має такий вигляд

$$M_D = D \frac{C_1 - C_2}{\delta} F,$$

де  $\delta$  – відстань між шарами компонентів, що розглядаються, в перпендикулярному напрямку руху речовини;

$C_1$  і  $C_2$  – концентрація речовини в першому і другому шарах.

Якщо конвективний масообмін відбувається між рухомих середовищем і поверхнею розділу іншого середовища (твердим тілом, рідиною чи газом), то масовіддача описується рівнянням аналогічним рівнянню конвективної тепловіддачі (закон Ньютона-Ріхмана)

$$d\Phi = \alpha \Delta T_{cp} a F,$$

або рівнянням

$$dM_n = \beta \Delta C_{cp} dF,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт масовіддачі для дифунзуючих речовин, в м/с;

$\Delta C_{cp}$  – середня різниця концентрації на межі розділу фаз, в кг/м<sup>3</sup>.

При стаціонарному процесі масообміну

$$B = - (D / \Delta C_{cp}) (\partial C / \partial x), \text{ а}$$

$$A = - (\lambda_{пл} / \Delta t_{cp}) (\partial T / \partial x),$$

де  $\lambda_{пл}$  – густина плівки межі розділу фаз.

При нестационарному процесі масообміну враховується швидкість зміни концентрації на межі розділу фаз.

В складних умовах масообміну розрахунки ведуть з використанням формул теплопередачі на основі критеріїв подібності.

## 2.4 Променевий теплообмін

У природі всі нагріті тіла здатні генерувати променисту енергію широкого діапазону довжини хвиль: від невидимого ультрафіолетового діапазону (з довжиною хвиль менше ніж 0,4мкм), видимого світлового діапазону (з довжиною хвиль 0,4-0,76мкм), і невидимого інфрачервоного діапазону (з довжиною хвиль 0,76-420мкм), а також рентгенівських і космічних променів. Причиною виникнення променистої енергії є атомні молекулярні процеси, що виникають у твердому тілі під впливом температури, його фізичних властивостей та будови. Промениста енергія поширюється в просторі зі швидкістю світла у вигляді електромагнітних хвиль і потоку частинок – квантів і фотонів. Інтенсивність випромінювання та діапазон довжини електромагнітних хвиль залежить від фізичних властивостей випромінюючого тіла і його абсолютної температури.

Обмін тепловою енергією в просторі між тілами з різною температурою за допомогою випромінювання називається променистим – радіаційним теплообміном. Перенесення тепла за допомогою променистої енергії відбувається в результаті перетворення внутрішньої енергії нагрітої речовини в енергію випромінювання, поширення випромінювання в просторі та його поглинання іншими речовинами. Промениста енергія або її частина, потрапляючи на поверхню іншого менш нагрітого тіла, повторно трансформується в теплову енергію, результатом такого теплопереносу є підвищення температури холодного тіла.

Характерною рисою променистого теплообміну є те, що обмін теплом між гарячими та холодними тілами відбувається безконтактним способом.

Яскравим прикладом дії механізму променистого теплообміну є перенесення тепла від Сонця до Землі, при якому в літній полудень на поверхню Землі на широті м. Харкова потрапляє сонячної енергії близько  $1350 \text{ Вт/м}^2$ .

Прикладом промислового застосування процесу, у якому переважає теплопередача випромінювання, є трубчасті печі в нафтопереробній,

промисловості, у яких при згорянні нафти або газу в камері згорання досягається температура більша ніж  $1600^{\circ}\text{C}$ , при цьому основна частина тепла передається до труб переважно променистою енергією – радіацією, а інша частина – конвекцією. Кількість енергії, що випромінює одиниця поверхні нагрітого тіла в одиницю часу для всього діапазону випромінюваних хвиль, називається випромінювальною здатністю (щільністю потоку), при цьому

$$E = Q/F$$

Тіла, що нагріваються в результаті дії променистої енергії, здатні її частково поглинати, відбивати та пропускати через тіло.

Якщо загальна кількість енергії, що попадає на тіло, дорівнює  $Q$ , кількість поглиненої енергії дорівнює  $Q_A$ , кількість відбитої енергії дорівнює  $Q_R$ , а кількість пропущеної через тіло енергії дорівнює  $Q_D$ , то можна скласти рівняння теплового балансу

$$Q_A + Q_R + Q_D = Q$$

Розділивши складові рівняння на  $Q$ , одержимо рівняння теплового балансу, виражене через відносні частинки поглиненої, відбитої та пропущеної тілом теплової енергії, при цьому

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = A + R + D = 1,$$

де  $A$  – поглинальна здатність тіла;  $R$  – відбивальна здатність;  $D$  – пропускна здатність (прозорість) тіла.

Тіло, що повністю поглинає всю падаючу на нього енергію, називається абсолютно чорним, при цьому  $A=1$ ,  $R=D=0$ .

Тіло, що повністю відбиває всю падаючу на нього енергію, називається абсолютно білим (дзеркальним), при цьому

$$R = 1, A = D \approx 0.$$

Тіло, що пропускає всю падаючу на нього енергію, називається абсолютно прозорим (діатермічним), при цьому

$$D = 1, A = R = 0.$$

У природі не існує тіл абсолютно чорних, абсолютно білих та абсолютно прозорих, всі тіла в більшій або меншій мірі поглинають, відбивають і пропускають тепло, тому їх називають сірими. Величини  $A$ ,  $R$ ,  $D$  залежить від фізичних властивостей та фазового стану тіла, стану його поверхні (гладка або шорсткувата), температури, довжини хвиль і спектра енергії, що попадає на нього.

Залежність між випромінювальною та поглинальною здатністю тіл встановив Кірхгоф.

*Відповідно до закону Кірхгофа відношення випромінювальної здатності тіл до їх поглинальної здатності для всіх тіл незалежно від їх природи є однаковим і залежить тільки від температури*

$$\frac{E_0}{A_0} = \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots f(T),$$

де  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  – випромінювальна здатність абсолютно чорного та сірих тіл відповідно;  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  – поглинальна здатність абсолютно чорного та сірих тіл відповідно.

Тільки для абсолютно чорного тіла поглинальна здатність  $A_0 = 1$ , то воно при будь-якій температурі має максимальну випромінювальну здатність. Інші сірі тіла з такою самою температурою будуть випромінювати або поглинати меншу кількість тепла.

Відношення випромінювальної здатності будь-якого сірого тіла до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла за однакових умов називають ступенем чорноти тіла, при цьому

$$\varepsilon = E/E_0,$$

де  $E_0$ ,  $E$  – випромінювальна здатність абсолютно чорного та сірого тіла відповідно при однаковій температурі.

Ступінь чорноти різних тіл змінюється в межах від нуля до одиниці та залежить від їхньої природи, температури й стану поверхні. У найбільшій мірі поглинає тепло сажа трубна ( $\varepsilon = 0,95 - 0,97$ ), у найменшій мірі – срібло поліроване ( $\varepsilon = 0,02 - 0,03$ ). У найбільшій мірі пропускають тепло

через себе алмаз та кварц, тому вони є найбільш прозорими, більш того, ці та деякі інші кристалічні речовини здатні пропускати променисту енергію у вузькому діапазоні довжин хвиль, що дозволяє використовувати їх у приладобудуванні як світлові фільтри.

Кірхгофом встановлено, що *чим вища випромінювальна здатність тіла, тим більша його поглинальна здатність і навпаки*. Відзначимо також, що *чим менший ступінь чорноти тіла, тим менша його випромінювальна та поглинальна здатність*.

Ступінь чорноти полірованих поверхонь металів завжди менша ступеня чорноти неpolірованих поверхонь.

**Закон Стефана – Больцмана.** Залежність випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла від його температури експериментально встановив Й.Стефан (1879 р.) і теоретично довів Л.Больцман (у1881 р.). Відповідно до закону Стефана – Больцмана *випромінювальна здатність нагрітого абсолютно чорного тіла пропорційна четвертому степеню його абсолютної температури*, тобто

$$E_0 = C_0(T/100)^4$$

де  $C_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, згідно з експериментальними даними  $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K}^4)$ .

У зв'язку з тим, що випромінювальна здатність сірого й абсолютно чорного тіла пов'язана між собою залежністю, то стосовно до сірих тіл рівняння Стефана – Больцмана можна виразити формулою

$$E = 5,67\varepsilon C_0(T/100)^4,$$

$\varepsilon$  – ступінь чорноти сірого тіла.

З рівняння випливає, що для збільшення випромінювальної здатності сірого тіла необхідно підвищити його температуру.

**Закон Ламберта.** Нагріті тіла, що випромінюють енергію, та тіла, що поглинають теплоту, розташовані в просторі складним способом.

Закон Ламберта встановлює залежність між кількістю тепла, що випромінює нагріте тіло у напрямку холодного тіла з відомою поверхнею й певним чином орієнтованого в просторі і його поглинанням.

Відповідно до **закону Ламберта** кількість теплової енергії, що випромінюється нагрітим тілом у напрямку холодного тіла, пропорційна випромінювальній здатності нагрітого тіла, поверхні випромінювання, куту нахилу поверхонь та тілесному куту, яким охоплюється поглинаюче тепло тіло з поверхні випромінюючого тіла, при цьому

$$Q_1 = 1/EF_1 d \cos b,$$

де  $E$  – випромінювальна здатність нагрітого тіла поверхнею  $F_1$ ;  $d$  – тілесний кут, під яким з нагрітого тіла видно поверхню тіла, що поглинає тепло;  $b$  – кут, утворений нормаллю до випромінюючої поверхні та прямої, що з'єднує центри обох поверхонь.

**Променистий теплообмін у теплообмінних установках.** Теплообмін між твердими тілами, у багатьох теплообмінних установках відбувається променистий теплообмін у замкнутому просторі між тілами, що мають різні температури та різну площу поверхонь (наприклад, у просторі трубчастої печі або між апаратами у цеху).

У цьому випадку тепло, передане тепловим випромінюванням між нагрітими тілами, визначають за формулою

$$Q = 5,67 \varepsilon_{np} F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де  $T_1$  і  $T_2$  – температура поверхні випромінюючого (нагрітого) та поглинаючого тепло (холодного) твердого тіла відповідно, при цьому  $T_1 > T_2$ ,  $F_p$ - розрахункова поверхня теплообміну, що залежить від взаємного розташування тіл;  $\varepsilon_{np}$  – приведений ступінь чорноти випромінюючого та поглинаючого тіл.

Якщо поглинаюче тіло перебуває усередині випромінюючого тіла та охоплюється ним (наприклад, екран із труб перебуває в просторі трубчастої

печі), то за розрахункову беруть сумарну поверхню поглинаючого тіла, а приведений коефіцієнт ступеня чорноти знаходять за формулою

$$\varepsilon = 1 / \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right],$$

де  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  - ступінь чорноти випромінюючого і поглинаючого тепло тіл.

Якщо нагріте тіло перебуває в замкненому просторі холодного тіла, при цьому  $F_2 \gg F_1$  (наприклад, нагрітий апарат площею  $F_1$  перебуває в приміщенні цеху із площею поверхні стін  $F_2$ ), то як розрахункову беруть площу зовнішньої поверхні нагрітого апарата, тобто  $F_2 = F_1$ .

Для теплообмінних апаратів кожухотрубчастих та типу “труба у трубі”, коли у внутрішніх трубах проходить високотемпературний теплоносій, а в міжтрубному просторі проходить теплоносій, що нагрівається (тепловий потік спрямований від внутрішніх труб до зовнішніх), приведений ступінь чорноти випромінюючих тіл залежить від площі поверхні та ступеня чорноти кожного з тіл, при цьому

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + F_2 / F_1 \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right],$$

де  $F_1, F_2$  – площа поверхні охоплюваного тіла та тіла, що охоплює, відповідно,  $F_1 < F_2$ .

## 2.5 Теплообмінні апарати

**Загальні відомості.** Процеси теплообміну мають велике значення в режимі роботи котелень. Теплообмінним апаратом називають пристрій, в якому одна рідина – гаряче середовище, передає теплоту іншій рідині – холодному середовищу. В якості теплоносіїв в теплових апаратах котелень використовуються різноманітні краплинні і пружні рідини в самому широкому діапазоні тисків і температур. Процеси теплообміну в котельнях здійснюються в теплообмінних апаратах різних типів і конструкцій.

**Теплообмінні апарати** – пристрої, в яких здійснюється теплообмін між двома або декількома теплоносійми або між теплоносійми і твердими



тілами (стілкою, насадкою). Використовуються у багатьох галузях промисловості. За іншим визначенням, теплообмінний апарат – пристрій для передавання тепла від одного робочого середовища до іншого.

До теплообмінного апарату належать випарники, економайзери, льодогенератори, парогенератори, повітрянагрівачі, градирні тощо. Застосовують теплообмінні апарати у теплоенергетиці, промисловості, сільському господарстві, системах вентиляції та опалення тощо.

За принципом роботи апарати ділять на регенеративні, змішувальні і рекуперативні. У регенеративних апаратах гарячий теплоносіє віддає свою теплоту акумуляційному пристрою, який в свою чергу періодично віддає теплоту іншій рідині – холодному теплоносію, тобто одна і та ж поверхня нагріву омивається то гарячою, то холодною рідиною. В змішувальних апаратах передача теплоти від гарячої до холодної рідини відбувається при безпосередньому змішуванні обох рідин, наприклад змішуючи конденсатори.

Особливо широкий розвиток у всіх областях техніки отримали рекуперативні апарати, в яких теплота від гарячої до холодної рідини передається через роздільну стінку.

Теплообмінні апарати можуть мати найрізноманітніші призначення – парові котли, конденсатори, пароперегрівачі, прилади центрального опалення і т. д. Теплообмінні апарати в більшості випадків значно відрізняються один від одного як за своїми формами та розмірами, так і за робочими тілами, які використовуються. Незважаючи на велику різноманітність теплообмінних апаратів, основні положення теплового розрахунку для них залишаються спільними.

У теплообмінних апаратах рух рідини здійснюється за трьома основними схемами. Якщо напрямок руху гарячого і холодного теплоносіїв співпадають, то такий рух називається прямотоком.

Якщо напрямок руху гарячого теплоносія протилежний руху холодного теплоносія, то такий рух називається протиточним. Якщо ж гарячий

теплоносії рухається перпендикулярно руху холодного теплоносія, то такий рух називається перехресним.

### **Кожухотрубчасті теплообмінники**

Основними елементами кожухотрубчастих теплообмінників є пучки труб, трубні решітки, корпус, кришки, патрубки. Кінці труб кріпляться в трубних ґратках розвальцьовуванням, зварюванням або пайкою.



Рис. 2.5 Зовнішній вигляд кожухотрубчастого теплообмінника.

Для збільшення швидкості руху теплоносіїв з метою інтенсифікації теплообміну нерідко встановлюють перегородки як і в трубному, так і в міжтрубному просторах.

Кожухотрубчасті теплообмінники можуть бути вертикальними, горизонтальними і похилими відповідно до вимог технологічного процесу або зручності монтажу. Залежно від величини температурних значень трубок і корпусу застосовують кожухотрубчасті теплообмінники жорсткої, напівжорсткої і нежорсткої конструкції.

Апарати жорсткої конструкції використовують при порівняно невеликих різницях температур корпусу і пучка труб; ці теплообмінники відрізняються простотою будови.

У кожухотрубчастих теплообмінниках нежорсткої конструкції передбачається можливість деякого незалежного переміщення теплообмінних трубок і корпусу для усунення додаткових напружень від температурного впливу. Мала жорсткість конструкції забезпечується сальниковим ущільненням на патрубках або корпусі, пучком U - подібних труб, рухомою трубною ґраткою закритого і відкритого типу.

В апаратах напівжорсткої конструкції температурні деформації компенсуються осьовим стисненням або розширенням спеціальних компенсаторів, установлених на корпусі. Напівжорстка конструкція надійно забезпечує компенсацію температурних деформацій, якщо вони не перевищують 10-15 мм, а умовний тиск в міжтрубному просторі становить не більше  $2,5 \text{ кгс / см}^2$ .

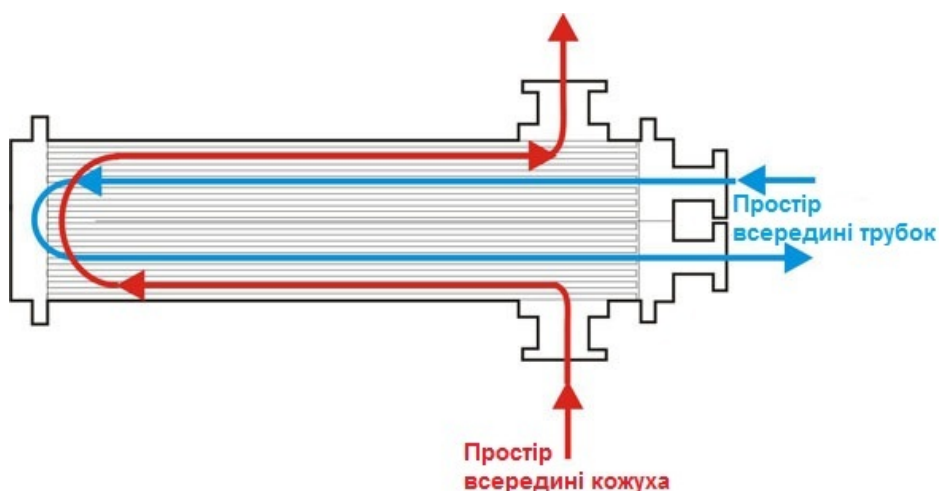


Рис. 2.6 Принцип роботи кожухотрубчастого теплообмінника.

Конструкція кожухотрубчастого теплообмінного апарату повинна дозволити виконувати очищення трубного простору від забруднюючих відкладень як хімічним, так і механічним способами, труби при цьому повинні бути достатньо жорсткими, щоб уникнути їх істотного прогину після кількох років

експлуатації. Таким вимогам відповідають труби із зовнішнім діаметром 12 мм і товщиною стінки 1 мм.

#### *Двотрубчасті теплообмінники типу «труба в трубі»*

Апарати такого типу містять декілька послідовно з'єднаних трубчастих елементів, що утворені двома концентрично розміщеними трубами (Рис. 2.7), в яких один теплоносій рухається внутрішніми трубами 1, а інший – кільцевим зазором між внутрішніми і зовнішніми 2 трубами. Діаметр внутрішніх труб здебільшого становить 57 – 108 мм, а зовнішніх – 76 – 159мм. Внутрішні труби з'єднуються патрубками 3, а зовнішні - патрубками 4.

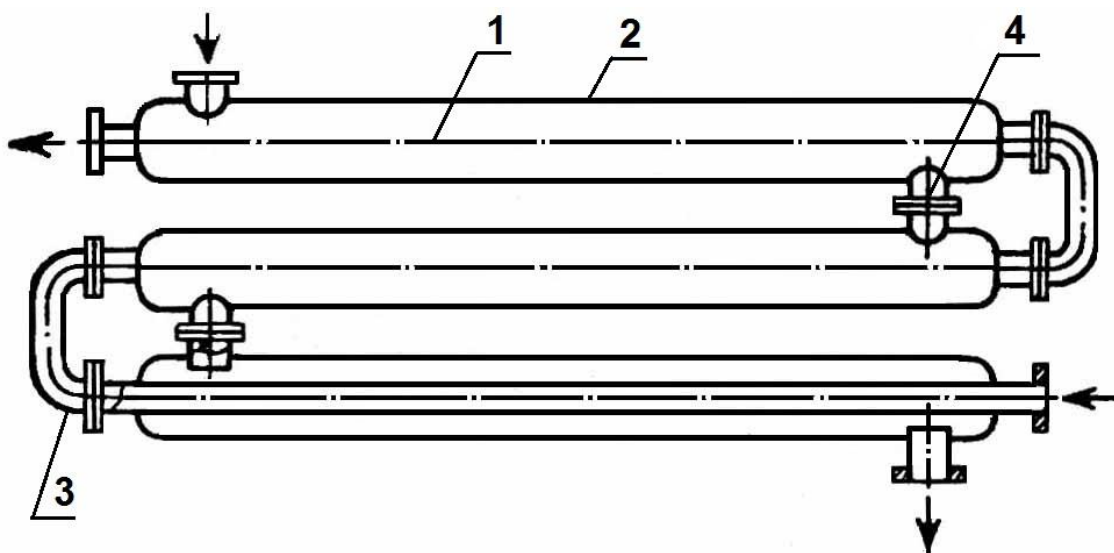


Рис. 2.7 Теплообмінник типу «труба в трубі»:

*1 – внутрішні труби; 2 – зовнішні труби; 3 – патрубок внутрішніх труб; 4 – патрубок зовнішніх труб.*

У двотрубчастих теплообмінниках навіть за невеликих витрат досягають достатньо високих швидкостей рідини (1 – 1,5 м/с), оскільки поперечний переріз трубного і міжтрубного простору не великий, і тому отримують вищі коефіцієнти теплопередачі і більші теплові навантаження на одиницю маси апарата ніж у теплообмінниках інших конструкцій. Зростання швидкості теплоносія зменшує можливість відкладення забруднень на поверхні теплообміну. Апарати цього типу ефективно працюють за невеликих витрат теплоносія і за високих тисків, у разі необхідності

збільшення поверхні теплообміну їх виконують з декількох паралельних секцій.

До недоліків двотрубчастих теплообмінників належать: громіздкість, металоємність та невелика площа теплообміну.

### *Змійовикові теплообмінники*

Теплоносій, що рухається змійовиком з прямих труб спочатку направляють в загальний колектор, з якого він поступає в паралельні секції труб і видаляється через загальний колектор. У разі такого паралельного включення секцій зменшується швидкість і довжина шляху потоку, через що знижується гідравлічний опір апарата.

Оскільки тепло передається вільною конвекцією, то тепловіддача в між трубному просторі є мало інтенсивною. Тому теплообмінники такого типу працюють за низьких теплових навантажень і забезпечують поверхню нагрівання до 10-15 м<sup>2</sup>.

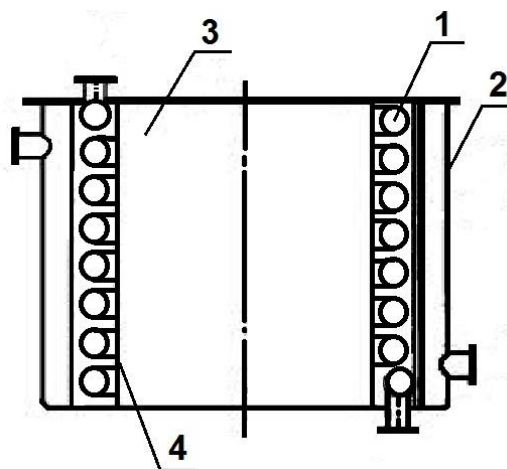


Рис. 2.8 Змійовиковий теплообмінник:

*1 – спіральний змійовик; 2 – корпус апарата; 3 – внутрішній стакан; 4 – конструкція для кріплення змійовика*

На Рис. 2.8 показана схема зануреного теплообмінника, в якому крапельна рідина, газ або пара рухаються спіральним змійовиком 1, виконаним з труб діаметром 15-75 мм, зануреним в рідину, яка знаходиться в корпусі 2 апарата. Труби змійовика кріпляться на конструкції 4, можуть бути також прямими, з'єднаними патрубками. Коефіцієнт тепловіддачі ззовні

змійовика є незначним, оскільки внаслідок великого діаметра корпусу, швидкість рідини є малою. Для його збільшення підвищують швидкість рідини в корпусі, встановлюючи в ньому внутрішній стакан 3, за рахунок чого зменшується корисний об'єм корпусу апарата. Великий об'єм рідини в корпусі має свої позитиви, оскільки забезпечує стійку роботу теплообмінника.

Якщо нагріваючим агентом є насичена водяна пара, то відношення довжини змійовика до його діаметра не повинне перевищувати допустимої межі, оскільки накопичення парового конденсату в нижній частині змійовика спричинить значне зменшення інтенсивності теплообміну та значного зростання гідравлічного опору.

Перевагами таких апаратів є: простота конструкції, дешевизна, доступність для очищення і ремонту, зручність роботи за високих тисків і в хімічно-активних середовищах.

### *Пластинчасті теплообмінники*

Цей тип теплообмінників найбільш часто використовується в котельнях. Пластинчастий теплообмінник – це пристрій, в якому здійснюється передача теплоти від гарячого теплоносія до холодного середовища через сталеві гофровані пластини, які встановлені в раму і стягнуті в пакет.

Така конструкція теплообмінника забезпечує ефективну компоновку теплообмінної поверхні і, відповідно, малі габарити самого апарату.

У теплообмінниках фірми "Ріден" застосовуються пластини датської компанії Sondex. Особлива увага, приділяється якості поверхні пластин, що служить гарантією тривалої служби теплообмінника і знижує швидкість його забруднення.

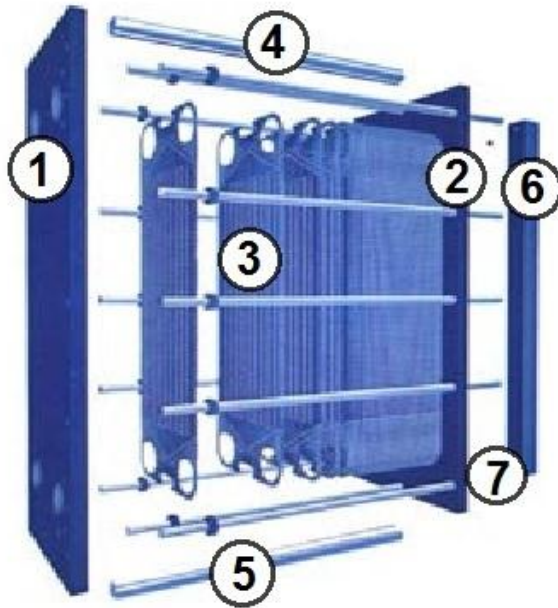


Рис. 2.9 Пластинчастий теплообмінник.

*1 - нерухома плита з приєднувальними патрубками; 2 - задня притискна плита, 3 - теплообмінні пластини з ущільнювальними прокладками; 4 - верхня напрямна; 5 - нижня напрямна; 6 - задня стійка; 7 - комплект різьбових шпильок.*

Всі пластини в пакеті однакові, тільки розвернуті одна за одною на 180, тому при стягуванні пакета пластин утворюються канали, по яких і протікає робота рідина. Таке розташування пластин забезпечує чергування гарячих і холодних каналів.

У процесі теплообміну рідини рухаються назустріч одна іншій. У місцях їх можливого перетікання знаходиться або сталева пластина, або подвійне гумове ущільнення, що практично виключає змішання рідин.

Вид гофрування пластин і їх кількість, залежать від експлуатаційних вимог до пластинчастого теплообмінника. Матеріал, з якого виготовляються пластини, може бути різним: від недорогої нержавіючої сталі до різних сплавів, здатних працювати з агресивними рідинами.

Матеріали для виготовлення прокладок ущільнювачів також розрізняються залежно від умов застосування пластинчастих

теплообмінників. Зазвичай використовуються різні полімери на основі натуральних або синтетичних каучуків.

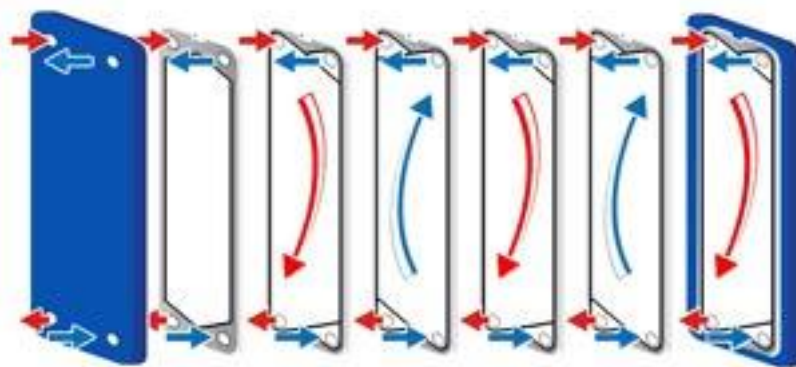


Рис. 2.10 Схема розподілу потоків у пластинчастому теплообміннику.

### *Ребристі теплообмінники*

Теплообмінні апарати з реберними поверхнями є компактними і ефективними. Ребра з боку теплоносія з низькими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі значно зменшують теплові навантаження ребристих апаратів. Поперечні ребра на трубах теплообмінників можуть мати різну форму: прямокутну (Рис. 2.11 а), трапецієвидну (Рис.2.11 б), а також поздовжню, дротяну, гольчасту, спіральну тощо. Частіше використовуються для нагрівання повітря і для його охолодження труби з поперечними ребрами (калорифери) (Рис. 2.12)

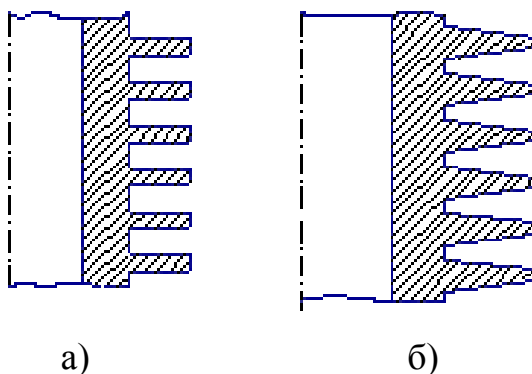


Рис.2.11 Елементи ребристого теплообмінника:  
а) – прямокутні ребра; б) – трапецієподібні ребра.



Для нагрівання повітря здебільшого використовують насичену водяну пару, що подається в колектор 1 і рухається пучком ребристих труб 2. Конденсат виводиться з колектора 3. Для турбулізації пограничного шару під час використання поздовжніх ребер останні на певній відстані надрізають.

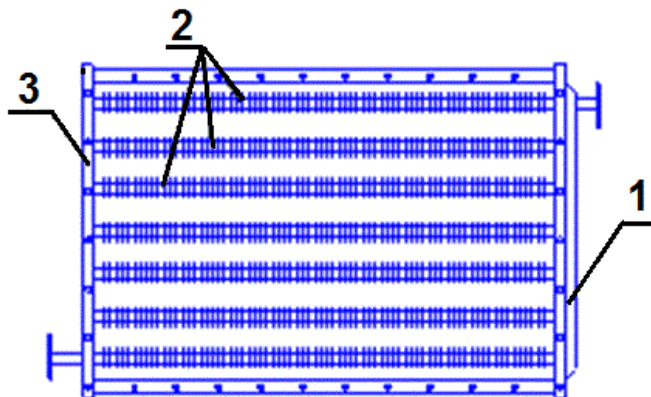


Рис. 2.12 Пластинчатий калорифер:

*1 – колектор для входу пари; 2 – ребриста трубка; 3 – колектор для прийому конденсату.*

### *Спіральні теплообмінники*

До компактних апаратів, що забезпечують високі швидкості теплоносіїв (для рідини 1-2 м/с) за невеликого гідравлічного опору, (порівняно з трубчастими теплообмінниками інших типів) належать спіральні теплообмінники. Для нагрівання і охолодження газів використовують спіральні теплообмінники з перехресними потоками. Однак частіше використовують протитокові апарати, схема якого показана на Мал.... Його поверхня теплообміну утворюється двома металевими листами 1 і 2, згорнутими по спіралі, внутрішні кінці яких приварені до суцільної перегородки 3, а їхні кінці приварені одні до інших. З кінців спіралі закриті встановленими на прокладках плоскими кришками 4 і 5. Тобто всередині апарата утворюється два ізольованих один від іншого спіральні канали (2-8 мм завширшки), якими рухаються теплоносії. Теплоносій I поступає через нижній штуцер і виходить через боковий в правій кришці теплообмінника, а теплоносій II входить в лівий боковий штуцер і виходить через верхній.

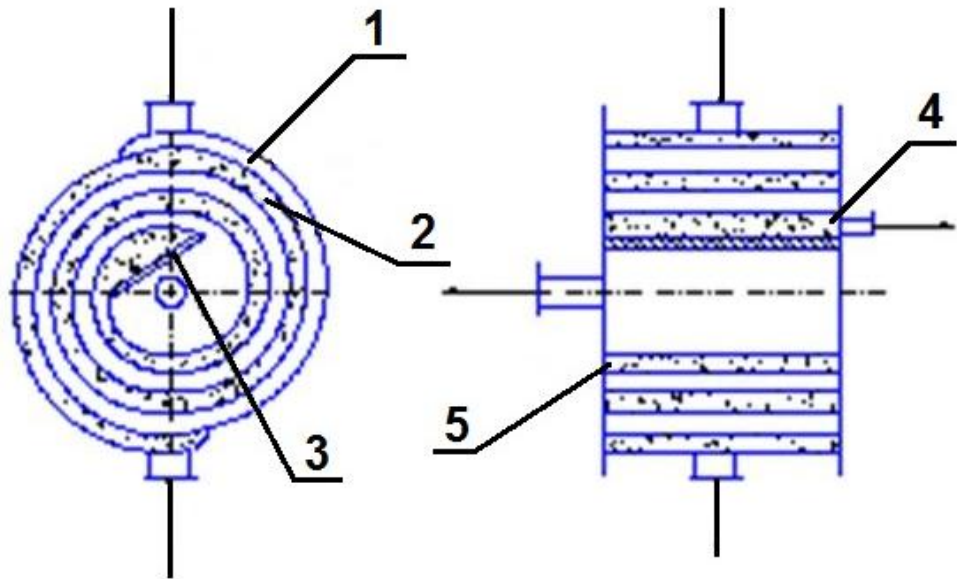


Рис.2.13 Спіральний теплообмінник:

*1, 2 – листи, що згорнуті по спіралі; 3 – перегородка; 4, 5 – кришки.*

Спіральні теплообмінники мають наступні недоліки: є складними у виготовленні, працюють за обмежених надлишкових тисках (не вище 10 атмосфер), оскільки намотка спіралей ускладнюється із зростанням товщини листів, а також виникають проблеми з виготовленням щільного з'єднання між спіралями і кришками.

## РОЗДІЛ III ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ

### 3.1 Загальна характеристика палива

Вся історія розвитку людства пов'язана із здобуттям і використанням енергії. З прадавніх часів люди навчилися використовувати різні види палива для обігріву житла і приготування їжі. У пізніші періоди теплову енергію використовували для виготовлення з міді, бронзи, заліза і інших металів предметів побуту, інструментів, зброї та інше.

Поняття "паливо" включає всі речовини, які дають при спалюванні певну кількість теплоти. Найбільш поширені в природі і добуваються промисловим способом такі види палива, як нафта і нафтопродукти (бензин, мазут, дизельне паливо), вугілля, природний горючий газ, деревина і рослинні відходи (солома, лушпиння і тому подібне), торф, горючі сланці, а в даний час і речовини, що використовуються в ядерних реакторах на АЕС. Класифікують паливо за його агрегатним станом: *тверде* (вугілля, торф, деревина, сланці), *рідке* (нафта і нафтопродукти) і *газоподібне* (природний газ). Також можна розділити паливо і по його походженню: рослинне, мінеральне і продукти промислової переробки.

Залежно від характеру використання паливо умовно поділяють на енергетичне (для отримання теплової і електричної енергії) і технологічне (використовується в плавильних, опалювальних та інших печах, а також як сировина для хімічної промисловості).

Цінність палива визначають за такими факторами:

1. Теплота згоряння, або *теплотворна здатність*, тобто кількість тепла, що виділяється при повному згорянні 1 кг твердого або рідкого палива, або 1 м<sup>3</sup> газоподібного. Теплота згоряння обумовлює і визначає транспортабельність палива.
2. Теплопродуктивність ( $t_{max}$ ) – максимальна температура горіння, що розвивається при повному згорянні палива в умовах, коли тепло, що

виділяється, повністю витрачається на нагрів продуктів згоряння, що утворюються. Теплопродуктивність палива визначає ефективність його застосування у високотемпературних процесах.

3. Вміст баласту, тобто мінеральної маси і вологи, в твердому і рідкому паливі, азоту і двоокису вуглецю – в газоподібному. Наявність баласту в паливі знижує його теплоту згоряння. При великому вмісту баласта помітно знижується також теплопродуктивність палива.

4. Вміст шкідливих домішок нечистот, що знижує цінність палива пального, в особливо технологічного і побутового.

5. Вихід у летких речовин і обвуглероженого залишку (коксу) при нагріванні твердого палива, що визначає легкість його займання запалювання, а також доцільність використання в технологічних процесах.

6. Зручність спалювання палива і витрата енергії, пов'язана з підготовкою палива до використання.

7. Ступінь складності розвідки і труднощі добування палива, що визначають об'єм капіталовкладень в паливну промисловість і собівартість пального.

8. Віддаленість родовищ палива від районів його споживання, обумовлює об'єм капіталовкладень в засоби кошти транспорту і вартість перевезень пального.

Паливо складається з горючої маси і баласту. При всій різноманітності властивостей різних видів палива горюча маса включає в основному чотири елементи: вуглець, водень, кисень і сірку. Від співвідношення цих елементів в горючій масі і вмісту в паливі баласту залежать його основні характеристики.

Склад твердого і рідкого палива виражають у відсотках по масі, а газоподібного – у відсотках за об'ємом. У твердому паливі розрізняють органічну, горючу, суху, робочу і аналітичну маси.

1. Органічна маса складається з вуглецю, водню, кисню, сіри, що входять до складу органічних сполук, і азоту;

2. Горюча маса, близька по складу і до органічної маси, відрізняється від останньої наявністю колчеданної, або піритової сірки, що входить до складу сірчистого колчедану ( $\text{FeS}_2$ ) і інших сірчистих з'єднань, окислюваних киснем в процесі згоряння палива;
3. Суха маса складається з горючих компонентів і мінеральних речовин, які утворюють при згорянні палива - золу;
4. Робоча маса складається з сухої маси і вологи ;
5. Аналітична маса складається з сухої маси і вологи, що відповідає підсушеному паливу, що аналізується в лабораторії.

#### ***Горюча маса палива.***

***Вуглець.*** Цей елемент є найважливішим компонентом горючої маси палива. Вміст вуглецю в горючій масі палива перевищує 50% і досягає 99%. У різних видах палива воно коливається в межах вказаних у таблиці 1.1. Вуглець, що міститься в паливі, входить до складу складних органічних з'єднань що, створюють горючу масу палива.

Кількість тепла, що виділяється при згорянні вуглецю, який міститься в різних видах палива, неоднакова внаслідок різної витрати енергії на розрив зв'язків між атомами в молекулах не однотипних органічних з'єднань.

Таблиця 3.1 Вміст вуглецю в горючій масі палива (закруглено в % по масі)

Паливо	Вміст вуглецю в горючій масі палива	Паливо	Вміст вуглецю в горючій масі палива
Дрова	50	Дизельне паливо	87
Торф	54-63	Мазут малосерпистий	87-88
Сланці	60-70	Бензол	92
Буре вугілля	60-80	Антрацит	92-98
Природний газ	75	Шунгіт	97-99
Кам'яне вугілля	75-90	Деревне вугілля	89-95
Бензин	85	Кокс	96
Газ	86	Напівкокс	95-98

**Водень** є другим за значенням компонентом палива. Вміст водню в горючій масі різних видів палива вказано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Вміст водню в горючій масі різних видів палива (округлено в % по масі)

Паливо	Вміст водню в горючій масі	Паливо	Вміст водню в горючій масі
Кокс	0,3-1	Сланці	7-10
Антрацит	1-3	Бензол	8
Напівкокс	2-3	Мазут	11-12
Деревне вугілля	2-4	Дизельне паливо	13
Кам'яне вугілля	4-6	Газ	14
Буре вугілля	4-6	Бензин	15
Торф	6	Зріджене вугілля	18
Дрова	6	Природний газ	25

Продукти згоряння відводять з котлів і печей зазвичай при температурі, що перевищує 100°. У цих умовах в димових газах міститься не вода, а водяна пара. На нагрівання і випаровування 1 кг вологи витрачається близько 600 ккал.

Кількість тепла, що виділяється при згорянні 1 кг водню у воду, називається вищою теплотою згорання, а кількість тепла, що виділяється при згорянні 1 кг водню у водяну пару, – нижчою теплотою згорання.

Відношення вищої теплоти згорання водню до нижчої  
68 260: 57740, складає близько 1,18.

Вміст водню в горючій масі палива підвищує його реакційну здатність і швидкість горіння.

Підвищення вмісту водню в горючій масі твердого палива обумовлена збільшення виходу летких речовин, що виділяються при нагріванні палива без доступу повітря.

**Кисень.** Третім важливим компонентом горючої маси палива є кисень. В горючій масі різних видів палива кисень міститься в кількостях вказаних в таблиці 3.3.

*Таблиця 3.3 Вміст кисню в горючій масі різних видів палива (закруглено у відсотках по масі)*

Паливо	Вміст кисню в горючій масі	Паливо	Вміст кисню в горючій масі
Природний газ	0	Кокс	1-3
Газ нафтопроміслу (попутний)	0	Кам'яне вугілля	2-12
Зріджений газ	0	Буре вугілля	19-27
Бензин	0	Сланці	12-18
Газ	0	Торф	33
Дизельне паливо	0	Дрова	42
Мазут	0-0,2	Доменний газ	Більше 50

Високим вмістом кисню характеризується горюча маса рослинного палива, а також молодих видів добутого палива – торфу і бурого вугілля. Значно менше міститься утримується кисню в кам'яному вугіллі. У антрациті вміст кисню знижується до 1–2 %.

Малий вміст кисню характерний також для штучних видів обуглероженого твердого палива, отриманого з вугілля, торфу або деревини шляхом відгону з них летких речовин.

Кисень, що міститься в горючій масі, знижує її теплоту згоряння. Це обумовлено двома чинниками:

По-перше, наявність кисню в горючій масі палива відповідно зменшує процентний вміст в ній вуглецю і водню, що володіють високою теплотою згоряння. Кисень же є як би баластом, що входить безпосередньо до складу органічних сполук, що входять в горючу масу палива.

По-друге, кисень, що входить до складу горючої маси, знаходиться в хімічному з'єднанні з воднем і вуглецем, наприклад у вигляді гідроксильних (ОН) і карбоксильних (COOH) груп, тобто водень і вуглець знаходяться частково в окисленому стані, що істотно знижує кількість тепла, що виділяється при їх згорянні (доокислені).

Наявність кисню в горючій масі твердого палива порівняно мало, що позначається на її теплопродуктивності, проте висока вологість палива з великим вмістом кисню обумовлює збільшення об'єму продуктів згоряння внаслідок випаровування вологи і зниження в результаті цього температури, що розвивається при спалюванні палива.

Тверде паливо з великим вмістом кисню в горючій масі характеризується високим виходом летких речовин, легко запалюється і володіє високою реакційною здатністю. У легкому рідкому паливі, практично не має кисень. У сирій нафті і мазуті, хоча і в незначній кількості, міститься кисень, що входить до складу смол і нафтових кислот. У природних і нафтозаводських газах міститься дуже мало кисню (який входить до складу оксидів вуглецю). У коксових, генераторних і доменних газах міститься значна кількість зв'язаного кисню (у вигляді  $CO$  і  $CO_2$ ), а вміст вільного молекулярного кисню зазвичай не перевищує 1%.

Вміст кисню в газі (у відсотках за об'ємом) визначають шляхом його поглинання пірогалолом, а в горючій масі твердого палива (в процентах за



масою) фіксують за різницею після визначення решти компонентів горючої маси палива.

**Азот.** Вміст азоту в горючій масі твердого палива коливається від 0,6 (дрова) до 2% у деяких видів вугілля і торфу.

В процесі горіння азот переходить в димові гази у вигляді молекулярного азоту  $N_2$ . Таким чином, азот, що входить до складу складних органічних з'єднань горючої маси палива, не окислюється в процесі горіння, не виділяє тепло, і вміст азоту як баласту в паливі знижує його теплоту згоряння у наслідок зменшення вмісту горючих компонентів – вуглецю і водню.

При коксуванні кам'яного вугілля в атмосфері, в якій не має кисню, азот, що міститься в паливі, в значній мірі виділяється у вигляді аміаку  $NH_3$ .

У нафті вміст азоту зазвичай коливається від 0,03 до 0,3%.

У газоподібному паливі основним видом баласту являється азот – від долі відсотка в деяких природних і нафтопромислових газах до 60% в доменних газах і 75% у вагранкових газах. Гази з високим вмістом азоту характеризуються низькою теплотою згоряння і зниженою теплопродуктивністю.

**Сірка.** У твердому паливі містяться три види сірки: органічна, колчеданна (піритна) і сульфатна.

Органічна сірка  $S_0$  входить до складу складних органічних сполук, що утворюють паливо.

Колчеданна або піритна сіра  $SC$  входить до складу залізного колчедану  $FeS_2$  і інших сірчистих з'єднань. При спалюванні палива колчедан згоряє з утворенням сірчистого газу і оксидів заліза.

Дані про вміст горючої сірки (органічної і колчеданної) в різних видах палива приведені в таблиці 3.4.

Сірка різко знижує цінність палива, особливо технологічного. Сірка, що міститься в коксі, частково переходить у рідкий метал, який стає ломким в

твердому стані при високій температурі. Щоб уникнути цього сіру коксу хімічно зв'язують вапном і переводять в шлаки.

Таблиця 3.4 Вміст сіри в горючій масі.

Паливо	Вміст сіри в горючій масі %	Паливо	Вміст сіри в горючій масі %
Дрова	0,0	Буре вугілля челябінське	2,0
Природний газ	0,0	Кокс донецький	1,8
Бензин	0,15	Антрацит донецький	2,0
Газ тракторний	1,0	Напівантрацит донецький	2,5
Дизельне паливо	1,0	Високосірчистий мазут	3,5
Торф	0,3	Кам'яне вугілля донецьке	3 - 5
Малосірчистий мазут	0,5	Сланці естонські	4,0
Кокс ковальний	0,5	Проміжний продукт збагачення донецького вугілля	8,0
Кам'яне вугілля ковальне	0,5	Кам'яне вугілля кизеловське	7,0
Буре вугілля кансько-ачинське	1,0	Буре вугілля підмосковське	6,0
Кам'яне вугілля екибастузське	1,2	Сланці волжські	10 - 13
Кам'яне вугілля карагандинське	1,0		
Сірчистий мазут	2,0		

Збільшення вмісту сіри в коксі на 1 % обумовлює підвищення витрати флюсів і палива приблизно на 15%. При цьому значно знижується продуктивність доменних печей.

Окрім органічної і колчеданної сірки в паливі міститься невелика кількість повністю окисленої сульфатної сірки, що входить до складу  $CaSO_4$ ,  $FeSO_4$  і інших сірчаноокислих солей. При спалюванні палива сульфатна сірка переходить в золу і внаслідок цього її наявність мало позначається на властивостях палива.

У рідкому паливі сірка міститься переважно у вигляді органічних сполук. Виробництво моторного палива і змащувальних масел, з

високозернистої нафти надто ускладнюється необхідністю їх очищення від сірчистих сполук.

У газоподібному паливі сірка міститься у вигляді сірководню і частково у вигляді сірковуглецю  $CS_2$  і інших органічних сполук.

При високому вмісті горючої сірки в котельному паливі димові гази дуже забруднюють сірчистим ангідридом  $SO_2$  навколишнє середовище, що згубно діє, перш за все, на металеві поверхні і рослинність. При спалюванні сірчистого палива з надмірною кількістю повітря відбувається часткове окислення  $SO_2$  до  $SO_3$  з утворенням сірчаної кислоти. Температура конденсації водяної пари, що міститься в продуктах згорання палива, залежить від парціального тиску  $H_2O$ .

Для зменшення забруднення повітряного басейну оксидами сірки створюють установки для очищення димових газів і споруджують коштовні високі димарі.

При нагріванні твердого палива без доступу повітря горюча маса руйнується і з неї виділяються леткі речовини, що складаються в основному з молекулярного водню, оксидів вуглецю, метану та інших вуглеводнів.

Вихід і вміст летких речовин залежать від складу горючої маси палива, температури і тривалості нагріву палива.

Вихід летких речовин в горючій масі твердого палива коливається в широких межах. Він тим вище, чим більший вміст в горючій масі кисню і водню. Для найбільш поширених твердих палив вихід летких речовин (у % від горючої маси) вказаний у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 Вихід летких речовин для найбільш поширених твердих палив  
(у % від горючої маси).

Паливо	Вихід  летючих  летких  речовин
Дрова	85
Сланці	80
Торф	70
Буре вугілля	40 – 60
Кам'яне вугілля	10 – 40

Паливо з високим виходом летких речовин (дрова, торф, буре вугілля, довгополум'яне і газове кам'яне вугілля, сланці) легко запалюється і горить з утворенням полум'я в об'ємі печі або топки.

Вихід летких речовин і коксу у поєднанні з характеристиками коксу (порошкоподібний, злиплий, такий, що спікся і т. д.) є найважливішою класифікаційною ознакою кам'яного вугілля, що визначає доцільність їх використання для виробництва металургійного коксу.

**Мінеральна маса палива і зола.** Всі види палива, за винятком газоподібного і найбільш легких видів рідкого палива, що дистилюють, містять мінеральні речовини. Вміст мінеральних речовин в паливі коливається у дуже широких межах – від малої долі відсотка в рідкому паливі до багатьох десятків відсотків у високозольному вугіллі і сланцях.

Частина мінеральних речовин, що містяться в паливі, наприклад в дровах, всмоктується рослинами з ґрунту у вигляді різних солей. Тому при спалюванні дров утворюється близько 1% золи, що складається з оксидів металів і мінеральних солей.

У добутому твердому паливі (кам'яне і буре вугілля, торф) міститься значно більше мінеральних речовин, ніж у деревині, внаслідок поступового відкладення солей в процесі тривалого утворення пластів палива. Ці

мінеральні речовини рівномірно розсташовані в паливі, і виділити їх практично неможливо.

Крім того, в процесі добування твердого викопного палива воно забруднюється шматками пустої породи, внаслідок чого вміст мінеральних речовин в паливі підвищується. Від цих забруднень вугілля може бути частково очищене шляхом збагачення.

Мінеральні речовини, що містяться в паливі, знижують його теплоту згоряння у наслідок зменшення частки горючих компонентів і збільшення витрати тепла на нагрів і плавлення мінеральної маси.

Збільшення витрат тепла на нагрів і плавлення мінеральної маси має істотне значення в топках з рідким шлаковидаленням, в топках при сухому шлаковидаленні ця величина порівняно незначна. Наявність в паливі мінеральної маси знижує також і його теплопродуктивність (збільшується витрата тепла на плавлення і нагрів золи до температури горіння палива). Практично це помітно позначається на теплопродуктивності лише при високій зольності палива.

Дані про зольність різних видів палива приведені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 Вміст золи в сухому паливі (у % по масі)

Паливо	Загальна зольність	Приведен-на зольність	Паливо	Загальна зольність	Приведен-на зольність
Бензин	0	0	Кам'яне вугілля карагандинське	25	5
Газ тракторний	0,005	0,0005	Буре вугілля челябінське	28	6
Дизельне паливо	0,02	0,002	Кам'яне вугілля кизеловське	30	6
Мазут	0,3	0,03	Кам'яне вугілля екибастузьке	40	9
Дрова	1	0,2	Буре вугілля підмосковське	35	9
Торф	10	2	Сланці естонські	40	15
Кам'яне вугілля ковальне	15	2,5	Сланці волжські	60	40
Кам'яне вугілля донецьке	18	3			
Буре вугілля канско-ачинське	15	3			

Внаслідок підвищення зольності палива зростають витрати на його транспортування. Тому високозольне паливо (сланці, підмосковне вугілля) недоцільно перевозити на великі відстані.

Особливо небажане підвищення зольності технологічного палива. У доменний процес, з метою видалення золи з печі, вводять вапно, котре утворює із золою шлаки із зниженою температурою плавлення, при цьому значна кількість палива витрачається на нагрівання і розплавлення мінеральних з'єднань, що містяться в паливі і вводяться у вигляді флюсів. Наприклад, при підвищенні зольності металургійного коксу на 1% витрати його зростають на 2,5% і приблизно настільки ж знижується продуктивність доменних печей. Тому зниження зольності кам'яного вугілля, призначеного для коксування, особливо важливе.

Застосування в технологічних печах, твердого палива з високою зольністю також ускладнює хід технологічного процесу, оскільки викликає необхідність постійного очищення колосників і видалення золи. Зольність технологічного палива негативно позначається на продуктивності печей та газогенераторів і ускладнює їх експлуатацію.

Паливо з великим вмістом золи, що використовується як енергетичне, в порівнянні з малозольним також дещо ускладнює роботу парових котлів. Ефективне спалювання палива з дуже високою зольністю в потужних парових котлах електростанцій і великих промислових підприємств потребує спеціальних заходів.

**Волога палива.** Вміст вологи в паливі коливається від долі відсотка в рідкому паливі до 50 – 60% в сирих дровах і свіжовидобутому торфі. Для характеристики палива важливе значення має приведена вологість.

У таблиці..., приведені наближені дані про загальну і приведену вологість різних видів палива .

Природно, що вологість палива знижує теплоту його згоряння .

Паливо із високим вмістом вологи не економічно перевозити на великі відстані. Подібно до великозольного палива воно належить до місцевих видів палива. При спалюванні палива з високою вологістю значно знижується також температура горіння внаслідок витрат тепла на випаровування води і нагрівання виділеної водяної пари.

Таблиця 3.7 Вміст води в різних видах палива і приведена вологість палива  
(у % по масі)

Паливо	Загальна вологість	Приведена вологість		Паливо	Загальна вологість	Приведена вологість
Мазут	1 – 5	0,1 – 0,5	Сланці естонські	15	6	
Кокс	3 – 8	0,5 – 1	Буре вугілля канско-алчинський	32	9	
Антрацит	4 – 7	0,5 – 1		33	13	
Напівантрацит	5 – 7	0,7 – 1	Буре вугілля підмосковське	30 – 40	10 – 15	
Кам'яне вугілля худе	5 – 7	0,8 – 1	Дрова	20	15	
	5 – 10	0,8 – 1,5		40	15	
Кам'яне вугілля коксівне	10 – 15	1,5 – 2	Сланці волжськ	50	25	
	17	5	Торф шматковий	53	32	
Кам'яне вугілля довгополум'яне			Торф фрезерний			
Буре вугілля челябінське			Буре вугілля александрійське			

### 3.2 Тверде паливо, його характеристика, особливості згорання.

Тверде паливо, під яким зазвичай мається на увазі вугілля (буре, кам'яне, антрацит), торф (брикети), деревина (дрова, тирса, брикети, пелети та ін.) є потужним і дуже ефективним джерелом енергії, завдяки чому воно дедалі активніше використовуються в сучасних системах теплопостачання.

Отже, до твердого палива відносять викопне вугілля (кам'яне і буре), горючі сланці, торф, деревину та штучні види: кокс, напівкокс, термоантрацит і деревне вугілля. Цінність палива і економічна ефективність використання визначається його складом і властивостями (Табл. 3.8)



Таблиця 3.8 Склад окремих видів палива

Вид палива	Схема горючої маси, %				Волога, %	Зола, %	Теплота згоряння мДж/кг
	C	H	O+N	S			
Кам'яне вугілля Донбасу	82	-	13,0	2...6	3...8	14,5	27... 34
Буре вугілля	70	5,5	24,5	2...3	50	4,0	25...30
Горючі сланці	75	10,0	15,0	3,5	13,5	50,0	27... 34
Торф	59	6,0	35,0	0,4	25	4,5	20...24
Деревина	40...50	6,0	423,0	0,1	30...40	0,4	19...21

Теплотворні властивості твердого палива головним чином визначаються його хімічним складом – вмістом вуглецю, водню, кисню, азоту та сірки. Однакові кількості різних видів твердого палива дають при спалюванні різну кількість тепла. Тому для оцінки якості палива визначають його теплотворну здатність, тобто найбільшу кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні 1 кг палива.

Всі основні види твердого палива є органічними, тобто мають рослинне походження. Різниця полягає в хімічному віці – біомаса з часом перетворюється на торф, далі на буре вугілля і врешті-решт стає кам'яним вугіллям.

*Торф* в якості палива люди почали використовувати значно раніше ніж викопне вугілля, але з часом він поступово витіснявся більш зручними у використанні дровами і вугіллям. Проте, він має досить високий енергетичний потенціал і низьку собівартість.

Торф видобувають із боліт, після чого сушать і брикетують. Ця копалина характеризується середнім рівнем вологості (30-55%), який залежить від способу видобутку і сушки. Зольність торфу коливається від 7 до 15%. Теплота згоряння торфу складає 8,38-10,72 МДж/кг (3511-4492 ккал/кг).

*Вугілля* – це тверда горюча речовина органічного походження, що утворилася з решток рослин і планктону в результаті діяльності мікроорганізмів.

Викопне вугілля поділяється на три основні групи: буре, кам'яне та антрацити.

Буре вугілля – це наймолодша група цього виду палива. За своєю структурою буре вугілля відрізняється підвищеним вмістом баласту (вогнетривкого залишку) і дуже високою гігроскопічністю, внаслідок чого його вологість може досягати 60%. Буре вугілля не спікається, відрізняється великим виходом летких горючих речовин на горючу масу (33,5 - 58,5%) і зольністю на суху масу (10,5-34%). Теплота згоряння бурого вугілля коливається від 10,7 до 17,5 МДж / кг (4177 ккал / кг).

Недоліками цього палива є великий вміст сірки, що призводить до посиленої корозії сталевих частин котлів, а також здатність до самозаймання при тривалому зберіганні. Буре вугілля рекомендується спалювати в топках великих котлів.

Кам'яне вугілля більш щільне і малопористе, ніж буре вугілля, завдяки чому містить значно менше вологи. Це паливо відрізняється великою теплоотою згоряння - 21,2 -28,07 (5097-6700 ккал/кг). Вихід горючих летких речовин дорівнює 3,5-45%.

Антрацити – це найстаріше за походженням кам'яне вугілля, що відрізняється великою твердістю. До антрацитів відносять вугілля з виходом летких горючих речовин – 7-9%, теплота згоряння горючої маси – 24,35-27,24 МДж/кг (5800-6500 ккал/кг). Антрацит згоряє без полум'я з виділенням невеликої кількості диму, зручний для спалювання в топках будь-яких котлів.

Якщо нафта і природний газ є основним джерелом насичених і ненасичених вуглеводнів, то відносно ароматичних вуглеводнів, безсумнівно, перевага належить вугіллю. Це тверде паливо посідає чільне місце в розвитку промисловості органічного синтезу як постачальник хімічної сировини. Його природні запаси набагато перевершують запаси нафти і природного газу. В Україні вугледобування зосереджено в трьох

басейнах: Донецькому та Львівсько-Волинському кам'яновугільних басейнах, Дніпровському буровугільному басейні.

В Україні видобувають, головним чином, вугілля марки «А» антрациту, яке підходить для ручного завантаження в теплове обладнання, але для автоматичного завантаження досить важко підібрати вугілля цієї марки і налаштувати котел на правильну роботу. Це пов'язано з тим, що сучасні імпорتنі автоматичні котли в основному розраховані на буре вугілля, яке в Україні практично не видобувається. Кам'яне вугілля більш калорійне, ніж буре, що вимагає іншого підходу до організації автоматичної подачі палива в пальниковий пристрій.

Способи зберігання кам'яного вугілля значно простіші, ніж бурого, оскільки воно не схильне до самозаймання.

Окрім природного викопного палива в твердопаливних котлах також використовують очищене тверде паливо – брикети кам'яного вугілля, брикети бурого вугілля, кокс і деревне вугілля.

Вугільні брикети виготовляються з подрібненого і висушеного кам'яного або бурого вугілля в спеціальних пресах. Брикети можуть мати різної форми і розмірів.

Кокс виробляється з кам'яного, бурого вугілля та вугільних сумішей в спеціальних печах при температурі близько 1200 ° С, при якій відбувається їх дегазація.

*Деревне вугілля* являє собою відходи деревообробної промисловості, перероблені в спеціальних вуглевипалювальних печах.

### ***Переробка твердого палива***

Методи переробки твердого палива засновані на гетерогенних, головним чином некаталітичного процесу в системах «тверде – газ», «тверде – рідина – газ» і багатофазних, здійснюваних при високих температурах.

При нагріванні вугілля та інших видів палива відбуваються складні зміни, що ведуть до утворення нових твердих, рідких і газоподібних

продуктів. Основними методами, переробки твердого палива є коксування, напівкоксування, газифікація і деструктивна гідрогенізація.

*Коксування* – метод переробки кам'яного вугілля нагріванням без доступу повітря в коксових печах. Коксохімічне виробництво включає три технологічні стадії: підготовку сировини, коксування і переробку коксового газу.

Сировиною для коксування служать суміші кам'яного вугілля, здатні при нагріванні спікатися (тобто, розм'якшуватися і злипатися в загальну масу). Найкращою сировиною є коксівне вугілля різних марок. Але запаси коксівного вугілля обмежені, тому поряд з ними застосовують інші марки кам'яного вугілля – жирне, газове, довгополум'яне.

Сировина, що поступає на переробку піддається підготовці: подрібленню, сортуванню, збагаченню, зневодненню. Ця робота з поліпшення якості вугілля вимагає додаткових витрат, але вона економічно доцільна.

Процес коксування протікає в коксових печах, що представляють собою щілинні камери 2 шириною 0,4 м, висотою 4 м і довжиною 14-15 м, зроблені з вогнетривкого матеріалу (Рис. 3.9) У склепінні такої камери є отвори - люки для завантаження вугілля. Кілька десятків печей (до 75), розташованих паралельно одна до одної і пов'язаних цегляною кладкою, утворюють коксову батарею. У простінках між печами розташовуються опалювальні канали 1. У них спалюється будь-яке газоподібне паливо. Отримане при цьому тепло через стінки печей, передається завантаженому в них вугіллю.

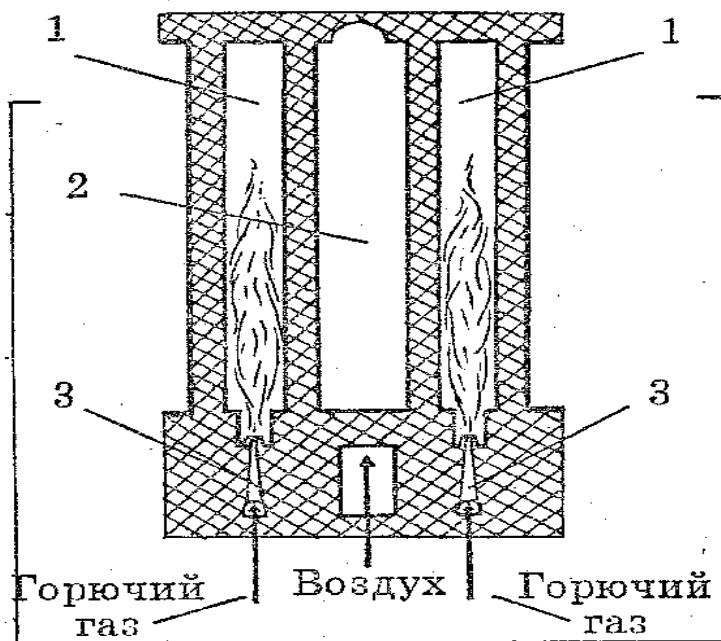


Рис. 3.9 Камера коксування

Коксування триває 13-14 годин. Після закінчення процесу відкривають передню та задню двері печі і спеціальним штовхачем виштовхують кокс з камери в сталевій напіввагон, в якому його гасять. Після вивантаження кокс сортують. З однієї тонни вугільної шихти отримують 730-780 кг коксу, що містить 85-95% чистого вуглецю, 5-11% золи і невелика кількість інших речовин.

Утворений при коксуванні газ (до 350 м<sup>3</sup> на 1 т вугілля) містить багато цінних речовин. Крім водню, метану, окису і двоокису вуглецю, до його складу входять пари кам'яновугільної смоли, бензолу, аміаку, сірководню та інших сполук. Парогазову суміш, що виходить з коксових камер, уловлюють і відводять у цех конденсації на переробку, яка полягає у виведенні компонентів, що в ній містяться.

Напівкоксування – низькотемпературний процес переробки низькосортного твердого палива (кам'яне і буре вугілля, сланці) при нагріванні до кінцевої температури 500-550 °С без доступу повітря. Продукти напівкоксування – напівкокс, смола і газ.

Напівкокс – слабо спечений крихкий продукт, що містить до 10% летких речовин, що володіє високою реакційною здатністю з великою зольністю. Застосовують як місцеве енергетичне паливо та як складову шихти для коксування.

Смола, особливо сланцева, служить джерелом отримання моторних палив, розчинників найрізноманітніших органічних мономерів, що виділяються прямою перегонкою смоли.

Останнім часом набуває особливого значення *газифікація* твердого палива як джерело енергії і хімічної сировини.

Газифікації можуть бути піддані будь-які види твердого палива – торф, низькосортне вугілля, сланці, напівкокс, відходи лісорозробок та ін. При газифікації, що проводиться в реакторах (газогенераторах), органічна маса палива перетворюється в генераторні гази. Твердий залишок газифікації (шлак) представляє собою мінеральну частину палива, тобто золу. У залежності від призначення генераторного газу застосовують різні види дуття і отримують газ заданого складу.

Представляє інтерес відродження ідеї Д. І. Менделєєва про підземну *бесшахтну газифікацію* кам'яного вугілля, коли газифікація протікає у підземному газогенераторі без вилучення палива на поверхню, тобто без трудомістких гірських робіт.

Метод полягає в тому, що з поверхні землі до вугільного пласту буряться свердловини на відстані 25-30м одна від іншої, після чого забої цих свердловин з'єднуються каналом газифікації по вугільному пласту. Одна свердловина призначена для підведення дуття, а інші – для відводу утворених газів.

*Деструктивна гідрогенізація* – це метод прямого одержання штучного рідкого палива – замітника нафтопродуктів – з бурого і кам'яного вугілля, сланців та інших видів твердого палива.

Сировиною служать кам'яне і буре вугілля, що містять у своєму складі мінімум сірки, азоту, кисню, але максимум водню. Вугілля подрібнюють,

збагачують і сушать. Тонко подріблений вугільний порошок змішують з важким маслом. Отриману масу нагрівають в автоклавах під тиском в присутності водню і каталізатора. У цих умовах вугілля насичується воднем – гідрогенізується. Одночасно з гідрогенізацією відбувається розщеплення (деструкція) великих молекул, що має вугілля, в суміш рідких та газоподібних речовин з меншою молекулярною вагою. У результаті утворюються вуглеводні ( $C_nH_m$ ), аналогічні молекулам речовин, що складають нафту. У залежності від ступеня гідрування можна отримати бензин, гас, дизельне паливо та інші речовини.

**Горіння твердого палива.** Горіння твердого палива (вугільного пилу) включає два періоди: теплову підготовку і власне горіння (Рис. 3.10)

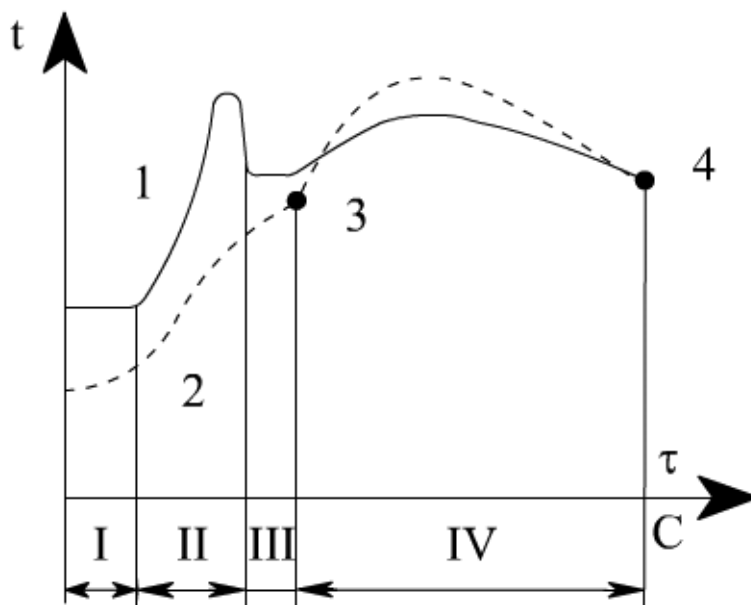


Рис. 3.10 Температурний режим при горінні окремої частинки твердого палива: 1 - температура газового середовища навколо частинок; 2 - температура частинки; 3 - займання коксового залишку; 4 - завершення горіння коксового залишку; I - зона термічної підготовки; II - зона горіння легких речовин; III - зона прогріву коксового залишку; IV - зона горіння коксового залишку.

У процесі теплової підготовки (зона I) паливо прогрівається, висушується, і при температурі вище  $110^{\circ}C$  починається теплове розкладання вихідної речовини палива з виділенням газоподібних летких

речовин. Тривалість цього періоду залежить головним чином від вологості палива, розміру його частинок, умов теплообміну і становить зазвичай десяти долі секунд. Перебіг процесів в період теплової підготовки пов'язаний з поглинанням теплоти, головним чином, на прогрів, підсушування палива та термічний розклад складних молекулярних сполук, тому нагрів палива в цей час йде сповільнено.

Власне горіння починається із займання летких речовин (зона II) при температурі  $400 \dots 600 \text{ }^\circ \text{C}$ , а виділяється в процесі їх горіння теплота забезпечує прискорений прогрів і займання твердого коксового залишку. Горіння летких речовин займає  $0,2 \dots 0,5 \text{ с}$ . При великому виході летких речовин (буре і молоде кам'яне вугілля, сланці, торф) виділяється теплота достатня для займання коксової частинки, а при малому виході летких речовин виникає необхідність додаткового прогріву коксової частинки від оточуючих розпечених газів (зона III).

Горіння коксу (зона IV) починається при температурі близько  $1000 \text{ }^\circ \text{C}$  і є найбільш тривалим процесом. Це пояснюється тим, що частина кисню в зоні біля поверхні частинки палива витратилась на спалювання горючих летких речовин і концентрація його знизилася, крім того, гетерогенні реакції завжди поступаються за швидкістю гомогенним для однорідних за хімічною активністю речовин.

У підсумку загальна тривалість горіння твердої частинки ( $1,0 \dots 2,5 \text{ с}$ ) в основному визначається горінням коксового залишку (близько  $2/3$  загального часу горіння). Для палив, що мають великий вихід летких речовин, коксовий залишок становить менше половини початкової маси частинки, тому їх спалювання при різних початкових розмірах відбувається досить швидко і можливість недопалювання знижується. Старі палива мають щільну коксову частинку, горіння якої займає майже весь час перебування в топковій камері.

Коксовий залишок більшості твердих палив в основному, а для ряду твердих палив цілком, складається з вуглецю (від 60 до 97% маси частинки). Враховуючи, що вуглець забезпечує основне тепловиділення при спалюванні



палива, розглянемо динаміку горіння вуглецевої частинки з поверхні. Кисень підводиться з навколишнього середовища до частинки вуглецю за рахунок турбулентної дифузії – турбулентного масопереносу, що має досить високу інтенсивність, проте безпосередньо біля поверхні частинки зберігається тонкий газовий шар (прикордонний шар), перенесення окислювача через який здійснюється за законами молекулярної дифузії (Рис. 3.11). Цей шар значною мірою гальмує підведення кисню до поверхні. У ньому відбувається догорання горючих газових компонентів, що виділяються з частинки в ході термічного розкладання. Кількість кисню, що підводиться в одиницю часу до одиниці поверхні частинки за допомогою турбулентної дифузії, визначається за формулою:  $G_{ок} = A(C_{ном} - C_{сн})$ .

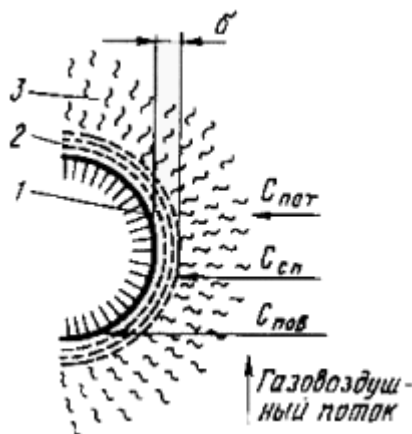


Рис. 3.11 Схема горіння вуглецевої частинки:

1 - поверхня вуглецевої частинки; 2 - ламінарний прикордонний шар; 3 - зона турбулентного потоку.

Така ж кількість кисню надходить через прикордонний шар  $\delta$  за рахунок молекулярної дифузії.

Область чисто дифузійного горіння пилоподібного палива характерна для ядра факела, що відрізняється найбільш високою температурою горіння, і зони догорання, де концентрація реагуючих речовин вже мала і їх взаємодія визначається законами дифузії. Займання будь-якого палива починається при відносно низьких температурах, в умовах достатньої кількості кисню, тобто в кінетичній області. У цій області горіння визначальну роль грає швидкість хімічної реакції, що залежить від таких факторів, як реакційна здатність

палива та рівень температури. Вплив аеродинамічних факторів у цій області горіння незначна.

**Спалювання твердого палива.** На практиці для спалювання твердого палива використовують як камерні так і шарові топки. Обидва варіанти вимагають підготовки палива: відділення механічних домішок, сушки, подрібнення тощо.

Шарові топки (Рис. 3.14) призначені для спалювання кускового палива.

Швидкість повітря вибирається так, аби не змінювалась структура шару. В таких топках спалюють паливо з розмірами кусків 20...30мм і більше.

Спалювання в шарі відбувається в дифузійній області, тобто швидкість горіння визначається швидкістю підведення окислювача до палива.

Шар шлаку на решітці захищає її від високої температури, а також розподіляє і нагріває повітря, що іде в зону горіння.

Немеханізовані топки вимагають обслуговування: подача палива, шурування, видалення шлаку.

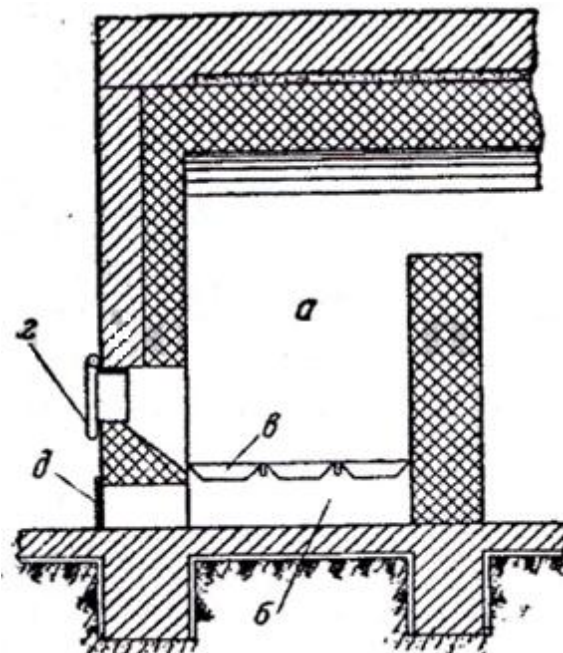


Рис. 3.12 Проста топка

*а-вогневий простір; б-зольник; в-кокосникові ґрати; г-топкові дверцята для завантаження палива; д-зольникові дверцята для регулювання підведення в топку необхідного для горіння повітря і для видалення золи та шлаку.*

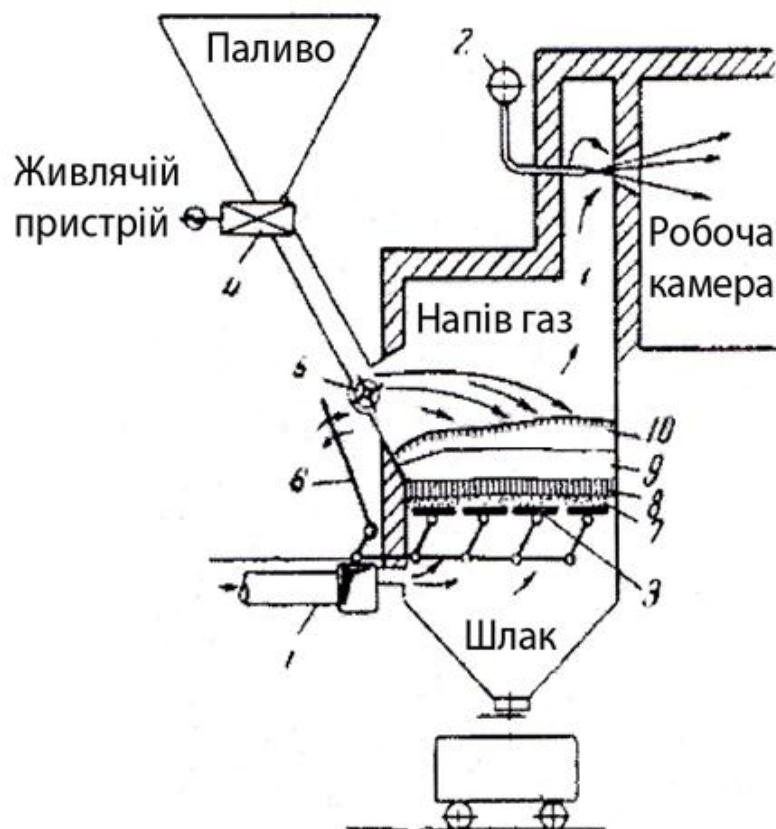


Рис. 3.13 Топка напівгазова з механічною подачею палива  
 1-подача первинного повітря; 2- подача вторинного повітря; 3- колосникові ґрати; 4- живильник; 5- закидувач; 6- механізм для повороту колосників (струшування решітки); 7- зона шлаку; 8- зона горіння; 9- зона відновлення; 10- шар свіжозакинутого палива.

Товщина шару палива в напівгазових топках значно більше, ніж у простих з повним згорянням, але менше товщини шару палива в газогенераторах, що працюють на тому ж паливі. Так, при донецькому антрациті товщина шару в простій топці становить приблизно 50-80мм, напівгазовій 200-400мм, в газогенераторі 1000-1500мм. Для кам'яного і бурого вугілля товщина шару в напівгазових топках зазвичай становить 400-800мм.

Температура в напівгазовій топці (температура напівгазу) при антрациті становить 1000-1100 С замість 500-600 °С, звичайних для газу, що виходить з газогенератора. У напівгазовій ...

Значне розповсюдження в промисловості отримали механічні шарові топки з ланцюговими решітками (Рис. 3.14). Характерною особливістю цих

топок є безперервне переміщення палива разом з колосниковою решіткою, що є транспортером, виконаним у вигляді нескінченного полотна. Застосування знаходять механічні топки з колосниковими решітками прямого і зворотного ходу. В топці з решітками прямого ходу полотно з паливом переміщається від фронту топки до задньої стінки, а в топці з решіткою зворотного ходу – від задньої стінки до фронту.

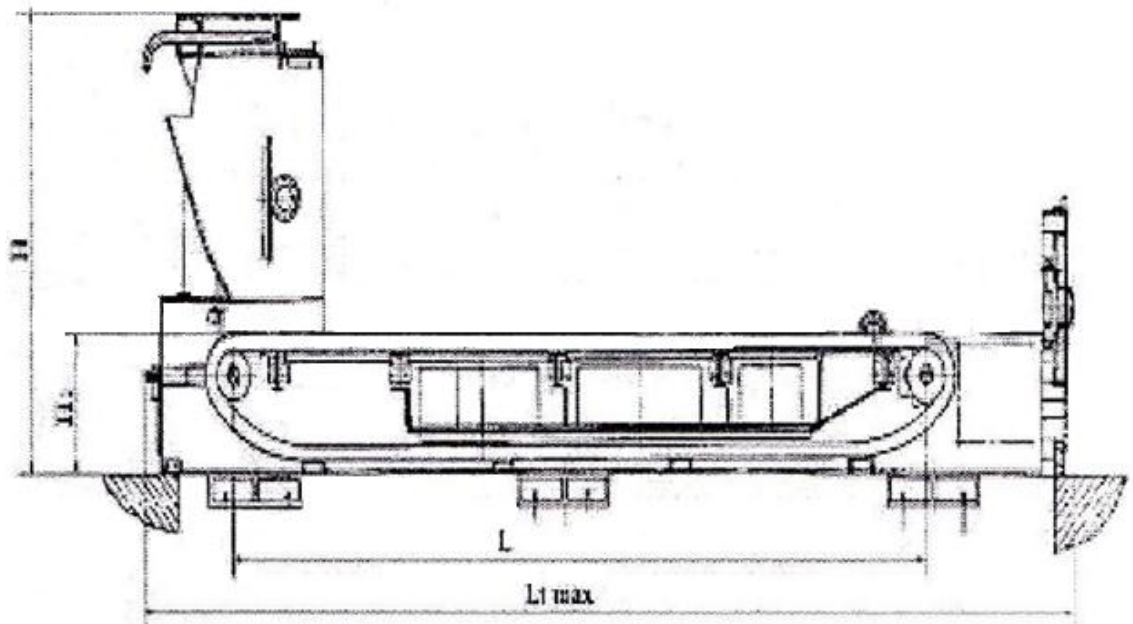


Рис. 3.14 Шарова топка з ланцюговою колосниковою решіткою .

Характерною особливістю цих топок є комбінований процес горіння в шарі і завислому стані.

Завдяки пневмомеханічній подачі палива великі частинки падають і згоряють на решітці, дрібні відсіваються і згоряють в топковому просторі. Подача палива здійснюється безперервно малими порціями на всю поверхню колосникового полотна і при повільному його русі забезпечується нижнє запалювання по всій довжині шару. Конструкція топки дозволяє автоматизувати процес горіння.

Конструктивні розміри: відстань між осями валів  $L=4000\text{мм}$ ; ширина колосникового полотна –  $2700\text{мм}$ ; висота  $H=3015\text{мм}$ ; довжина  $l=5540\text{мм}$ ; маса  $16700\text{мм}$ .

Перевага механічних топок: можна автоматично регулювати подачу палива; є можливість регулювання температури в робочому просторі печі; економія палива 10-15%; постійна температура в робочому просторі печі; більш комфортні умови праці.

В механічній топці з лусковими ланцюгами решітки прямого ходу полотно решіток складається з окремих колосників, укріплених на нескінченних шарнірних ланцюгах, надітих на дві пари зірочок. Швидкість руху решітки можна варіювати в широких межах (1...18м/с). Паливо із завантажувального ящика поступає на решітки, що рухаються. Товщину шару палива встановлюють шибером, який може переміщатися по вертикалі. Повітря для горіння підводиться під решітку. По мірі просування решіток паливо вигоряє. Шлак, що утворюється, скидається з решіток шлакознімачем в шлаковий бункер.

Із збільшенням швидкості повітря можна досягти того, що частинки будуть підніматись. Така швидкість називається «критичною». З подальшим збільшенням швидкості починається «кипіння» шару. Об'єм шару при цьому збільшується в 1,2...1,8 рази. Частинки рухаються до тих пір, поки їх маса зменшується, потім вони вилітають з топки. Обов'язковою умовою нормального спалювання в «киплячому» шарі є рівномірність розмірів частинок палива (Рис. 3. 15, б).

Згідно діючих норм використання процесів спалювання твердого палива в шарових топках доцільне тільки для котлів продуктивністю менше 35т/год.

Для більших котлів доцільною є камерна топка. В камерних топках проводять факельний (Рис. 3. 15, в) або циклонний (Рис. 3. 15, г) процес спалювання. Оскільки при факельному спалюванні частинка палива знаходиться обмежений час в топці, то необхідно проводити тонке перемелювання палива до розміру пилу (до 100мкм). Для інтенсифікації процесу горіння вугілля використовують «запалювальні пояси». Для цього в зоні горіння екранні поверхні вкривають вогнетривкими матеріалами. При

цьому зменшується теплотойм і відповідно зростає температура в зоні горіння .

В циклонному процесі паливо подається разом з повітрям при великій швидкості тангенціально, тому потік закручується. Час перебування частинки збільшується і якість змішування з повітрям покращується. Тому допускають збільшення розмірів частинок.

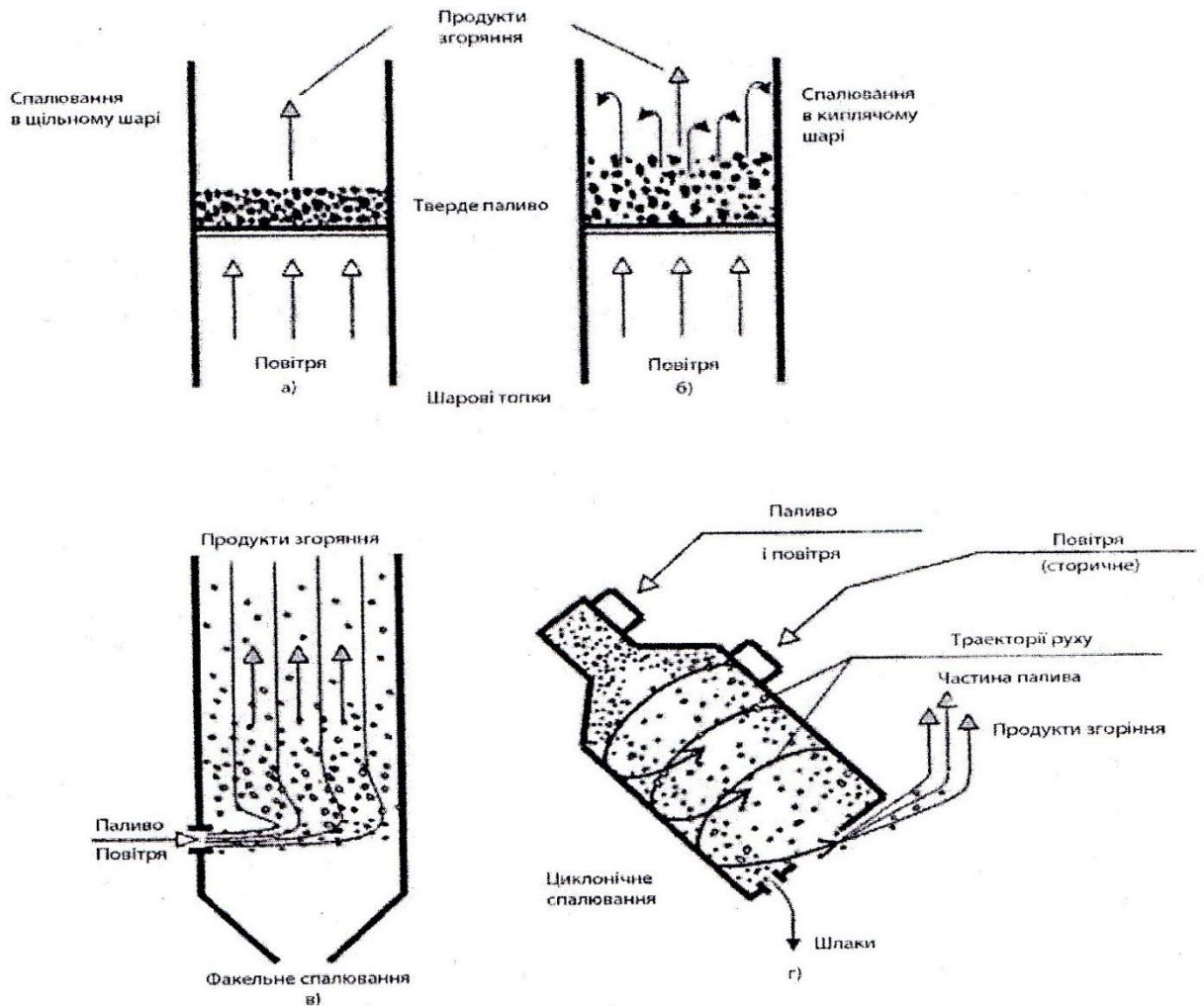


Рис. 3. 15 Схема організації топкових процесів

### Опалювальні системи на твердому паливі.

Тверде паливо застосовується для опалювання житла справдавна. Варіантів використання даного виду опалювання дуже багато. Найпростіший – спалювання твердого палива в печі (камінах). Для

невеликого приміщення (будинок на дачній ділянці, великі, господарські споруди) такий спосіб опалювання є, мабуть, самим економічно виправданим. А ось опалювати таким застарілим «традиційним» способом великий будинок в даний час не вигідно навіть в тих районах, де тверде паливо (деревина, вугілля, торф і так далі) в надлишку. Великий час заготовлення палива, яке займає чималий об'єм. Сучасні системи опалювання на твердому паливі мають котел, в якому спалюється тверде паливо і при цьому нагрівається теплоносія (найчастіше вода), за допомогою якого і проводяться опалювання будівлі. ККД подібних систем на багато вище, ніж стандартних печей, які використовують для опалення. Дуже часто подібні системи комплексується спеціальним насосом. Для примусової циркуляції теплоносія. Така система опалювання має суттєвий недолік. Котли на твердому паливі вимагають періодичної присутності оператора для палива і видалення продуктів згоряння. Залишити подібну систему опалювання працювати в автономному режимі можна лише на обмежений проміжок часу, який обумовлений швидкістю згоряння енергоносія і ємкістю бункера для палива, а також наявністю системи автоматичної подачі енергоносія.

Сучасні твердопаливні котли, які спалюють пелети і оснащені автоматичною подачею палива можуть працювати в автономному режимі кілька діб. Крім того, завдяки застосуванню в таких котлах піролізної системи, спалювання палива значно зменшує кількість спожитого палива, досягається максимальне його спалювання, збільшується ККД опалювальної системи в цілому. Принцип роботи піролізних (газогенераторних) котлів полягає в наступному. Під впливом високої температури з твердого палива починає виділятися газ, який спалюється через спеціальну форсунку разом із самим основним паливом. Завдяки такому способу спалювання палива ККД котла становить до 87%, що є досить високим показником. Однак, на відміну від звичайних твердопаливних котлів, даному піролізному котлу потрібна електрика для роботи системи автоматики. Ще один спосіб знизити споживання палива і збільшити ККД такої системи – використовувати теплові

аккумулятори, які представляють собою накопичувальні ємності великої місткості, рідина в яких нагрівається в процесі спалювання палива, а потім віддає тепло під час циркуляції по опалювальній системі. Завдяки великому обсягу дана система забезпечує підтримання оптимальної температури в приміщенні навіть в той момент, коли не відбувається згоряння палива.

Варто зазначити, що системи опалення, де в якості енергоносія застосовується тверде паливо частіше застосовують на великих об'єктах, а не в домашньому господарстві, так як здійснювати постійний контроль за наявністю палива, завантажувати тверде паливо в бункер, чистити камеру згоряння – це досить трудомісткий процес, який забирає певний час. Дуже часто такі системи можна зустріти на деревообробних підприємствах, меблевих фабриках, в маслоцехах (спалювання лушпиння).

Якщо врахувати той факт, що вартість опалення приміщень за допомогою рідкого палива незначно перевершує вартість опалення твердим паливом, то стає зрозуміло, чому таким системам опалення віддають переваги, особливо в домашньому господарстві.

Досить новим видом палива, є пелети. Історія появи цього палива досить проста – утилізація відходів деревообробної промисловості. Пелети являють собою гранули, які отримані шляхом пресування стружок, тирси. Відходи деревообробки попередньо проходять сушку, обробка різного роду хімічними речовинами не проводиться. Є спеціальні нормативи та стандарти, яким відповідають пелети. Ось основні характеристики пелет:

- Теплотворна здатність – 18 Дж/кг (5 кВт год/кг)
- Вміст води (вологість) – близько 10%
- Об'ємна густина – 1,12 кг/дм<sup>3</sup>.

Котли на твердому паливі набувають все більшого поширення – адже таке опалення дешевше, базується на відновлюваних джерелах та дає змогу утилізувати відходи. Сьогоднішні технології дозволяють опалювати котлами на твердому паливі будь-які об'єкти – від маленьких будиночків до великих виробничих цехів, торгових комплексів, шкіл, тощо. Обираючи котел на



твердому паливі, слід, насамперед, визначитись з видами твердого палива, яке планується використовувати, та можливим способом завантаження.

Котли на твердому паливі з ручним завантаженням можуть мати різну будову та керуватись як за допомогою електроніки, так і механічним способом – наприклад простим терморегулятором, який закриває піддувало котла при досягненні заданої температури. Котли на твердому паливі обладнані електронними системами нагнітання дорожчі, в порівнянні з енергонезалежними, але дають великий вигравш в ефективності роботи за рахунок кращого згоряння палива з більшим виділенням тепла та точнішої регуляції температури.

Будова теплообмінника визначає ефективність відбору котлом тепла димових газів та зручність експлуатації. Наприклад, деякі котли на твердому паливі можуть навіть бути обладнані плитою для приготування їжі.

Котли нижнього горіння горять зверху вниз. Тепло димових газів підсушує завантажене паливо, проте слід враховувати, що їх завантажують лише один раз до повного вигорання.

Котли з горизонтальною будовою теплообмінника комфортні в обслуговуванні – їх дуже легко чистити, проте вони дещо дорожчі від котлів з вертикальними теплообмінниками.

Якщо існує необхідність завантажувати поліна великого розміру, використовують котли на твердому паливі із збільшеною топкою, проте в цьому випадку слід враховувати незначне зменшення коефіцієнта корисної дії котла (ККД).

Не слід, плутати ККД котла, який показує скільки відсотків енергії що утворилась при згорянні потрапить в систему опалення, з загальним результатом роботи – адже різні котли отримують з 1кг заданого палива різну кількість теплової енергії, і система нагнітання повітря відіграє при цьому ключову роль. Наприклад, системи нагнітання повітря з алгоритмом PID ефективніші за класичні системи нагнітання "старт-стоп".

Безумовним лідером серед котлів на твердому паливі за кількістю

енергії, отриманої при спалюванні дров, є піролізні котли. Вони спалюють дрова в два етапи – отримання газів з деревини та їх піроліз. Ця технологія дозволяє отримати з дров максимум енергії. Але це виключно дров'яні котли, і дрова для таких котлів повинні відповідати жорстким критеріям вологості – не більше 20%. Якщо ж немає можливості використовувати один вид палива, і планується спалювати і більш вологі дрова, вугілля, чи брикети, краще обрати менш вимогливий до палива, звичайний котел на твердому паливі.

Щоб порівняти час роботи різних котлів на одному завантаженні варто розуміти, що час згоряння палива визначається такими факторами, як ефективність горіння конкретного виду палива в конкретному котлі, його калорійність, коефіцієнт корисної дії котла та завантажена кількість палива. І в будь-якому випадку основним чинником будуть тепловтрати будинку. Якщо одного дня на вулиці  $+5^{\circ}\text{C}$ , а іншого  $-30^{\circ}\text{C}$ , то час роботи на одному завантаженні відрізнятиметься в кілька разів. День-у-день спалювати паливо за один і той самий час може лише котел на твердому паливі, який нічого не гріє або неефективний котел, який не здатен регулювати процес горіння. Для досягнення справді великих показників автономної роботи від 3-4 діб і більше, існують автоматичні котли на твердому паливі. Їх обслуговування зводиться до підсипання палива в бункер та періодичної чистки. При виборі котла з автоматичним подаванням слід звертати особливу увагу на пальник - наприклад пальники ретортного типу добре підходять для спалювання вугілля, та погано справляються з пелетами, а пелетні пальники з автоматичним розпалюванням швидко забиваються при використанні пелет з високою зольністю (наприклад з лушпиння соняшнику).

Отже, потрібно передусім чітко визначитись з паливом, яке буде використовуватись. Щоб не залежати від одного виду палива, треба використовувати котли з універсальними пальниками.

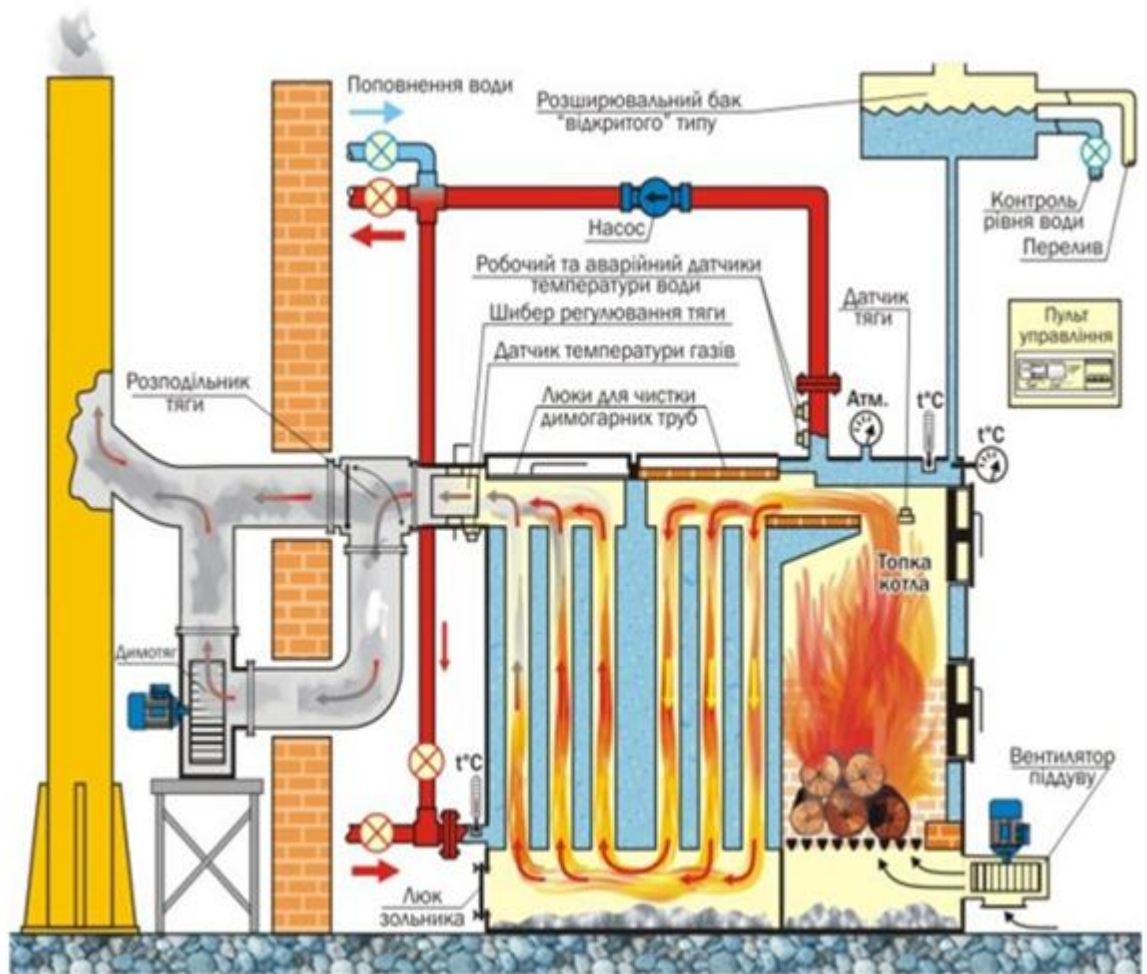


Рис. 3. 16 Схема котла на твердому паливі

### 3.3 Рідке паливо - склад і особливості згорання.

*Характеристика рідкого палива.* Рідке паливо одержують, головним чином, у результаті переробки нафти – єдиної рідкої речовини, яку одержують з свердловини. Продуктами переробки нафти є високоефективні палива, мастильні і спеціальні оливи, бітуми, парафін, сажа й ін. З продуктів нафтопереробки виробляють пластмаси, синтетичні волокна, каучук, барвники, миючі засоби, отруйні хімікати, тощо.

Нафта – це суміш великого числа вуглеводнів різної молекулярної маси і хімічної будови з домішками сірчистих, азотних і смолистих речовин. У ній міститься вуглецю 82,8-87,2%, водню 11,7 – 14,1%, сірки 0,3- 3,1% і більше, кисню 0,3- 2,1%, азоту 0,1-1,1%, а також у дуже малих кількостях є ванадій нікель, залізо, хром, германій та ін. В'язкість нафти досягає 80-100,

густина 0,73-0,9 г/см<sup>2</sup>. Нафта майже не містить золи; теплота її згоряння близько 10 000 ккал/кг, чи 41 900 кДж/кг.

Нафта класифікується за наступними ознаками:

*1. За вмістом сірки:*

- клас 1 – малосірчиста ( сірки не більше 0,5 % );
- клас 2 – сірчиста ( сірки 0,5- 2,0 % );
- клас 3 – високосірчиста ( сірки більше 2,0 % );

*2. За родовищем ( морська, материкова );*

*3. Залежно від потенційного сумарного складу палива:*

- тип  $T_1$  – вихід паливних фракцій не менше 45 %;
- тип  $T_2$  – вихід паливних фракцій 30 - 44,9 %;
- тип  $T_3$  – вихід паливних фракцій менше 30 %.

*4. Залежно від потенційного сумарного складу масел:*

- група  $m_1$  – вихід масляних дистилатів з нафти не менше 25 %;
- група  $m_2$  – вихід масляних дистилатів з нафти 15.25 %;
- група  $m_3$  – вихід масляних дистилатів з нафти менше 15 %.

*5. Залежно від якості масел:*

- підгрупа  $I_1$  – індекс в'язкості більше 85;
- підгрупа  $I_2$  – індекс в'язкості 40.85.

*6. Залежно від парафіну і можливості отримувати паливо для реактивних двигунів, дизельних палив і дистилатних базових масел:*

- вид  $P_1$  – склад парафіну не більше 1,5 %;
- вид  $P_2$  – склад парафіну 1,51.6,0%;
- вид  $P_3$  – склад парафіну більше 6,0%.

Основними способами одержання нафтопродуктів є пряма перегонка і крекінг. У процесі прямої перегонки нафта розділяється на окремі легкі фракції в залежності від температури кипіння і конденсації. Різні вуглеводні конденсуються при різних температурах: соляровий дистилат - приблизно при 350 – 300<sup>0</sup>С, газойлевий – при 300 – 250<sup>0</sup>С, лігроїн – при 250 – 200<sup>0</sup>С,

бензин – нижче  $200^{\circ}\text{C}$ . Сконденсовані фракції ( дистиляти ) охолоджуються в теплообмінниках і водяних холодильниках та перетворюються в рідину. Для перегонки мазуту (80% маси) його піддають повторному нагріванню в вакуумі до  $350^{\circ}\text{C}$  і переводять у пароподібний стан. З продуктів перегонки одержують різноманітні мінеральні оливи. Залишок перегонки – гудрон, що представляє собою малорухома маса, використовують для виробництва покрівельних та ізоляційних матеріалів і в будівництві доріг.

Відносно невисокий відсоток виходу світлих нафтопродуктів, особливо бензину, при прямій перегонці нафти обумовив необхідність застосування крекінг – процесу, заснованого на розщепленні довгих молекул важких вуглеводнів та більш короткі молекули , які можуть кипіти при низькій температурі. Розрізняють термічний ( високотемпературний ) і каталітичний крекінг. При термічному крекінгу отримують гас, соляровий дистилят, мазути і гудрон. Однак бензини термічного крекінгу, що представляють собою суміш вуглеводнів, фізично і хімічно недостатньо стійкі, тому використовуються як компоненти автомобільних бензинів. При каталітичному крекінгу як вихідну сировину використовують гасові і солярові фракції прямої перегонки і дистиляти нафтопродуктів вторинного походження.

Нафтове паливо за призначенням підрозділяється на дві основні групи: моторне, або світле, що застосовується для спалювання в двигунах, і котельно - пічне ( котельне, газоподібне і побутове), яке використовується для топок парових котлів. Промислових і побутових пічних установок.

*Моторне паливо.* Залежно від виду двигуна у свою чергу поділяється на карбюраторне і дизельне , що використовується в двигунах внутрішнього згоряння, і паливо для повітряно- реактивних двигунів та ін.

Бензин є одним з основних видів карбюраторного палива. Він являє собою суміш легких ароматичних, нафтоених і парафінових вуглеводнів. До складу бензину входить вуглець (85%) і водень (близько 15%), а також кисень, азот та сірка. Бензин – безбарвна чи трохи жовтувата рідина з

характерним запахом, густиною  $0,7 - 0,8 \text{ г/см}^3$ . Температура його спалаху нижче  $-40^{\circ}\text{C}$ , застигання – нижче  $-60^{\circ}\text{C}$ . Здатність палива протистояти детонаційному згорянню називається детонаційною стійкістю і характеризується октановим числом. Чим вище октанове число, тим більше може бути стиснута в циліндрі пальна суміш.

Октановим числом називається умовна одиниця, чисельно рівна відсотку (за об'ємом) ізооктану в суміші, що складається з ізооктану і нормального гептану та рівноцінна за своїми антидетонаційними властивостями даному паливу.

*Маркування:* промисловість випускає автомобільні бензини марок А-80, АИ-92, АИ-95, АИ-98. У марці бензину «А» показує, що він автомобільний, а цифра – мінімальне октанове число. У бензинах А-80 октанове число (80) встановлено моторним методом, а в бензинах АИ-92, АИ-95 і АИ-98 друга буква «И» показує, що октанове число (92, 95 і 98) встановлено дослідницьким методом.

Сортністю бензину називається число, що показує, яку потужність може розвивати двигун на випробуваному паливі в порівнянні з ізооктаном, сортність якого прийнята за 100. Наприклад, Б-95/130, Б-100/130.

Фракційний склад є важливим показником якості бензину та його випаровуваності, тобто здатності переходити з рідкого в газоподібний стан. Від випаровуваності палива залежать утворення пальної суміші, тривалість прогріву і легкість пуску двигуна.

Хімічна стабільність характеризується стійкістю бензину до окислювання, смоло – і нагароутворення та інших хімічних змін у двигуні, а також від фракційного складу і вмісту смол та смоло- утворюючих речовин.

Вміст смол встановлюється спеціальними стандартами і для різних марок бензину не повинен перевищувати 7-15 мг/ 100 мл.

Для підвищення хімічної стійкості в паливо додають антиокислювачі (деревносмольний, детонафтал й ін. ), що підвищують індукційний період окислювання бензину.

**Горіння рідкого палива.** Горінням називають процес екзотермічного окислення горючої речовини, що швидко відбувається та супроводжується інтенсивним виділенням тепла. В основі процесу горіння лежить хімічна реакція між горючою речовиною та окислювачем. Окислювачем звичайно служить повітря.

Горіння відрізняється від процесу окислення: швидкоплинністю перебігу в часі; змінністю концентрації компонентів у міру їх взаємодії; зміною форми поверхні реагування у часі; високим значенням температури. Процес горіння – це складний фізико – хімічний процес, що залежить від взаємодії хімічних, теплових та гідродинамічних факторів.

Реакція горіння відбувається не безпосередньо між молекулами вихідних речовин ( палива і окислювача ), а через проміжні стадії. Цим визначається ланцюговий механізм горіння, розроблений М.М. Семеновим.

Реакція горіння є результатом ряду ланцюгових реакцій, що відбуваються послідовно. Залежно від фазового стану речовин, що реагують при горінні (тверді, рідкі, газоподібні), хімічні реакції поділяють на гомогенні, що відбуваються між компонентами, котрі перебувають в одній фазі (наприклад, у газоподібному стані), і гетерогенні, що відбуваються на межі двох фаз. Прикладами гомогенного горіння є горіння добре перемішаних газового палива і повітря, а також горіння швидко випаровуваних рідких палив. При цьому мається на увазі їх перемішування з окиснювачем до процесу горіння. Прикладами гетерогенного горіння служить горіння твердих палив і горіння крапель рідких важких палив, коли фронт горіння встановлюється на межі розділу палива і окислювача. Горіння палива є потоковим процесом і для його перебігу необхідно підведення компонентів ( палива і окислювача ) у зоні реакції і відведення з неї продуктів згорання.

Організація перебігу процесу горіння можлива у ламінарному та турбулентному потоках окислювача. У загальному випадку час горіння  $t_r$  палива складається із часу перебігу фізичних  $t_\phi$  і хімічних процесів

$$t_r = t_\phi + t_x$$

Швидкість хімічної взаємодії виражається зміною концентрації речовин, що реагують, за одиницю часу. Згідно із законом дії мас в однорідному середовищі при постійній температурі швидкість реакції у кожний момент пропорційна добутку концентрації речовин, що реагують.

Самозайманням називають ініціювання горіння у всьому об'ємі реакційної суміші. Воно може статися при досягненні деякого граничного значення температури, що називають температурою самозаймання  $T$  суміші. Ця температура не є фізико – хімічною характеристикою, а залежить для кожного палива від умов підведення і відведення теплоти та інших факторів.

Температура самозаймання водню знаходиться у межах  $580 - 590^{\circ}\text{C}$ , оксиду вуглецю –  $644 - 658^{\circ}\text{C}$ , метану –  $650 - 750^{\circ}\text{C}$ .

Дизельне паливо випускають двох марок ДТ і ДМ. Паливо марки ДТ має в'язкість при  $50^{\circ}\text{C}$  менше  $5^{\circ}\text{BY}$ , температуру спалаху понад  $65^{\circ}\text{C}$ , температуру застигання менше . Паливо марки ДМ характеризується в'язкістю, що дорівнює  $2^{\circ}\text{BY}$ , температурою спалаху , температурою застигання. Нижча теплота згоряння дорівнює приблизно  $42,5$  МДж/кг. Дизельне паливо використовують в основному у дизелях, у тому числі у дизельних електростанціях.

Для процесу горіння необхідно, щоб горючі речовини і окислювач мали деяку ( певну для кожної речовини) температуру, при якій порівняно швидко відбувається їх взаємодія. Температура, при якій хімічний процес різко прискорюється при зіткненні з відкритим вогнем і речовина займається, називається *температурою займання*. Якщо займання речовини відбувається без стикання з відкритим вогнем, матимемо температуру самозаймання. Подальше горіння продовжується внаслідок безперервного виділення тепла.

Швидкість процесу горіння залежить в основному від умов сумішоутворення. Залежно від цього горіння розділяють на *кінетичне і дифузійне*. Якщо процес утворення суміші палива і повітря передує горінню, то горіння називають кінетичним і якщо процеси відбуваються одночасно –



дифузійним. На практиці, як правило, відбувається змішане горіння – *дифузійно –кінетичне*.

За температуру горіння приймають температуру, до якої нагріваються газоподібні продукти згорання внаслідок горіння палива. Розділяють температуру горіння теоретичну і дійсну. Теоретична температура горіння – це максимальна температура, яка може бути досягнута при відсутності втрат теплоти від теплообміну. В реальних умовах процес горіння супроводжується теплообміном і тепловими втратами, тому продукти згорання мають дійсну температуру горіння, яка нижче теоретичної.

Кількість кисню, теоретично необхідна для спалювання 1 кг твердого або рідкого палива, можна визначити на основі стехіометричного відношення для реакцій горіння елементів горючої маси палива ( C,H,S ).

Враховуючи їх атомну масу, знаходимо, що для спалювання 12 кг вуглецю потрібно 32 кг кисню, тобто для спалювання 1 кг вуглецю потрібно  $32/12 = 2,67$  кг кисню. Аналогічно, для спалювання 1 кг водню потрібно 8 кг кисню, а для спалювання 1 кг сірки – 1 кг кисню.

У виробничих умовах здійснити повне спалювання палива з теоретичною необхідною кількістю повітря практично неможливо. Тому для повного спалювання, як правило, подають надлишок повітря, тобто процес відбувається не за розрахунковою, а за фактичною (дійсною) кількістю повітря.

Відношення дійсної витрати повітря до теоретично необхідної для спалювання 1 кг ( $m^3$ ) палива називають коефіцієнтом надлишку повітря ( $\beta$ ).

Суміш палива і повітря називають пальною сумішшю. Залежно від співвідношення кількості палива і повітря пальна суміш може бути:

нормальна  $\beta = 1$ , бідна  $\beta > 1,15$ , багата  $\beta < 0,8$ . При значеннях близьких до одиниці – збіднена або збагачена.

Пальну суміш , яка змішалась із залишковими газами від попереднього циклу в циліндрі двигуна, називають робочою. Якщо потрібно визначити її

теплоту згоряння, то вносять поправку на коефіцієнт надлишкових газів. На практиці теплоту згоряння пальної і робочої суміші порівнюють.

Характер процесу горіння можна визначити за складом продуктів згоряння палива. Для цього існують різні газоаналізатори: хімічні, електричні, магнітні, механічні. Найпоширеніші прості хімічні газоаналізатори, які дозволяють визначити у відпрацьованих газах вміст вуглекислого газу, кисню і оксиду вуглецю. Принцип дії газоаналізаторів полягає в поглинанні розчинами певних складових елементів відпрацьованого газу, який послідовно пропускають через ці розчини. За відповідним збільшенням об'єму знаходять процентний вміст кожного окремого поглиненого компонента. Так, відсутність оксиду вуглецю свідчить про повне згоряння палива, а наявність  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}$  і  $\text{H}_2$  про неповне.

Для спалювання рідкого палива використовують різноманітні розпилювачі та форсунки. Розпилення нафтопродуктів здійснюють нагрітим повітрям. Наприклад, для розпилювання легкого нафто – палива можна використати пальник зображений на малюнку...

У початковий період, коли піч ще не прогрілася, випаровування не відбувається, піч димить, нагрів йде повільно і неефективно. Випадковий перегрів в нафтопроводі викликає відкладення сажі та закупорку. Коли вогнетривкі стінки 2 прогріються нафтопродукти розпилені нагрітим повітрям згоряють вибухоподібно, утворюючи факел полум'я.

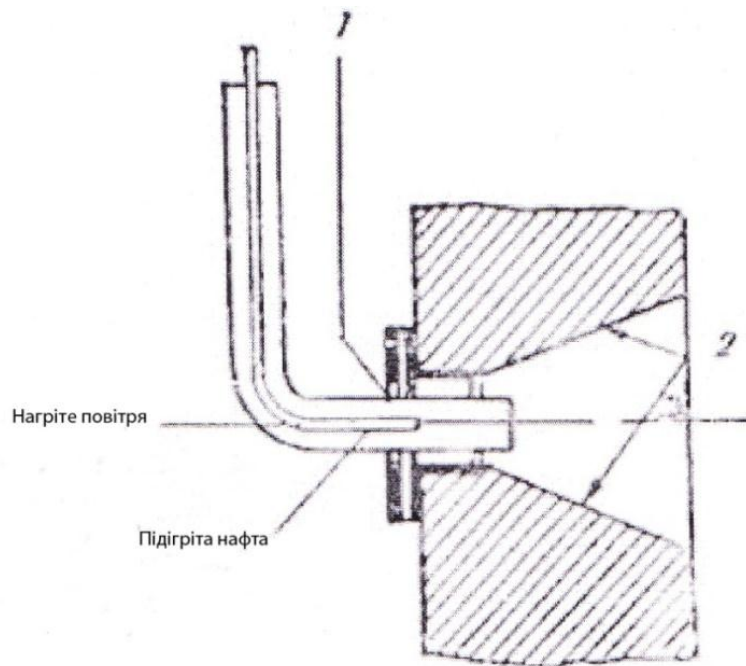


Рис. 3. 17 Пальник для спалювання легкого нафтового палива  
*1 - регулювальна шайба; 2-вогнетривка стінка.*

Більшість пальників, які застосовуються на практиці, засновані на принципі розпилювання, тобто розбризкуванні у вигляді туману найдрібніших частинок нафти або смоли. Розпилювання є лише способом досягнення швидкого випаровування і перемішування палива з повітрям, перш ніж частинки вуглецю зможуть досягти стінок печі. За розпилюванням йде випаровування і перемішування з повітрям і, нарешті, горіння. Три стадії: розпилювання, випаровування ( перемішування) і горіння. Вони наближаються одна до іншої до такої міри, що між ними не можна провести точну грань, але все ж вони є фізичною реальністю. Більш досконалим є пальник в «конусному тунелі» (Рис. 3. 18).

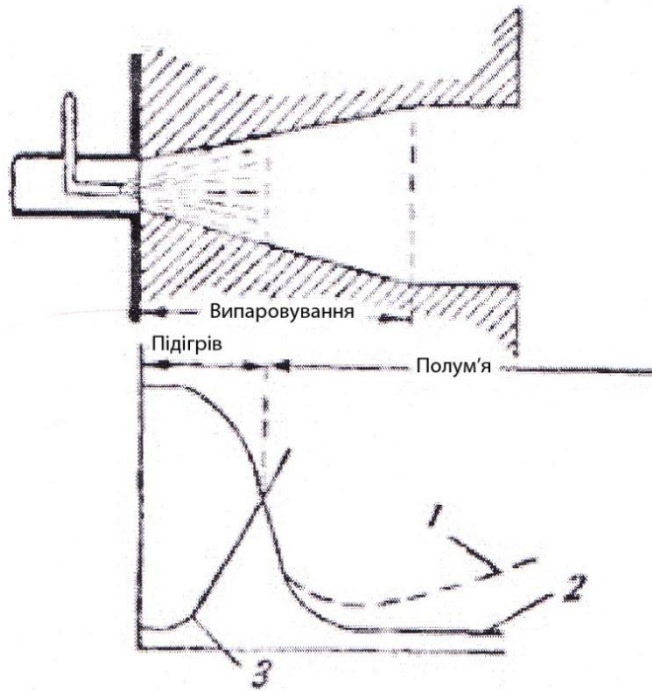


Рис. 3. 18 Пальник в конусному тунелі:

*1-швидкість струменя після згорання; 2-швидкість не загорівшого струменя 3-швидкість поширення полум'я.*

Нафта або її продукти будь-якого сорту, підігріті до  $450^{\circ}\text{C}$  або вище і не набрали контакт з киснем, розщеплюються. Мазути та інші залишкові продукти при випаровуванні крекінгують. У процесі крекінгу вивільняються частинки вуглецю (сажі). Вони сильно розжарюються і надають полум'ю нафти і смоли характерну яскравість. Після того, як рідке паливо залишає сопло розпилювача, розпилення паливо на дрібні краплинки, змішується з повітрям в пальниковому блоці, звідки переходить в камеру згорання. Пальниковий блок, нагріваючись за рахунок випромінювання топкового простору печі, нагріває рідке паливо, значна частина якого випаровується. Нарешті, досягається така температура, при якій повністю випаровується кожна крапля палива або ж його залишки розкладаються на вуглець і водень.

При спалюванні рідкого палива треба врахувати два фактори, а саме: тонкість розпилювання й ступінь випаровування. За інших рівних умов, чим дрібніше краплі, тим швидше їх нагрівання і часткове випаровування. З цього випливає, що розпилювання сильно впливає на ефективність горіння рідкого палива, особливо при обмеженому топковому просторі. Чим важче паливо

(чим більша його в'язкість), тим більше значення має якість його розпилування.

Ефективною є горілка з циліндричним тунелем. За рахунок розрідження на початку потоку розпилене паливо завихрюється, що сприяє кращому його перемішуванню з повітрям (Рис. 3. 19).

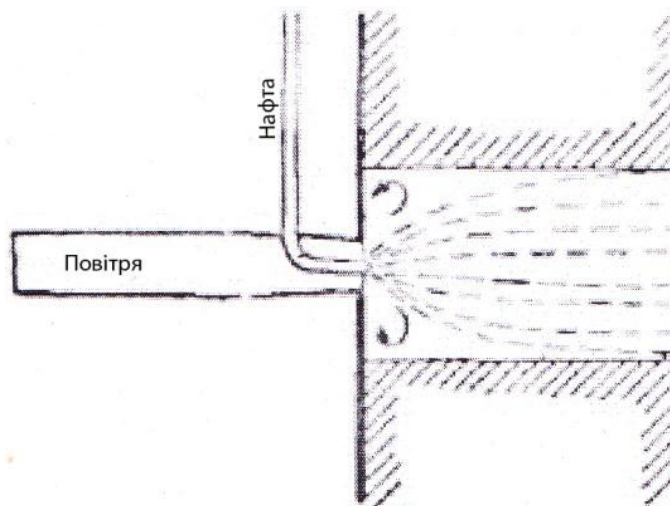


Рис. 3. 19 Пальник з циліндричним тунелем

Найбільш ефективним є розпилення форсунками, пристроями які паливо впорскують в камеру згоряння під великим тиском. В камері воно змішується з повітрям і якщо температура повітря достатня для самозагоряння, то загоряється. На такому принципі працює система живлення дизельних двигунів.

За способом розпилування рідкого палива форсунки можна розділити на три основні групи: механічні; з розпилувальним середовищем; комбіновані. В *механічних форсунках* розпилування здійснюється головним чином за рахунок енергії палива при протискуванні його під значним тиском через малий отвір – сопло, або за рахунок відцентрових сил, створюваних при закручуванні палива, або при обертанні елементів самої форсунки. Зазвичай мазут поступає до форсунок під тиском 2,0...3,5 МПа. Наявність механічних домішок в мазуті і малі вихідні отвори форсунок (1,5...3,5 мм) обумовлюють необхідність ретельної фільтрації мазуту. Продуктивність

форсунок регулюють зміною тиску мазуту перед форсункою, внаслідок чого вони мають малий діапазон регулювання.

У форсунках з розпилювальним середовищем розпилювання палива здійснюється головним чином за рахунок енергії розпилювача (пари або повітря), що рухається з великою швидкістю. При паровій пульверизації мазуту застосовують пару тиском 0,5...2,5 МПа, і тому витрата пари при цьому складає 0,3...0,35 кг/кг мазуту. При повітряній пульверизації мазуту у форсунках повітря має тиск 0,002...0,6 МПа, а питома витрата складає 0,6...9 кг/кг мазуту. При цьому забезпечується тонке розпилювання і менші вимоги до очищення мазуту.

Парові форсунки якісно розпилюють, добре регулюються, але мають значні витрати пари – до 5% від паровидатності котла, втрати конденсату, підвищений вміст  $H_2O$  в газах, що збільшує витрати тепла і посилює корозію, підвищений шум.

Таким чином, для котлів середньої і великої продуктивності при постійній роботі на мазуті застосовуються механічні форсунки як найекономічніші. Парові форсунки застосовуються для котлів малої продуктивності, а також як розпалювальні.

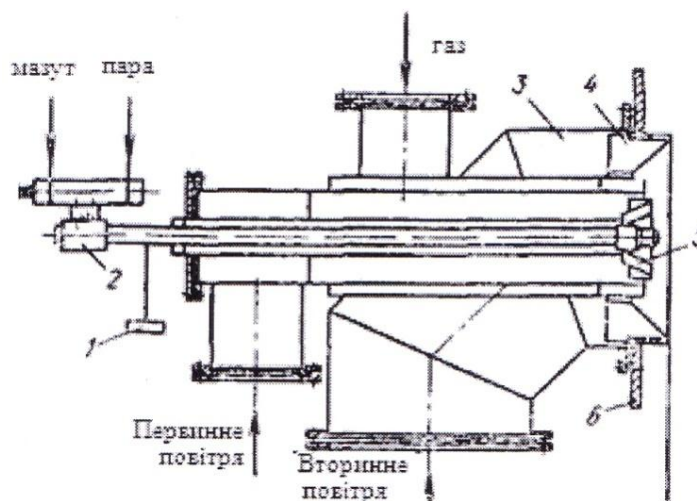


Рис. 3. 20 конструкція газомазутного пальника:  
1 – заглушка; 2 – форсунка; газоповітряна частина; 4,5 - лопаткові завихрувачі; 6 – монтажна плита.

В комбінованих форсунках розпилювання палива здійснюється за рахунок сумісного використання енергії палива, що подається під тиском, і енергії розпилювального середовища. Комбіновані форсунки при підвищених навантаженнях котла працюють як механічні, а при малих навантаженнях (менше 60%), а також пускових режимах в них подають також пару. Ротаційні форсунки не вимагають ретельної фільтрації мазуту, дають добре розпилювання і володіють широким діапазоном регулювання продуктивності ( 15...100% ).

Недоліками таких форсунок є складність конструкції і шум при роботі. В промисловості широко використовується комбіновані пальники для роздільного і сумісного спалювання мазуту і газу (Рис. 3.20). За основу створення таких пальників приймають звичайні газові пальники, в центральну частину яких встановлюють мазутну форсунку. При спалюванні мазуту повітря нагрівається до  $200 - 300^{\circ}\text{C}$  . Додаткова інтенсифікація розпилювання мазуту досягається подачею повітря в топку через реєстри у вигляді окремих струменів із швидкістю 40...50м/с.

При спалюванні мазуту виникають утруднення з видаленням золи з поверхні нагріву котла, що пов'язано з наявністю у відкладеннях легкоплавких з'єднань ванадію і лужних металів, що приводить до високотемпературної корозії труб і підвісок пароперегрівників.

Сірка, що міститься в мазуті при згорянні утворює в основному сірчистий ангідрид  $\text{SO}_2$  . Незначна частина сірки згоряє до  $\text{SO}_3$  , який , з'єднуючись з водяними парами, дає сірчану кислоту. Для зниження в продуктах згоряння вмісту сірчаного ангідриду спалювання мазуту ведуть з гранично малим коефіцієнтом надлишку повітря, близьким до одиниці  $\alpha_t = 1,05 \dots 1,1$ . При цьому температура точки роси істотно знижується. Зниження  $\alpha_t$  призводить також до значного зниження концентрації оксидів азоту  $\text{NO}_x$  в продуктах згоряння мазуту.

### **3.4 Склад і основні характеристики газоподібного палива і особливості його згорання.**

Найраціональнішим видом палива для житлово-комунального господарства і промисловості є газоподібне. Воно має переваги порівняно з твердим паливом: нижча собівартість; вищий ККД використання в теплопідготовчих установках; вищі санітарно-гігієнічні показники за рахунок меншої кількості шкідливих речовин у продуктах згорання. Крім того, полегшується праця людини на виробництві й у побуті, підвищується рівень механізації й автоматизації технологічних процесів. Для газопостачання міст і промислових підприємств застосовують природні та штучні горючі гази.

Газоподібне паливо є найбільш привабливим у використанні завдяки своїм властивостям: висока теплоутворююча здатність; відсутність золи при згоранні; незначний вміст шкідливих домішок, які не забруднюють навколишнє середовище; відсутність диму і кіптяви при згоранні; зручність у використанні, транспортуванні, зберіганні; можливість автоматизації процесів горіння.

*Газоподібне паливо та його класифікація.* До горючих газів належать: вуглеводні, водень та оксид вуглецю; негорючі компоненти — азот, діоксид вуглецю, кисень. Негорючі компоненти складають баласт газоподібного палива. Домішками також є водяна пара, сірководень, пил.

Газоподібне паливо буває природним і штучним. Штучні гази можуть містити аміак, ціаністі сполуки, смолу та ін.





Рис. 3.21 Класифікація газоподібного палива

За призначенням газоподібне паливо ділиться на котельно-пічне і моторне. Як котельно-пічне паливо використовується в основному природний газ, дуже рідко-промислові гази, які одержують в процесі переробки природного палива.

Природний газ, теплотворна здатність якого становить 8480 ккал/кг, тобто значно більша, ніж кам'яного вугілля, знаходить дедалі ширше застосування. Його використовують у металургійній промисловості, електро – теплоенергетиці, в побуті, а також як сировину в хімічній і нафтохімічній промисловості.

Основною складовою природного газу є метан ( $CH_4$ ), який виділяє велику кількість теплоти при згорянні. Крім того, до його складу входить пропан, бутан, пентан, а також двооксид водню, окис вуглецю та інші домішки, які є баластом газу.

Природний газ все більше знаходить застосування на автомобільному транспорті, тому що він є більш зручним у використанні, октанове число його значно вище порівняно з бензином, менший ступінь забруднення повітря відпрацьованими газами, при його використанні менше зношуються деталі двигуна.

Але використання газу транспортом обмежено через те, що недостатньо розвинена мережа газозаправних станцій. Необхідно оснащувати автомобілі балонами великої місткості, високого тиску і взагалі переоснащувати паливно-провідну систему, менший ресурс пробігу автомобіля, до того ж газ більшою мірою пожежо-небезпечний.

Генераторні гази одержують у результаті газифікації твердого палива (вугілля, торф, напівкокс) окисленням водню, який в них міститься, при високій температурі.

Залежно від призначення генераторного газу виділяють: паливо для промислових печей, двигунів внутрішнього згорання чи побутових газових установок. Генераторний газ в залежності від реагенту продування одержують наступних видів: повітряний, водяний, змішаний; процес проходить у вертикальних печах-газогенераторах, в які зверху завантажують паливо, а знизу проводять його продування. Якщо окислювач – повітря, то одержаний газ називають повітряним генераторним газом, пари води – водяним генераторним газом, суміші водяної пари і кисню – парокисневим генераторним газом (змішаним).

Доменний газ є побічним продуктом доменного виробництва і після очищення від пилу використовується в суміші з коксовим газом у цехах металургійних підприємств. Теплота згорання доменного газу  $90 - 01000 \text{ ккал/м}^2$  або  $3770 - 4190 \text{ кДж/м}^2$ .

Коксовий газ одержують у результаті коксування твердого палива. Його використовують для нагрівання коксових, мартенівських і скловарних печей, для комунально-побутових потреб і як сировину в хімічній галузі.

Зкраплені гази при температурі від  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  і тиску 0,2–1,6 МПа перебувають в рідкому стані, а при підвищенні температури і зниженні тиску переходять у газоподібний стан. Їх одержують на газоконденсаторних установках при газових родовищах і як побічний продукт при переробці нафти. Випускаються трьох видів: пропан технічний, бутан технічний і суміш пропану з бутаном.

Стиснені гази містяться в балонах і газопроводах під тиском до 20 МПа. Стиснені гази випускаються трьох марок: коксовий метанозований, коксовий збагачений і природний.

*Склад газоподібного палива.* Азоподібне паливо характеризується складом і кількістю газів, що входять в нього (метан, етан, пропан, бутан, оксид вуглецю, водень, бензол, сірководень та ін.).

Таблиця 3.22 – Склад газоподібного палива

Гази	Склад за вмістом хімічних елементів, %							Питома теплота згорання, кДж/м <sup>3</sup>
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Природний газ і гази нафтопереробки	0-1,5	0-30	10-95	1-20	0-10	0-7	0,1-10	29,0-4,0
Коксовий	5-10	48-55	10-25	1,5-3	2-4	0,1-1	5-10	18,8
Доменний	26-33	1-3	0,2-05	—	7-12	—	57-60	3,6-4,2
Генераторний із антрациту	25-28	12-16	1-2,5	—	3-6	0,5-0,8	50-58	5,4-6,7

Основними шкідливими домішками палив є сірка та її сполуки, сполуки кисню, азот, волога й зола.

Оскільки проблема захисту навколишнього середовища має величезне значення, то котельні є одним з основних джерел забруднення повітря. Під час спалювання палива в котельнях у повітря надходить велика кількість твердих частинок (зола, попел, сажа), окисів сірки ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ), окисів азоту ( $NO$  та  $NO_3$ ), а також оксиду вуглецю та різних органічних кислот.

Сульфатна сірка не бере участі у процесі горіння й випадає із шлаком та золою, горюча частина сірки виділяє сірчистий ангідрид, який з водою утворює сірчану кислоту. Остання призводить до корозії поверхонь

нагрівання. Сірчистий ангідрид навіть у малих концентраціях діє подразливо на слизові оболонки, дихальні шляхи. Він є шкідливим для багатьох рослин.

Кисень та азот не беруть участі у горінні, вони є баластом. При значних температурах азот може утворювати двоокис азоту, який, як і окис вуглецю, утворює з'єднання з гемоглобіном, що призводить до важких отруєнь.

Волога знижує теплоту згоряння палива, зменшує горючу частину та відбирає теплоту для нагрівання й пароутворення, заважає горінню.

Попіл знижує теплоту згоряння палива, крім того, він забруднює поверхню нагрівання й зменшує ККД котла.

Від шкідливих домішок газоподібне паливо очищають: вміст шкідливих домішок у газоподібному паливі не повинен перевищувати (в грамах на  $100 \text{ м}^3$  газу, призначеного для газопостачання міст): сірководень – 2; аміак – 2; ціаністі сполуки у перерахунку на синильну кислоту – 5; смоли та пилу – 0,1; нафталіну – 10 (літом) та 5 (зимою). Природні гази не містять аміаку, ціаністих сполук та нафталіну.

Газоподібне паливо характеризується такими основними показниками:

- теплота згоряння – це кількість теплоти, що виділяється при повному згорянні  $1 \text{ м}^3$  газу. Розрізняють вищу  $Q_{рв}$  і нижчу  $Q_{рн}$  теплоту згоряння. У практичних розрахунках використовують  $Q_{рн}$  – теплоту згоряння без урахування теплоти конденсації водяної пари, що міститься в продуктах згоряння;
- температура займання газоповітряних сумішей характеризує умови запалювання й оцінюється при розробці методів спалювання газу й правил техніки безпеки;
- температура горіння – це максимальна температура, при якій відбувається повне згоряння газоповітряної суміші в умовах, коли теплота, яка виділяється, повністю витрачається на нагрівання утворених продуктів згоряння;
- концентраційні границі займистості (вибуховості) – це вміст газу в газоповітряних сумішах, при яких можливе займання цих сумішей.

Розрізняють нижню і верхню границі займистості. Нижня границя відповідає мінімальному, а верхня – максимальному вмісту горючого газу в суміші з повітрям (або з киснем), при якому вона займається від запалювання. Поза концентраційними межами газоповітряні суміші не горять і не вибухають. Газоповітряна суміш, в якій вміст газу знаходиться між нижньою і верхньою границями займання, є вибухонебезпечною.

Для газоподібного палива, як правило, відомі його об'ємні характеристики:

- склад – метан ( $\text{CH}_4$ ), етан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ), пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) та більш важкі вуглеводні, азот ( $\text{N}_2$ ), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), оксид ( $\text{CO}$ ) і діоксид ( $\text{CO}_2$ ) вуглецю;
- теплота згоряння;
- об'ємна витрата;
- об'єм використаного палива за певний проміжок часу.

Горючі природні гази протягом геологічних епох утворювались при розкладі речовин рослинного та тваринного походження та скупчувались в підземних порожнинах, утворених скривленими пластами порід. Вони являють собою суміш різних вуглеводнів метанового ряду. Природні гази не містять водню, оксиду вуглецю і кисню. Вміст в газі азоту та вуглекислого газу за звичай невисокий. Гази деяких родовищ містять у невеликих кількостях сірководень.

Природні гази можна поділити на три групи:

- гази, що видобувають з чисто газових родовищ. Вони в основному складаються з метану ( $\text{CH}_4$ ) і є не жирними та сухими. Вміст важких вуглеводнів (від пропану та вище) в сухих газах не перевищує  $50 \text{ г/м}^3$ ;
- гази, що виділяються із свердловин нафтових родовищ разом з нафтою, іноді їх називають супутніми. Крім метану, вони містять значну кількість більш важких вуглеводнів (понад  $150 \text{ г/м}^3$ ) і носять назву жирних

газів. Жирні гази являють собою суміш сухого газу, пропан-бутанової фракції та газового бензину;

- гази, що видобувають з конденсатних родовищах, які складаються з суміші сухого газу та парів конденсату і випадають при зниженні тиску. Пари конденсату – це суміш парів важких вуглеводнів, що містять більше ніж 5 атомів вуглецю: бензин, лігроїн, гас.

Сухі гази легші за повітря, а жирні можуть бути легшими або важчими за повітря залежно від вмісту в них важких вуглеводнів. Нижча теплота згоряння сухих газів складає 31-38 МДж/м<sup>3</sup>, супутніх газів 38-63 МДж/м<sup>3</sup>. До природних газів можуть бути віднесені і скраплені гази – суміш пропану та бутану з теплою згоряння 90-110 МДж/м<sup>3</sup>. Природні гази видобувають через свердловини, глибина яких визначається глибиною залягання газових пластів і досягає 5000 і більше метрів. Тиск в газових пластах змінюється від 7 до 40 МПа, тому газ із свердловини виходить під впливом пластового тиску.

Після виходу з свердловини газ направляють на очищення від пилу та інших речовин у відцентрові апарати, де газ піддається, крім того, осушенню, тому що під час транспортування вологих газів утворюються кристалогідрати важких вуглеводнів, які захаращують (забивають) трубопроводи, зменшуючи їхній переріз.

У супутніх нафтових газах міститься значна кількість газового бензину і тому його уловлюють. Іноді газ очищують від сірководню та двооксиду вуглецю, що підвищує якість газу та поліпшує умови транспортування.

Очищений природній газ направляється по газопроводу зі сталевих труб від місця видобування до споживачів. Незначний вміст баласту дозволяє транспортувати газ на великі відстані. На трасі газопроводу споруджують компресорні станції для перекачування газу (одна на 120-160 км), які підвищують тиск газу. Тиск газу на початку ділянки 6 МПа, а у кінці ділянки 2,5 МПа. Сучасні компресорні станції обладнані відцентровими компресорами з приводом від газових турбін потужністю 4000-9000 кВт або

електродвигунами. Природній газ з магістральних газопроводів надходить на ГРС (газорозподільні станції), де він піддається очищенню від механічних домішок, а його тиск знижується до величини, яка допустима для розподільного газопроводу. Розподільні газопроводи використовують для транспортування газу в різні частини міста та до промислових підприємств. На ГРС газ одорізують (надають певний запах), вимірюються його витрати. На ГРС газ дроселюють від тиску в кінці магістрального газопроводу (1,5-4 МПа) до тиску на початку розподільного газопроводу (0,6-1,2 МПа). На території населених пунктів газ транспортують по розподільних мережах:

- високою тиску – 0,3-1,2 МПа (великі споживачі газу – електростанції, металургійні заводи);
- середнього тиску – 0.05 – 0.3 МПа (великі промислові споживачі, центральні опалювальні котельні);
- низького тиску – до 5 кПа.

З мереж середнього тиску газ через ГРП надходить в мережі низького тиску, від яких постачають газ до основної маси побутових установок. ГРП служить для того, щоб знизити тиск газу, який надходить на завод, до необхідної величини і автоматично підтримувати тиск газу після ГРП незалежно від коливання його витрати.

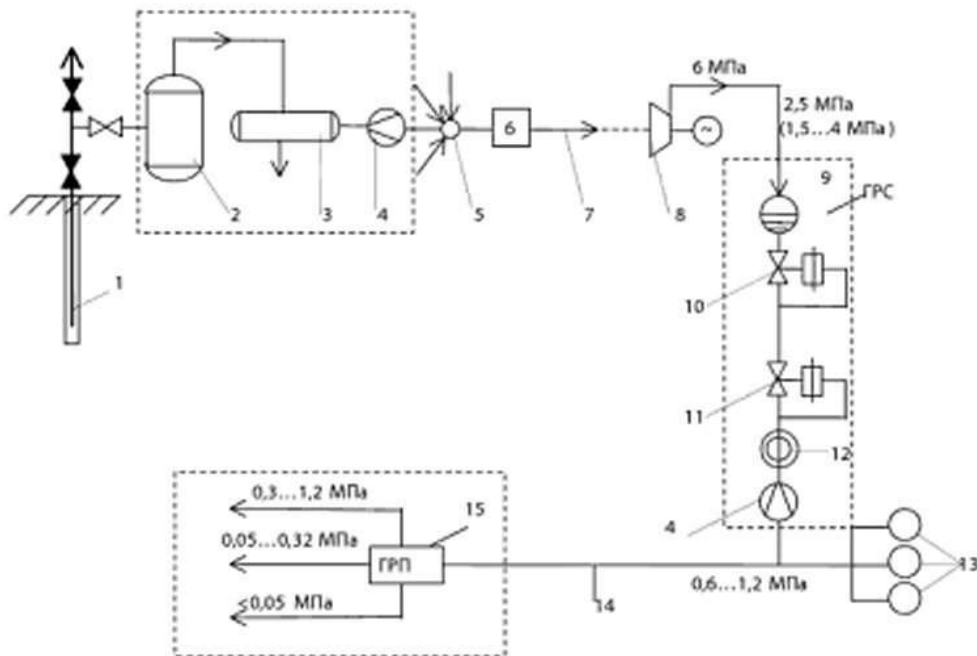


Рис. 3.23 Принципова схема видобування транспортування та розподілу природного газу: 1 – свердловина; 2 – первинний пилоуловлювач механічних домішок; 3 – сепаратор для уловлювання завислої вологи; 4 – прилад для вимірювання кількості газу; 5 – колектор для збирання газу від різних свердловин; 6 – пристрій для очищення та осушення газу; 7 – магістральний газопровід; 8 – компресорна станція; 9 – газорозподільна станція (ГРС). 10 і 11 – регулятори 1-го та 2-го ступеня; 12 – одоризатор; 13 – газгольдери; 14 – газорозподільний газопровід подачі газу на підприємство; 15 – заводський газорегулювальний пункт (ГРП)

*Штучні горючі гази, джерела їхнього отримання та застосування.* У роки, що передували розвитку виробництва природних газів, велике поширення знаходив світний або міський газ, який отримували в результаті сухої перегонки твердого палива, зокрема кам'яного вугілля з високим вмістом летких або горючих сланців. Виробництво таких газів було зосереджено на спеціальних газових заводах, газ використовували в основному в побуті: газові плити та водонагрівачі. Сьогодніне виробництво таких газів у зв'язку з розвитком добування природних газів незначне.

Велику кількість штучних газів отримують на сучасних коксохімічних заводах як побічний продукт виробництва металургійного коксу з коксуючого вугілля або на спеціальних установках напівкоксування (низькотемпературне коксування).



Гази сухої перегонки виробляють шляхом нагрівання жирного ка-м'яного вугілля у спеціальних печах без доступу повітря. Ці гази підроз-діляються на:

- коксовий газ, температура процесу 900-1100 °С, вихід газу 300-330 м<sup>3</sup>/т вихідного вугілля, склад газу: Н<sub>2</sub>= 56-60 %; СН<sub>4</sub>= 22-26 %; С<sub>м</sub>Н<sub>н</sub>= 6-8 %; СО<sub>2</sub>= 2 %; N<sub>2</sub> = 5-7%;
- напівкоксний газ, температура процесу 500-550 °С, сировина – молоде буре вугілля, вихід газу 25-150 м<sup>3</sup>/т сировини, склад: Н<sub>2</sub> =20-25 %; СН<sub>4</sub> =50-52 %;СО=2 %; СО<sub>2</sub> =4-5 %; N<sub>2</sub> =5 %.
- сланцевий газ, температура процесу 1000-1100 °С, сировина – сланці, вихід газу 300-350 м<sup>3</sup>/т сировини, склад: Н<sub>2</sub>=22-27%, СН<sub>4</sub> =14-17%, СО=28 %, СО<sub>2</sub> =17%, С<sub>м</sub>Н<sub>н</sub> =5-6%;
- доменний газ – побічний продукт виробництва чавуну в доменних печах, вихід газу 2500-4000 м<sup>3</sup>/т чавуну, склад газу: Н<sub>2</sub>=2,5-3%, СН<sub>4</sub>=0,3 - 0,4%; СО=28%, СО<sub>2</sub> =13-14%. N<sub>2</sub> = 58%;
- нафтозаводські гази;

*Умови зберігання газоподібного палива.* Газоподібне паливо з транспортних магістральних трубопроводів надходить на газорозподільні станції і після відповідної підготовки по газопроводах постачається споживачам або подається в накопичувальні резервуари для зберігання.

Газ зберігається в балонах, газгольдерах і підземних сховищах. Балони для зберігання газу (пропану, бутану та ін.) виготовляються з якісних сталей і розраховані на тиск 20,15 і 10 МПа. Для розпізнавання їх фарбують у червоний колір.

Горючі гази в різноманітних пропорціях з повітрям утворюють вибухові суміші, крім того, деякі з них, особливо промислові, токсичні і отруйні. При вдиханні метану – основного компоненту природного газу – настає задуха. Зріджені гази, коли попадають на шкіру людини, викликають обмороження. Тому необхідно при поводженні з ними суворо дотримуватись правил безпеки.

*Газові котли для індивідуального опалення.* З самого виникнення багатоповерхових квартирних будинків їх жителі безпосередньо залежали від якості роботи тепломережі. Але сьогодні ситуація змінюється з кожним днем, адже багато хто перейшов на індивідуальне опалення. Воно може бути газовим або електричним. Звичайно, ця перспектива поки властива приватним і заміським будинкам, але серед жителів сучасних квартир теж чимало людей, які встановили автономну систему опалення.

Безперечною і головною перевагою системи індивідуального опалення в квартирі є незалежність. Господар житла сам вирішує, коли потрібно включити прилад і таким чином підвищити температуру в кімнатах, а коли вимкнути. Це вельми економічний і зручний варіант опалення, особливо якщо враховувати вартість сьогоднішніх комунальних послуг. Ще одним плюсом такого виду опалення квартири є наявність гарячої води в будь-який час доби на відміну від тієї води, яку нам дає тепломережа. Але не тільки позитивні, але і негативні сторони варто розглянути.



Рис. 3.24 Індивідуальне опалення в квартирі

Найголовнішим і вагомим мінусом такої індивідуальної системи опалення квартири є те, що власник бере всю відповідальність справності системи на себе. Якщо через неправильну експлуатацію газового котла буде вибух, то постраждає не тільки власна квартира, але й ті, хто оточує

квартиру. Тому роботу всієї системи постійно потрібно контролювати і його потрібно вимикати у разі тривалої відсутності. На щастя, сучасні опалювальні котли мають систему аварійного відключення у разі неполадки. У зв'язку з цими особливостями можна зробити висновок, що індивідуальне опалення в квартирі хоч і зручно саме по собі, але надзвичайно клопітке і вимагає особливого знання та догляду. Більшість сучасних котлів працюють тільки за певних сприятливих умов: відсутність у котлів напруги (якщо це електричний котел), дуже чиста вода, певний тиск газу і так далі. Якщо якась умова не виконана, то котел може просто заблокуватися до тих пір, поки не з'являться потрібні йому параметри. Це часом незручно і доставляє масу клопоту.



Рис. 3.25 Вихід на вулицю труби з газового котла

Не можна забувати про те, що на установку подібної опалювальної системи потрібно отримати спеціальний дозвіл відповідних служб.

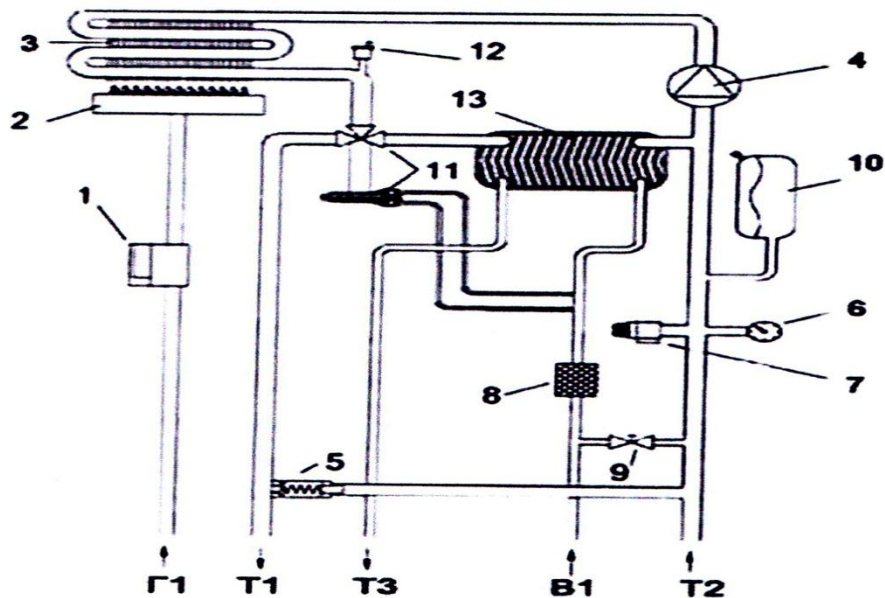


Рис. 3.26 Схема котла для індивідуального опалення:  $T1$ - подавання у систему опалення,  $T2$ - повернення з системи опалення,  $T3$ - подавання гарячої води,  $Г1$ подавання газу,  $В1$ - подавання води з водопроводу, 1- клапан, 2- пальник, 3- основний теплообмінник, 4- насос, 5- байпас, 6- манометр, 7-запобіжний клапан, 8- фільтр, 9- кран подавання, 10- компенсатор об'єму, 11- триходовий клапан, 12- автоматичний повітровивід, 13- теплообмінник горячого водопостачання, 14- рекуператор об'єму (конденсаційний теплообмінник), 15- пристрій для відведення конденсату, 16- вентилятор.

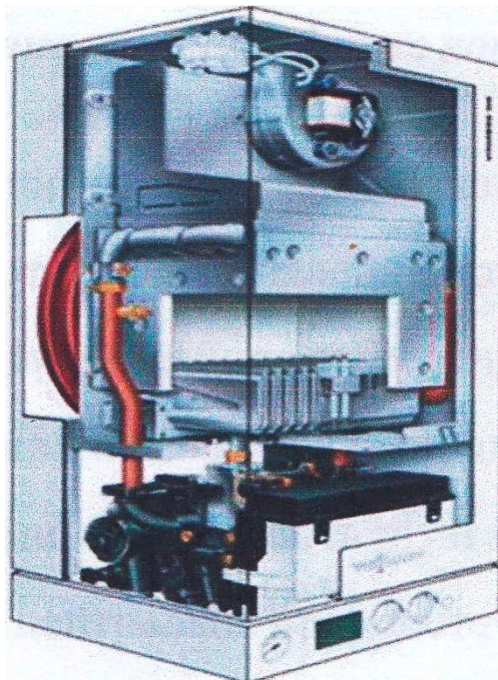


Рис. 3.27 Внутрішня будова настінного котла

Багато жителів сучасних багатоповерхових будинків, не дивлячись на деякі недоліки автономного опалення, все ж переходять на нього. У першу чергу це пов'язано з нинішніми цінами на гарячу воду та опалення. Поштовхом до таких змін так само стала поява на ринку опалювального обладнання спеціальних котлів, які мають пальник закритого типу. Це означає, що повітря для здійснення процесу горіння в котлі береться не з кімнати, а з вулиці. На вулицю виштовхуються і гази за допомогою спеціального вентилятора. Тому ніякої шкоди для здоров'я індивідуальне опалення в багатоквартирному будинку тепер не несе.

Можна виділити два основних напрямки розвитку газового опалення

- опалення за допомогою зрідженого газу , в тому числі і за допомогою біогазу ;
- використання магістрального газу.

Опалення скрапленим газом є своєрідною альтернативою твердому і рідкому паливу. Ефективність такого опалення дуже висока, але і витратна частина в кілька разів може перевищити вартість придбання і монтажу стандартної системи опалення на твердому паливі. Справа в тому, що подібні системи опалення вимагають обов'язкової реєстрації в органах технагляду. Крім цього належить виконати цілий ряд робіт, які пов'язані з обладнанням сховища для скрапленого газу.

Для опалення квартири найкращий двоконтурний котел з герметичною камерою згоряння. Такий котел дозволяє не тільки опалювати приміщення, але і забезпечує гарячою водою. Крім того, продукти згоряння будуть викидатися в атмосферу безпосередньо через трубу в стіні, минаючи вентиляційні системи будинку (Рис. 3.28). Отримання дозволу на підключення димоходу котла до вентиляційної системи багатоквартирного будинку вкрай складно із за різних як бюрократичних, так і технічних складнощів. Саме з цієї причини краще купувати більш дорогий котел з герметичною камерою згоряння.

Потрібно пам'ятати, що для опалення 10 м<sup>2</sup> . стандартної площі необхідно затратити близько 1 кВт енергії. Для опалення квартири загальною площею близько 100 м<sup>2</sup> знадобиться котел потужністю не менше 10-12кВт. Сучасні настінні двоконтурні газові котли виготовляють в основному потужністю від 20 кВт. Цього запасу потужності більш ніж достатньо для опалення приміщень, навіть якщо у цих приміщень досить високі теплові втрати . Крім того, котел який працює на повну потужність швидше вичерпає свій , так би мовити запас міцності, або ресурс.

**Котли для індивідуального опалення.** Котел GCB 24 Basic X Fi фірми ELEKTROLUX. Продукція цієї фірми відрізняється високою якістю, довговічністю. Даний котел прекрасно підходить для опалення та гарячого водопостачання невеликих приміщень. Єдина незручність – відкрита камера згоряння.



Рис. 3.28 Котел ELEKTROLUX GCB 24 Basic X Fi

Це означає, що потрібно отримати дозвіл на підключення даного котла до системи вентиляції будинку. В іншому робота котла нічим не відрізняється від роботи двоконтурного котла з герметичною камерою згоряння.

До достоїнств даного котла можна віднести можливість роботи з системою «Тепла підлога», наявність системи антизамерзання, наявність модуляції (регулювання потужності протягом роботи). Котел дозволяє підключати дистанційну систему управління (програмактор), що робить роботу з котлом ще більш зручною.

Настінний газовий опалювальний котел Electrolux GCB 24 Basic X Fi використовується для опалення та гарячого водопостачання приміщень площею до 230 м<sup>2</sup>.

Газові котли Electrolux Basic відрізняються виключно зручним управлінням, надійністю і безпекою в роботі, прогресивним сучасним дизайном і широким переліком функціональних і сервісних можливостей .

*Відмінні особливості котлів Electrolux серії Basic :*

- Закрита камера згоряння ( примусова тяга ) забезпечує подачу повітря для горіння з вулиці.
- Крупний цифровий дисплей відображає всю інформацію про роботу котла, показує коди несправностей, це дозволяє усувати їх за короткий термін.
- Бітермальний теплообмінник, об'єднує два контури - опалення та гарячого водопостачання.
- Підтримка постійної температури гарячої води, забезпечується функцією «Comfort».
- Функція прискореного виробництва гарячої води «Water Recall», забезпечує її миттєву подачу в момент відкриття крана.
- Інтелектуальна система динамічного контролю температури гарячої води «DTC», що дозволяє досягти максимального комфорту гарячого водопостачання.
- Режим для роботи з теплою підлогою «Affect Floor».
- Система проти замерзання «No- freez» , у разі падіння температури в контурі опалення нижче 5 ° C включається автоматично.

- Система бездротового дистанційного управління «Fly- by - wire» , дозволяє контролювати роботу котла на відстані, наприклад, з тієї частини будинку, де в даний момент знаходиться користувач.

- Система програмування «Programm Easy» дозволяє задати режим роботи котла на кожні 30 хвилин протягом тижня , що дозволяє значно економити газ.

- Система погодозалежного управління «ETC» (External Temperature Control) зберігає температуру в приміщенні, що обслуговується на заданому рівні незалежно від зовнішніх кліматичних змін .

- Постійна модуляція потужності.

- Багаторівнева система безпеки, котел захищений від перегріву, перебоїв в електропостачанні і впливу низьких температур.

- Сучасний дизайн.

*Додаткові характеристики котлів Electrolux GCB 24 Basic X Fi :*

Приблизна площа обігріву – 60-220 м<sup>2</sup> , номінальний ККД – 90-91, регулювання температури опалення – 40 ° С -85 ° С (в режимі « Affect floor » - 35 ° С-60 ° С), регулювання температури ГВП – 35 ° С-60 ° С (42 ° С в режимі «Comfort»), хв . / макс . тиск (ГВП) – 0,3 / 6 бар, максимальна температура опалення – 90 ° С, мінімальний тиск для розпалювання – 2,5 бар

Двоконтурний котел з герметичною камерою згоряння Vaillant Plus VUW 202/3-5. Його вартість дорожча, це викликано в першу чергу наявністю герметичної камери згоряння з примусовим відводом продуктів згоряння. Даний котел має привабливий дизайн, досить компактний, зручний в обслуговуванні і повсякденній експлуатації.





Рис. 3.29 Котел Vaillant Plus VUW 202/3-5

Котел має вбудований розширювальний бачок, циркуляційний 3-х швидкісний насос, систему від замерзання рідини.

### ***Особливості***

Газовий настінний опалювальний апарат з примусовим відводом продуктів згоряння в димохід;

Плавне регулювання потужності за допомогою газового клапана з вбудованим кроковим двигуном;

Середній за опалювальний сезон ККД > 93%;

Вбудована комунікаційна шина eBus;

Опалення і приготування гарячої води (за допомогою вбудованого пластинчастого теплообмінника);

Можливість встановлення в житловій зоні;

Мінімальний необхідний бічний зазор 20 мм, всі вузли доступні спереду;

Вбудоване управління температурою гарячої води;

Великою перевагою даного котла є система автоматичного визначення помилки і система індикації, яка дозволяє швидко розібратися в ситуації, що склалася і усунути помилку в найкоротший термін.

*Двоконтурний газовий настінний котел* Micra 2 24SE від фірми HERMANN, має деякі переваги, яких немає у конкурентів. Котел має можливість відключення внутрішнього циркуляційного насосу при наявності в системі додаткових насосів.



Рис. 3.30 Котел HERMANN Micra 2 24 SE

Це дозволяє знизити енерговитрати. Крім того, в даному котлі є можливість встановити більш потужний вентилятор димовидалення в камері згоряння. Це дає можливість використовувати димар великих розмірів, що можливо далеко не у всіх котлах. До особливостей даних котлів відноситься і система плавного розпалювання, що значною мірою подовжує термін служби виробу і робить його більш безпечним.

*Переваги:*

- Має унікальну систему захисту від забрудненої води та утворення накипу.
- Стійко працює при мінімальному тиску газу до 3,5 мбар .
- Захищений від стрибків напруги, керуюча плата працює в діапазоні 187-242 В.

- Котел захищений від попадання електричного потенціалу на корпус котла завдяки двохпровідній схемі підключення датчиків.
- Котел оснащений усіма необхідними пристроями, що забезпечують високий рівень безпеки: електронний іонізаційний контроль наявності полум'я, контроль за потраплянням продуктів згоряння в приміщення, припинення горіння газу при відсутності полум'я, недостатній тиск і витраті теплоносія в системі опалення.
- Легкість і зручне розташування патрубків в нижній частині котла значно полегшує підключення та монтаж, а доступність вузлів і агрегатів спрощує технічне обслуговування.
- Можливість працювати на зрідженому газі.

*Технічні характеристики Hermann Micro 2 24SE*

Діапазон потужності : 9,1-23,9 КВт.

Номінальний коефіцієнт корисної дії : 93,2 %.

Споживана потужність: 142 Вт.

Підключення: 230 В / 50 Гц.

Номінальний тиск газу : 17-25 мбар.

Максимальний тиск при експлуатації: 3 бар.

Витрата природного газу : 1,11-2,71 м<sup>2</sup>/ г.

Максимальний тиск (гаряче водопостачання) : 6 бар.

Мінімальний тиск (гаряче водопостачання) : 0,5 бар.

Ємність розширювального бака : 6 л.

Максимальна температура: 83°C (±3).

Продуктивність ГВП при Dt = 25 ° К : 3,0-13,6 л / хв.

Діаметр димоходу: 60/ 100 мм.

Габарити: 400x300x700 мм.

Захист: IP -40.

Вага: 37 кг.

*Продукція фірми BOSCH.* Вже довгі роки підприємство випускає якісну опалювальну техніку, яка користується величезною популярністю у

покупців. Німецька точність і надійність, чудовий дизайн , прекрасні технічні характеристики – ось ті якості, якими відрізняється продукція цього виробника. Перелік газових настінних котлів Bosch BW exclusive , а саме моделі ZSC 24-3 MFK / ZWC 24-3 MFK / ZWC 28-3 MFK / ZSC 24-3 MFA / ZSC 35-3 MFA / ZWC 24-3 MFA / ZWC 28 - 3 MFA / ZWC 35-3 MFA, можуть задовольнити бажання і вимоги будь-якого вимогливого покупця.



Рис. 3.31 Котел Bosch BW exclusive

### 3.5 Атомна енергетика

Атомна енергетика – галузь енергетики, що займається одержанням і використанням ядерної енергії.

Для одержання ядерної енергії використовують ланцюгову ядерну реакцію ділення ядер ізотопів урану або плутонію. Ядра діляться при влученні в них нейтрона, при цьому утворюються нові нейтрони та уламки поділу, які мають велику кінетичну енергію. У результаті зіткнень осколків з іншими атомами ця кінетична енергія швидко перетворюється на тепло.



До ядерної енергетики відноситься використання керованих реакцій у ядерних реакторах.

Ядерна енергія виробляється на атомних електричних станціях, використовується на атомних

криголамах, атомних підводних човнах; США здійснюють програму зі створення ядерного двигуна для космічних кораблів, крім того, були спроби створити ядерний двигун для літаків.

Розвиток індустріального суспільства спирається на рівень виробництва та споживання різних видів енергії, що постійно зростає.

Як відомо, в основі виробництва теплової та електричної енергії лежить процес спалювання викопних енергоресурсів – вугілля, нафти та газу. А в основі ядерної енергетики – поділ ядер атомів урану та плутонію при поглинанні нейтронів.

Масштаб видобутку та використання викопних енергоресурсів, металів, споживання води, повітря для виробництва необхідної людству кількості енергії величезний, а запаси ресурсів, на жаль, обмежені. Особливо гостро постає проблема швидкого вичерпання запасів органічних природних енергоресурсів. Однак використання ядерної енергії і вугілля дає людству можливість уникнути цього. Результати фундаментальних досліджень фізики атомного ядра дозволяють відвести загрозу енергетичної кризи шляхом використання енергії, яка виділяється при реакціях атомних ядер.

В історії людства не було наукової події, більш видатної за своїми наслідками, ніж відкриття ділення ядер урану. Цей винахід прибавив до запасів енергетичних копалин палива істотний внесок ядерного палива. Запаси урану у земній корі оцінюються величезним числом –  $10^{14}$  тонн. Але основна маса цього багатства знаходиться у розсіяному стані – у гранітах, базальтах. У водах світового океану кількість урану досягає  $4 \cdot 10^9$  тонн. Але багатих родовищ урану, де видобування було б недорогим, відомо порівняно небагато. Тому масу ресурсів урану, котру можна здобути при сучасній технології та при помірних цінах, оцінюють у  $10^8$  тонн. Людина отримала у своє розпорядження величезну, ні з чим незрівнянну силу, нове могутнє джерело енергії, закладене в ядрах атомів, – ядерну енергію.



Сьогодні атомна енергетика відіграє важливу роль в електроенергетиці України. Це зумовлено тим, що Україна належить до держав, недостатньо забезпечених власним енергоресурсами. Окремими видами палива країна забезпечена лише на 20-30% і тільки вугіллям на 100%. Водночас Україна має найбільш енергомістку економіку: споживання умовного палива на душу населення у нас становить приблизно 6,5 т, тоді як у США, Японії та країн західної Європи тільки 4,2-5,5 т.

Запаси горючих копалин в Україні обмежені, вони спроможні задовольнити потреби на протязі всього 100-150 років, тоді як атомні енергоносії (уран, торій, літій), та використання реакторів нового покоління сприяють тому, що запаси атомної енергетики стануть безмежними.

Протягом останніх років Україна зазнає великої енергетичної кризи, викликаній прискореним розвитком енергомістких галузей господарського комплексу, відсталими технологіями, виснаженням розвіданих покладів вугілля, нафти і газу, через що, наприклад, видобуток нафти став знижуватись з 1970р., газу і вугілля з 1975р.

До складу енергетичної галузі України входять 5 атомних електростанцій (АЕС) встановленою потужністю 12.818 млн. кВт:

- Запорізька АЕС;
- Рівненська АЕС;
- Чорнобильська АЕС;

- Хмельницька АЕС;
- Південно – Українська АЕС.

У 1986р. на Чорнобильській АЕС стався вибух реактора, що вважається найбільшою техногенною катастрофою на планеті. У зв'язку з небезпечною експлуатацією ЧАЕС український уряд закрив її 15 грудня 2000 р.

Зараз в Україні діють 4 АЕС (Запорізька, Рівненська, Хмельницька та Південно – Українська). На цих станціях експлуатуються 15 енергоблоків з реакторами типу ВВЕР (водо-водний енергетичний реактор). Запорізька АЕС (ЗАЕС) – це найбільша в Європі атомна електростанція, вона складається з 6 атомних енергоблоків. На Запорізькій АЕС – першій серед атомних станцій України з реакторами типу ВВЕР – побудоване сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП). За підсумками роботи в 2000 р. Запорізька АЕС визнана однією з трьох найкращих атомних станцій світу, що повністю відповідають вимогам МАГАТЕ (Міжнародна агенція з атомної енергії).

За часткою виробництва електроенергії на АЕС Україна посідає шосте місце серед 31 країни світу, які мають атомну енергетику і в яких працює більш ніж 400 ядерних енергоблоків.

Атомна енергетика залишається предметом гострих дебатів. Сторонники і противники атомної енергетики розходяться в оцінках її безпеки, надійності та економічної ефективності. Атомна енергетика має значні переваги перед енергетикою інших видів:

***1.Доступність і ефективність палива.*** Основа ядерного палива – уран, який, крім атомної енергетики, не має іншого конструктивного застосування. Природно - біологічні процеси спираються на кисень, водень, вуглець та азот. Використання урану не пов'язано з жодним з них і, таким чином, залишає цінні ресурси для інших застосувань. Україна має власні поклади урану. Також уранові родовища є в багатьох політично стабільних країнах. Величезна кількість урану міститься у морській воді. За оцінками фахівців, його світових запасів вистачить на декілька тисячоліть.

**2. Землекористування.** АЕС потребують найменшої площі розташування у порівнянні з іншими електростанціями. Треба також зважати на те, що сонячна та вітрова енергії можуть з максимальною ефективністю використовуватися тільки у місцях із сприятливими природними умовами (в інших місцях потрібні великі вкладення у підтримку виробничих потужностей). У нашій країні такі умови є лише у південних областях (Миколаївська, Херсонська, Одеська). Використання біомаси для широкомасштабного виробництва енергії можливе тільки у малонаселених країнах із сприятливими кліматичними умовами. Клімат у нас помірний, але, спрямовуючи свою політику землекористування переважно на виробництво продуктів харчування, Україна не може собі дозволити відводити великі площі для вирощування енергопостачальної біомаси.

**3. Екологічні наслідки розміщення відходів.** Технологічні відходи електростанцій або упаковують у контейнери, або «розсіюють». Досить малі за об'ємами відходи ядерної енергетики ніколи не викидали в повітря, у тепловій же енергетиці велика частина відходів розпорошується в атмосфері. При цьому оксиди сірки й азоту з'єднуються з атмосферною вологою і спричиняють кислотні дощі; вуглекислий газ сьогодні визнаний головною складовою парникових газів; а важкі метали і арсен (миш'як) осідають на ґрунт. Усі ці шкідливі речовини ми вдихаємо, споживаємо їх разом з овочами, годуємо забрудненим сіном домашніх тварин, отруюючи їхнє молоко і м'ясо. Окрім цього, треба пам'ятати, що тоді як рівень радіації з часом понижується і врешті-решт зникає зовсім, токсичні матеріали (важкі метали) існують вічно.

**4. Кліматичні зміни. Зростання CO<sub>2</sub> в атмосфері,** пов'язане з людською діяльністю, на 75% викликане спаленням органічного палива, а значна частина решти 25% – масштабним зменшенням площі лісів. На сьогодні лише ядерна та гідроенергетика є серйозними джерелами безвуглецевого та економічного виробництва енергії. В той час, як росте наукове розуміння процесів глобального потепління, треба все більше



спиратися на джерела енергії, що не викидають до атмосфери парникових газів – такі як поновлювані джерела та атомна енергія.

**5. Конкурентоспроможність.** При економічній оцінці будь-якої технології енерговиробництва необхідно враховувати повні зовнішні та соціальні витрати, зокрема екологічні ефекти для паливного циклу, вплив на суспільство (в т. ч. на зайнятість, здоров'я тощо) у локальному, регіональному та глобальному вимірах. Широкомасштабний проект ExtnE, здійснений Європейською комісією спільно з Департаментом Енергії США, вивчав зовнішні фактори для повних енергетичних циклів.

Повна вартість виробництва електроенергії у центах євро за кВтгг

Технологія	Зовнішні витрати	Фінансові витрати	Загалом
Вугілля	2,0	5,0	7,0
Нафта	1,6	4,5	6,0
Газ	0,36	3,5	3,9
Вітер	0,22	6,0	6,2
Гідроенергія	0,22	4,5	4,7
Ядерна енергія	0,04	3,5	3,5

Експлуатаційні та фінансові витрати для різних технологій залежать у різних країнах від місцевих умов та прийнятих облікових ставок. Зовнішні витрати в ядерній енергетиці покривають потенційні витрати у випадку великих аварій, при тому імовірність таких аварій не є великою.

Якщо враховувати лише експлуатаційні та фінансові витрати, то найдешевшими є ядерна енергія та природний газ. Якщо брати до уваги ще й зовнішні витрати, то найпривабливішою стає ядерна енергія.

## *Небезпека*



Оволодівши атомною енергією, людство мимоволі поставило під загрозу сам факт свого існування, так як розщеплення атомного ядра – це найнебезпечніший з процесів, що освоєний людиною. З його допомогою можна перетворити Землю на пустелю, але й можна примусити пустелю зацвісти буйним цвітом. Людина – в природі і з природи, а не над нею. Історія життя на Землі – це історія взаємодії між живими істотами і їхнім оточенням.

Навіть найпалкіші прихильники ядерної енергетики визнають, що з її виробництвом пов'язано чимало проблем, які в свою чергу породжують ряд небезпек для людини.

*Небезпека №1.* Небезпека, що виникає при поводженні з продуктами чи ресурсами ядерного паливного циклу.

Під час роботи реакторів в паливних стрижнях накопичуються високорадіоактивні відходи. Розпадаючись, ці відходи виділяють тепло, і тому їх треба охолоджувати ще довго після закінчення керованого процесу розщеплення ядра атома.

Радіоактивні відходи класифікують таким чином:

-Низькоактивні радіоактивні відходи;

-Радіоактивні відходи середньої активності;

-Високоактивні радіоактивні відходи.

Високорадіоактивні відходи неможливо знищити: їх треба ізолювати від навколишнього середовища на десятки тисяч років – лише тоді вони стануть нешкідливі.

### *Небезпека №2. Небезпека витоку радіації.*

Ядерний реактор через цілу низку причин не може вибухнути, як ядерна бомба. Однак один середній реактор містить у собі таку кількість радіоактивних матеріалів, яка в тисячу разів перевищує кількість радіоактивних матеріалів, вивільнених над Хіросімою. Це означає, що вивільнення навіть незначної частини цих матеріалів завдасть великої шкоди і людині, і навколишньому середовищу. Щоб відвернути таку небезпеку, реактори обладнують оболонкою зі спеціальної сталі, а довкола тієї оболонки будують міцні залізобетонні споруди. І все ж сильні вибухи пари або дія зовнішніх сил (вибухи бомб, урагани) можуть за екстремальних обставин призвести до аварії, незважаючи на зазначені запобіжні засоби.

Крім того реактор може розтопитися. Якщо реактор функціонує нормально, вода проходить між комплектами паливних стрижнів і охолоджує активну зону. Якщо система охолодження відмовляє – чи то внаслідок неполадок у системі постачання електроенергії, чи внаслідок виходу з ладу помпи або магістралі подачі води, – починають працювати запасні охолоджувальні системи. Якщо по якихось причинах запасна система охолодження не спрацює, то станеться розтоплення реактора.

*Небезпека №3. Небезпека використання ядерної технології у військових цілях.*

Технологію і сировину мирних атомних програм можна використати для створення ядерної зброї. Необхідний для цього плутоній отримують з відходів ядерного палива, і така операція під силу багатьом країнам третього світу.

Ядерна зброя набагато руйнівніша, ніж усі інші види зброї. За допомогою ракет цю зброю можна доставити у будь-який пункт Землі. Перед людством виникає загроза взаємного знищення протягом лічених годин. Державна безпека в абсолютному значенні цього слова більше не існує. Ціна миру в ядерну добу – це повсякчасна загроза ядерної війни. Тим часом загроза знищення людства зростає у міру того, як ядерна зброя поширюється на всій Землі. Кожна країна, яка опановує цивільну ядерну техніку, розробці якої сприяє МАГАТЕ (Міжнародне агентство у справах атомної енергії) чи ЄВРОАТОМ, може рано чи пізно прийти до розробки ядерної бомби. Крім того, існує можливість випадкового вибуху, коли навіть одна країна має бойові ядерні заряди. Неполадки та аварії трапляються. Не можна накопичувати атомну зброю, не збільшуючи ризику випадкового вибуху. У міру зростання запасів атомної зброї зростає також ризик навмисного вибуху.

*Небезпека №4.* Небезпека забруднення навколишнього середовища в результаті техногенних викидів, які мають місце при роботі атомних реакторів.

У результаті техногенних викидів щільність радіоактивного забруднення ґрунтів і води зростає. Спостерігається незворотній процес безперервного розповзання радіонуклідного забруднення. Раніше чи пізніше воно проникає скрізь. Вода здійснює неперервний круговорот через океани, хмари і дощі, через листя рослин та кровоносні судини тварин і людей. Забруднення біосфери є найважливішою проблемою тому, що її вирішення є також вирішенням інших проблем – енергії, ресурсів, питної води та ін.

Забруднення території України радіоактивними викидами при катастрофі на Чорнобильській АЕС не має аналогів ні за масштабами, ні за глибиною екологічних, соціальних і економічних наслідків. Внаслідок аварії було забруднено близько 12 млн. га, з них 8,4 млн. га сільськогосподарських угідь. Ці землі втрачені назавжди.

*Небезпека №5.* Небезпека аварії внаслідок «людського» фактору.

Виробництво атомної енергії потребує надзвичайно високої кваліфікації персоналу, що обслуговує атомні реактори. В той же час людина – не ідеальна. Люди втомлюються, іноді в них поганий настрій: діючи бездумно, вони припускаються помилок, а це може привести до катастрофи. Крім цього, потрібен контроль за психічним станом операторів, аби відвернути божевілля і не допустити дій, спроможних привести до аварії. Можливість вивільнення радіоактивного матеріалу робить атомну електростанцію надзвичайно спокусливою для диверсій і зовнішнього нападу. Тому атомні електростанції потребують значної охорони.

*Небезпека №6.* Небезпека подовження терміну експлуатації та підвищення потужності понад номінальну.

Практично всі блоки підлягають реконструкції, так як вони експлуатуються вже більш 15 років. А середній вік ядерних реакторів перевищив вже 20 років. На момент спорудження більшості ядерних реакторів вважалося, що вони працюватимуть не більше 40 років. Проте вже зараз є необхідність виконання робіт по модернізації існуючих і створенню додаткових систем безпеки. А для збереження ядерних потужностей, власники використовують методи подовження терміну роботи ядерних реакторів та підвищення потужності понад номінальну.

Здебільшого машини працюють доти, доки вони вийдуть з ладу, але в роботі ядерних реакторів ця засада неприпустима.

До аварій на АЕС можуть привести помилки в проектуванні, будівництві, експлуатації та ремонті обладнання, а також зовнішні чинники – повені, пожежі, землетруси й смерчі. Корозія, вібрація, перенапруження та спрацювання деталей внаслідок тривалої експлуатації можуть спричинити якусь незначну хибу в роботі, а вона призведе до інших, які годі передбачити навіть за допомогою комп'ютерів.

## Термотрансформатори

Пристрій, що дозволяє здійснювати прямий і зворотний цикл передачі теплоти від джерела з одною температурою до джерела з іншою температурою, отримав назву термотрансформатор. Якщо термотрансформатор призначений для отримання теплоти при більш низькій температурі, ніж вихідна, то він називається *знижувальним*. Одержання теплоти при більш високій температурі, ніж вихідна, можливо за допомогою підвищувального термотрансформатора. Якщо термотрансформатор призначений для одночасного отримання теплоти при більш низькій і при більш високій температурах, ніж вихідна, то він називається термотрансформатор *змішаного* типу.

Цикл будь-якого термотрансформатора являє собою в загальному випадку поєднання прямого і зворотного циклів. Найбільша величина коефіцієнта перетворення теплоти досягатиметься в тому випадку, коли прямий і зворотний цикли є циклом Карно.

Машина, в якій здійснюється зворотний цикл і яка поглинає теплоту з навколишнього середовища для того, щоб передати її тілу з більш високою температурою, називається *тепловим насосом*. Не важко показати, що коефіцієнт теплового насоса, має той же зміст, що і звичайний коефіцієнт перетворення теплоти.

Підвищуючий термотрансформатор являє собою поєднання теплового двигунів та теплового насоса.

Для підвищувального термотрансформатора коефіцієнт перетворення менше одиниці.

У принципову схему термо-трансформатора в установку входять двигун, що виробляє механічну роботу, і тепловий насос, що споживає цю роботу. Однак можна собі уявити схему термотрансформаторів, в якій обидва ці елементи відсутні. Така схема має місце, наприклад, при використанні, як термотрансформатор, *абсорбційну* машину.

З фізичної хімії відомо, що на відміну від чистих речовин розчини мають здатність абсорбувати (поглинати) пару розчину одного складу рідким розчином іншого складу навіть у тому випадку, коли температура останнього вище температури пари. Саме цю властивість розчинів використовують в абсорбційній холодильній установці або, як її називають в інженерній практиці, АБХМ – абсорбційна холодильна машина. Дія АБХМ заснована на абсорбції парів холодоагента або абсорбента при тиску  $p_2$  і наступним виділенням його при тиску  $p_1 > p_2$ . Схеми АБХМ зображені на Мал... У ній в якості холодоагента застосовується волога пара аміаку. Рідкий аміак, проходячи через дросель 1, знижує свій тиск від  $p_1$  до  $p_2$  і температуру від  $T_1$  до  $T_2$ . Потім волога пара аміаку надходить у випарник 2, де вона за рахунок припливу тепла  $q_2$  з охолоджуваного об'єму збільшує свій ступінь сухості до  $x = 1$ . Суха насичена пара аміаку з температурою  $T_2$  надходить в абсорбер 3, куди подається водний розчин аміаку з температурою  $T_1 > T_2$ , в якому легко закипаючим компонентом є аміак. Розчин адсорбує пару аміаку, а виділене при цьому тепло абсорбції  $q_{абс}$  відводиться охолоджуючою водою. Концентрація аміаку в розчині в процесі абсорбції збільшується і, отже, з абсорбера виходить збагачений розчин при температурі  $T_2$  і тиску  $p_2$ . За допомогою насоса 4 при тиску  $p_1$  цей розчин поступає в парогенератор 5, де за рахунок тепла  $q_1$  випаровується в основному аміак, як найбільш леткий компонент. Пара аміаку надходить в конденсатор б, тут вона конденсується, завершується цикл. Збіднений аміаком розчин з парогенератора 5 через редукційний вентиль поступає в абсорбер 3, дросель 1, знижує свій тиск від  $p_1$  до  $p_2$  і температуру від  $T_1$  до  $T_2$ .

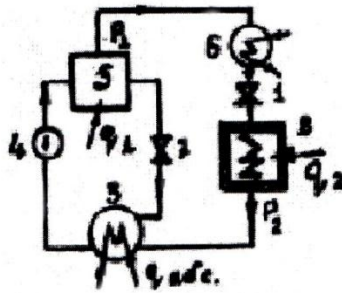


Рис. 3.32

### 3.6 Енергія сонячного випромінювання та її використання

**Загальні відомості.** Уперше фотоелектричний ефект спостерігався в електролітичній комірці Едмондом Беккерелем в 1839 р. Перші експерименти із твердотільними фотоелектричними елементами на основі селену проводилися Адамсом і Деєм у Лондоні в 1876 р. Більш як півстоліття знадобилося для того, щоб з'явилися перші сонячні фотоелементи з ефективністю, дещо більшою 1%. Однак для старту фотоелектричної енергетики була потрібна суттєво більша ефективність. Вирішальним для цього напрямку стало створення кремнієвих фотоелементів з р-n-переходом, що мали КПД близько 6%. Перше практичне використання кремнієвих сонячних батарей для енергетичних цілей мало місце не на Землі, а в навколосемному космічному просторі. В 1958 р. були запущені штучні супутники Землі, оснащені такими батареями – радянський, Супутник-3 і американський, Авангард-1.

Слід зазначити, що науковою базою для створення перших сонячних батарей стала розробка теорії й технології напівпровідникових матеріалів і структур з р-n-переходом. Основні галузі застосування приладів на напівпровідникових матеріалах у той час бачилися в техніці перетворення електричної енергії (перетворення змінного струму в постійний, високочастотна генерація, перемикання і т.д.) і в електронних обладнаннях передачі й обробки інформації (радіо, зв'язок і т.д.). Додатково до „класичних“ напівпровідникових матеріалів – германію й кремнію, з 1950 р. почався синтез матеріалів типу АШВВ. На початку 1960-х років були



створені й перші сонячні фотоелементи з р-п-переходом на основі арсеніду галію. Уступаючи в ефективності кремнієвим фотоелементам, арсенід-галієві проте були здатні працювати навіть при значному нагріванні. Перше практичне застосування вдосконалених арсенід-галієвих сонячних батарей для енергетичних цілей було ще більш екзотичним, ніж у випадку кремнієвих батарей. Вони забезпечували електропостачання радянських космічних апаратів, що працювали біля планети Венера (1965р.), а також самохідних апаратів „Луноход-1“ і „Луноход-2“, що досліджували поверхню Місяця (1970 і 1972 рр.).

Темпи зростання фотоелектричної енергетики, починаючи з 1990 р., перевищили 10% і постійно збільшуються протягом останніх років. Уже в 1997 р. фотоелектрична енергетика за темпами зростання випередила вітрову. На кінець 2000 р. потужність фотоелектричних установок в світі оцінювалася в 750 МВт з річним приростом 100 - 120 МВт. У 2010 р. ця цифра сягнула 14.0 ГВт, а до 2020 р. має зрости до 200 ГВт, і до 2030 р. до 1830 ГВт.

У зв'язку зі зміною клімату, скороченням вуглеводневої сировини, фінансовою й енергетичною кризою різко зріс інтерес до джерел поновлюваної енергії. Сонячні електростанції – це перспективний напрямок розвитку енергетики в XXI-му столітті. Прагнення позбутися енергетичної залежності в Європейському Союзі вилилося у розроблений найбільший інвестиційний проект (DESERTEC) вартістю \$ 555 мільярдів. Проект передбачає будівництво 100 великих сонячних електростанцій в пустелі Сахара. Якщо він здійсниться, то генерованої енергії буде достатньо для задоволення 15 - 25% потреб як Європи, так і усіх країн Північної Африки. Створений консорціум з найбільших компаній і банків Європи з фінансування цього грандіозного будівництва на основі параболічних концентраторів сонячного випромінювання для нагрівання теплоносія (масла) до параметрів, придатних до використання в турбогенераторах (термoeфект).

Джерелом енергії сонячного випромінювання служить термоядерна реакція - кожену секунду на Сонці ~ 61011 кг водню перетворюється в гелій. Дефект маси при цьому становить 4000 кг, що згідно із співвідношенням Ейнштейна  $E=mc^2$  призводить до виділення 41020 Дж енергії. Основна частина цієї енергії витрачається у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні 0,2-3 мкм. Оскільки повна маса Сонця~21030 кг, воно може перебувати в досить стабільному стані понад 10 млрд. років з постійним виділенням енергії.

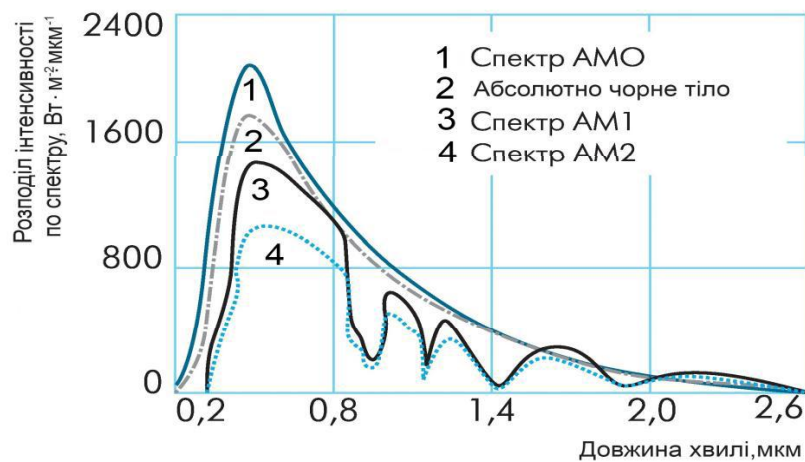


Рис. 3.33 Розподіл інтенсивності у спектрі сонячного випромінювання.

Інтенсивність сонячного випромінювання у вільному просторі на відстані, рівному середній відстані між Землею і Сонцем, називається сонячною сталою. Її величина –  $1353 \text{ Вт/м}^2$ . При проходженні через атмосферу сонячне світло послаблюється в основному через поглинання інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового випромінювання – озоном і розсіювання випромінювання частинками атмосферного пилу і аерозолями. Показник атмосферного впливу на інтенсивність сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, називається "повітряною масою" (АМ). АМ визначається як секанс кута між Сонцем і зенітом. На Мал. показано спектральний розподіл інтенсивності сонячного випромінювання в різних умовах. Верхня крива (АМ0) відповідає сонячному спектру за межами земної атмосфери (наприклад, на борту

космічного корабля), тобто при нульовій повітряній масі. Вона відповідає розподілу інтенсивності випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі 5800К.

Криві AM1 і AM2 ілюструють спектральний розподіл сонячного випромінювання на поверхні Землі, коли Сонце в зеніті і при куті між Сонцем і зенітом  $60^{\circ}$ , відповідно. При цьому повна потужність випромінювання – відповідно 925 і 691 Вт/м<sup>2</sup>. Середня інтенсивність випромінювання на Землі приблизно збігається з інтенсивністю випромінювання при AM = 1,5 (Сонце - під кутом  $45^{\circ}$  до горизонту). Таким чином, при використанні високоефективних методів перетворення енергії, Сонце може забезпечувати швидко зростаючі потреби в ній практично вічно. Такий прогноз робить обґрунтованими великі фінансові витрати на створення широкомасштабних сонячних електростанцій.

Один із основних напрямів прямого перетворення сонячної енергії в електричну реалізується у напівпровідникових фотоелементах (ФЕ). До теперішнього часу виробництво більшості комерційних модулів сонячних елементів засноване на кристалічному Si з ефективністю  $\eta \leq 20\%$  (I покоління ФЕ) і аморфних тонкоплівкових SE з великою площею ФЕ з величиною  $\eta \sim 5 - 8\%$  (II- покоління ФЕ). Концепція III-покоління – це використання нано- та мікроструктур (мікродротів). ФЕ з мікродротоми (Vapor-Liquid-Solid - VLS-метод) відносяться до класу пристроїв з особливим конструктивним виконанням для отримання спрямованого транспортування носіїв заряду (НЗ) за рахунок геометрії і матеріалу таких структур.

Основні втрати сонячного випромінювання при трансформації його в електричну енергію визначаються фундаментальними обмеженнями фотоефекту в області інфрачервоного-випромінювання ( $h\nu \leq E_g$ ) і в області короткохвильового випромінювання ( $h\nu \gg E_g$ ), а також низькою ефективністю виведення фотогенерованих носіїв заряду з об'єму (c-Si)-фотоперетворювача (Рис. 3.34).

Сонячні батареї (СБ) знайшли застосування в космонавтиці, де займають домінуюче положення серед інших джерел автономного енергоживлення. СБ постачають електроенергію апаратурі супутників і системам життєзабезпечення космічних кораблів і станцій, а також заряджають електрохімічні акумулятори, що використовуються на тіньових ділянках орбіти.

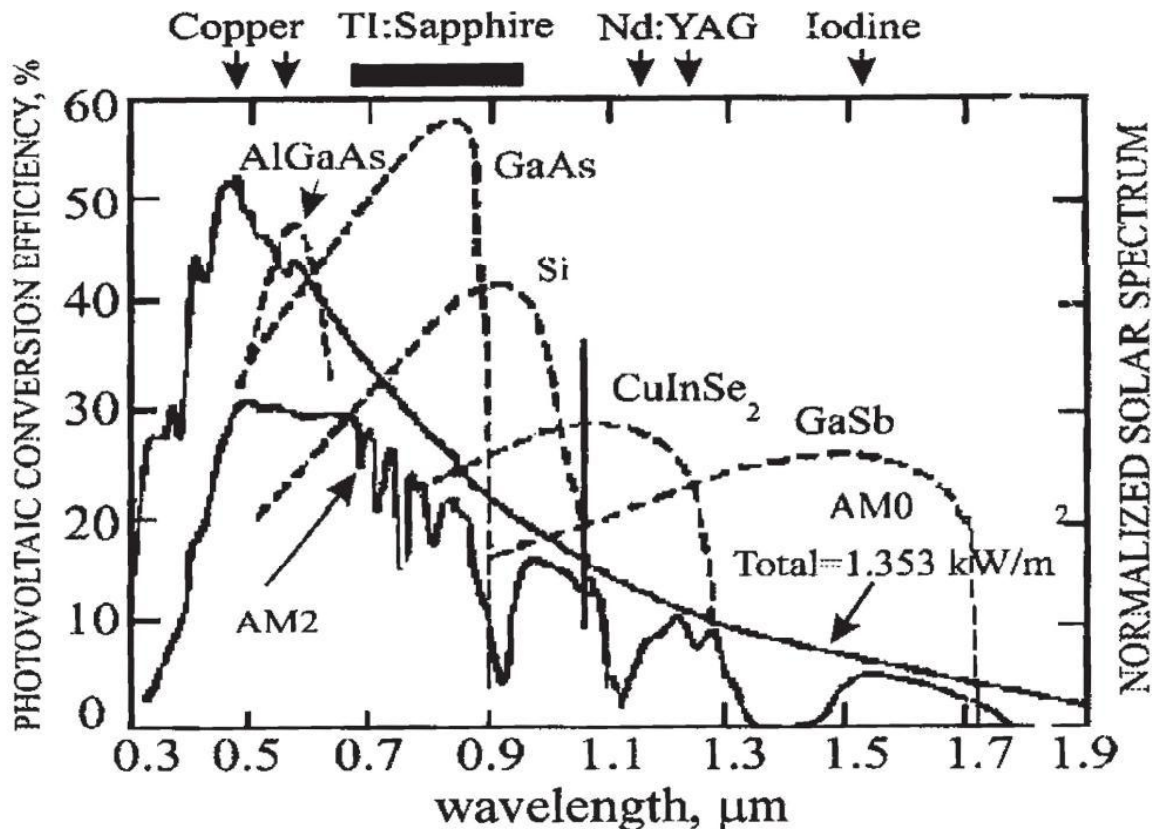


Рис. 3.34 Залежність ефективності різних фотоелементів від довжини хвилі сонячного випромінювання. AM0 і AM2 - спектральні характеристики сонячного випромінювання при різних атмосферних умовах.

Зростання вимог до бортових систем космічних апаратів призводить до необхідності створення сонячних батарей, що мають більш високі енергетичні й експлуатаційні характеристики. Основні з них – підвищення КПД, збільшення ресурсу їх експлуатації до 15 років на геостационарних орбітах в умовах підвищеної радіації й можливості їх функціонування при високій концентрації сонячного випромінювання. У космічних системах до

80% застосовуються фотоперетворювачі з кристалічного кремнію, а 20% – з GaAs- структур.

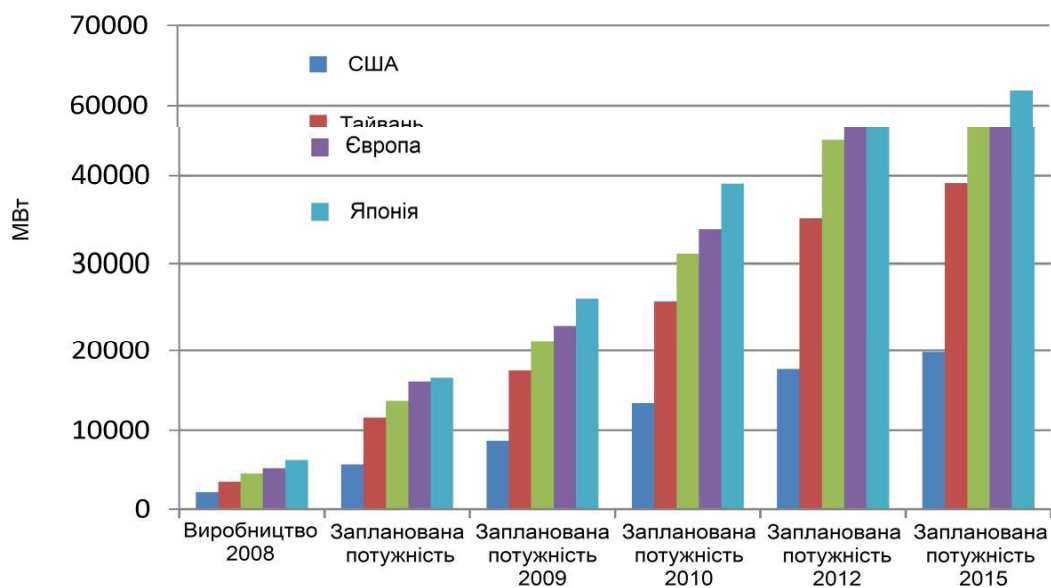


Рис. 3.35 Заплановане кумулятивне зростання сонячної фотоенергетики в світі до 2015 року.

Для виготовлення наземних фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) найбільш придатними вважаються напівпровідники Si, CdTe, GaAs, InP. Близько 91% енергії падаючого світлового потоку можна перетворювати в електричний струм у кремнієвих ФЕП при розв'язанні проблеми вивільнення носіїв заряду (НЗ) із об'єму напівпровідника. Низька вартість кремнію є визначальною при виборі матеріалу для фотоелементів.

Відповідно з дорожньою картою Міжнародного Енергетичного Агентства, сукупна потужність сонячних фотоелектричних установок в світі до 2020 р. досягне 200 ГВт, до 2030 р. - 900 ГВт, до 2040 р. - 2000 ГВт, і складе 3000 ГВт до 2050 р., що відповідатиме 25% глобальної потужності електричної енергії на планеті. Найбільш розвинений ринок фотоелектроенергетики в житлово-комунальному секторі, запланований обсяг якого становить близько 10 млн. сонячних дахів (середня енергетична потужність даху - 3 кВт і середня світова ціна такого даху - \$ 17 000), тобто обсяг світового ринку в цьому сегменті становить до теперішнього часу 170

млрд. доларів. Це цілком сформований, сегмент світового ринку фотоенергетики, який швидко розвивається, причому із зростаючим темпом. У даний час сонячні дахи в основному створюються на основі кремнієвих сонячних фотоперетворювачів. Основними замовниками є жителі міської та сільської місцевості в розвинених країнах, а також в державах з високим рівнем сонячної інсоляції. В Україні ринок ФЕП у житлово- комунальному секторі не існує в зв'язку з відсутністю національної програми розвитку фотоенергетики і законодавчої бази, що стимулює розвиток цього сектора. Однак перспектива його розвитку для України очевидна, у зв'язку з безперервним підвищенням ціни на електроенергію і географічним розташуванням країни, де 3/4 населення (30 млн. чоловік) проживає в регіонах з високим рівнем сонячної радіації.

На Мал. представлено заплановане до 2015 р. зростання потужностей сонячної фотоенергетики в світі. Очікується, що протягом найближчих 20 років сонячна фотоенергетика створить більше 2 млн. робочих місць, скоротить викиди парникових газів в атмосферу на 350 млн. тонн CO<sub>2</sub>, що еквівалентно зупинці 150 вугільних електростанцій.

### ***Основні принципи роботи сонячних елементів***

Найпростіша конструкція сонячного елемента (СЕ) – приладу для перетворення енергії сонячного випромінювання в електричну – показана на малюнку...

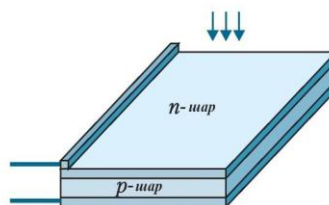


Рис. 3.36 Конструкція сонячного елемента.

На малій глибині від поверхні кремнієвої пластини р-типу сформований р-п-перехід з тонким металевим контактом. На тильну сторону

пластини нанесено суцільний металевий контакт. Коли СЕ освітлюється, фотони світла генерують нерівноважні електрон-діркові пари. Електрони, що генеруються в р-шарі поблизу р-п-переходу, підходять до р-п-переходу і існуючим в ньому електричним полем, виносяться в п-область. Аналогічно і надлишкові дірки, створені в п-шарі, частково переносяться в р-шар (Мал. а). У результаті п-шар набуває додаткового негативного заряду, а р-шар – позитивний. Знижується первісна контактна різниця потенціалів між р-і п-шарами напівпровідника, і в зовнішньому ланцюзі з'являється напруга (Мал. б). Негативному полюсу джерела струму відповідає п-шар, а р-шар – позитивному.

Величина вининувшої фото-е.р.с при освітленні переходу випромінюванням постійної інтенсивності описується рівнянням вольт-амперної характеристики (ВАХ)

$$U = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_p h - I}{I_s} + 1 ,$$

де  $I$  – загальний струм,  $I_s$  – струм насичення, а  $I_p h$  – фотострум,  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура,  $q$  – заряд електрона.

Для ефективної роботи сонячних елементів необхідне дотримання ряду умов:

- оптичний коефіцієнт поглинання активного шару напівпровідника повинен бути достатньо великим, щоб забезпечити поглинання значної частини енергії сонячного світла в межах товщини шару;
- генеровані при освітленні електрони і дірки мають ефективно збиратися на контактних електродах з обох сторін активного шару;
- сонячний елемент повинен мати значну висоту бар'єру в напівпровідниковому переході;
- повний опір, включений послідовно з сонячним елементом (виключаючи опір навантаження), повинен бути малим для того, щоб зменшити втрати потужності (тепло Джоуля) в процесі роботи;

- структура тонкої плівки повинна бути однорідною по всій активній зоні сонячного елемента, щоб запобігти закорочування і впливу шунтуючих опорів на характеристики елемента.

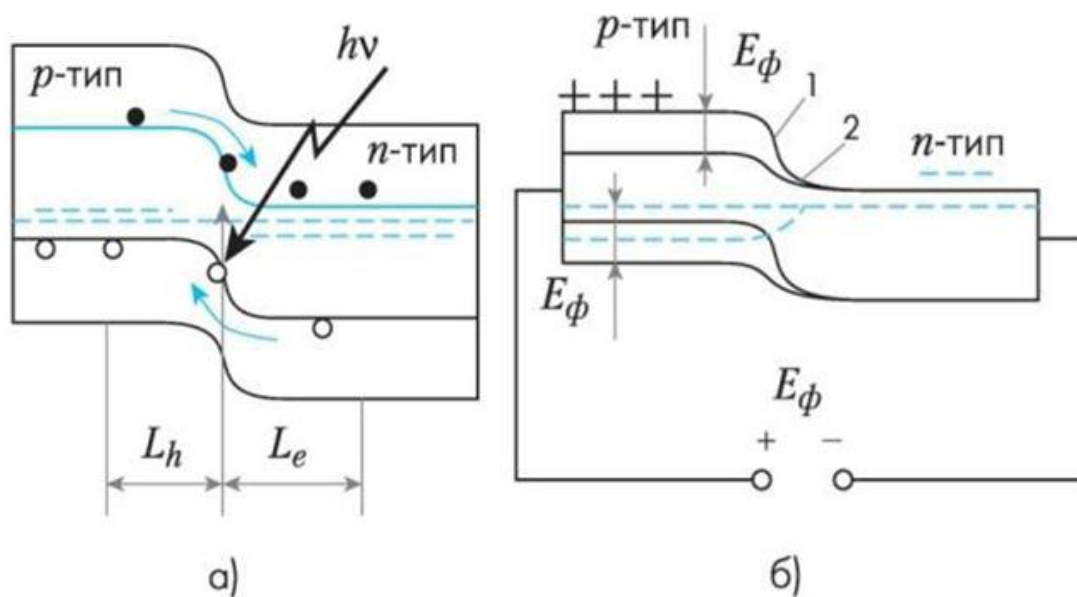


Рис. 3.37 Зонна модель розімкнутого р-п-переходу: а) - в початковий момент освітлення; б) - зміна зонної моделі під дією постійного освітлення і виникнення фото е.р.с.

Виготовлення структур на основі монокристалічного кремнію, що задовольняють даним вимогам – процес технологічно складний і дорогий. Тому використовуються такі матеріали, як сплави на основі аморфного кремнію (a-Si:H), арсенід галію і полікристалічні напівпровідники.

СЕ можна класифікувати по інтенсивності збирання світла, по хімічному складу, товщині й кристалічній структурі шарів, кількості сполучених на одній підкладці елементів і т.д.

По інтенсивності збирання світла сонячні елементи розділяються на одиничні й концентраційні. Одиничні СЕ не мають спеціального обладнання для збирання світла й поглинають тільки ту кількість світлового потоку, яка падає на займану ними площу поверхні. Концентраційні сонячні елементи мають спеціальне світлове обладнання, що концентрує (лінзи або дзеркала), які дозволяють збільшувати щільність світлового потоку на поверхні елементів у кілька раз. Як правило, концентраційні елементи виготовляються



з дорогих світлопоглинаючих матеріалів з найкращими показниками фотоелектричного перетворення світла. У позначенні таких сонячних елементів обов'язково вказується коефіцієнт збирання світла, вимірюваний у сонцях (suns). Коефіцієнт збирання показує, у скільки разів збільшиться щільність потоку, який падає на СМ випромінювання, після його оптичного збирання концентруючи ми.

За кристалічним складом поглинаючого матеріалу СМ підрозділяються на монокристалічні, мультикристалічні, полікристалічні, мікрокристалічні, нанокристалічні. Монокристалічні сонячні елементи являють собою сонячні елементи з поглиначем у вигляді цільного кристалла напівпровідникової речовини. Мульти-, полі-, мікро- і нанокристалічні СЕ мають у якості поглинаючої речовини суміш напівпровідникових кристалітів з різною орієнтацією, структурою й формою, розмір яких і визначає тип сонячного елемента. При розмірах кристалітів від 1 до 100 мм. Речовину називають мультикристалічною, від 1 до 1000 мкм – полікристалічною, менш 1 мкм – мікрокристалічною, менш 1 нм – нанокристалічною.

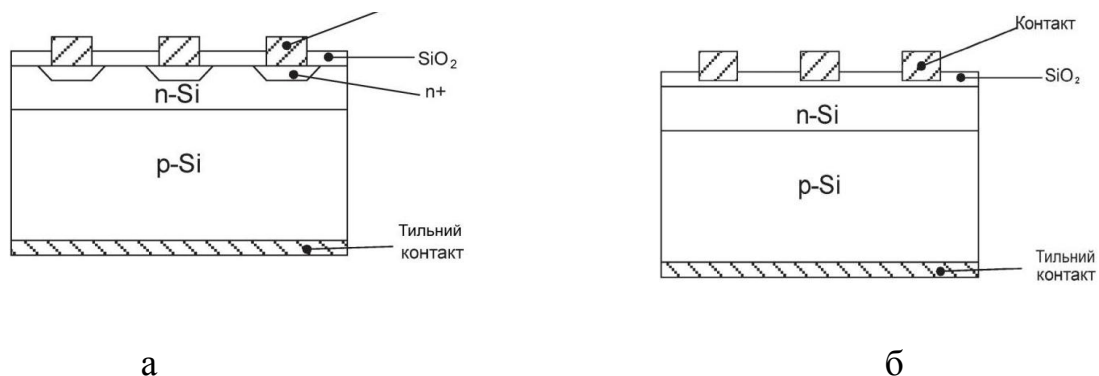
Залежно від товщини світлопоглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на тонкоплівкові й товстоплівкові. Тонкоплівкові сонячні елементи мають товщину в декілька мкм, товстоплівкові – у десятки або сотні мкм.

Залежно від складу поглинаючого матеріалу сонячні елементи підрозділяються на кремнієві, на основі АІІВV напівпровідників, на основі АІІВVI (в основному CdTe), на основі АІВІІСVI2 напівпровідників і змішані. Як правило, для зручності конструкції й підвищення КПД СМ прагнуть добитися поглинання світла в одному з його шарів. Цей шар називають поглинаючим (поглиначем). Другий напівпровідник служить лише для створення потенційного бар'єра й збирання генерованих світлом носіїв заряду.

## Фотоперетворювачі на основі кремнію

*Кристалічний кремній.* Монокристалічні кремнієві сонячні елементи (с-Si СЕ) виготовляють з кремнієвих пластин 0,3 мм (300 мкм) товщини шляхом легування їх відповідно донорними й акцепторними домішками, для створення омичних контактів. Існують кілька типів конструкції монокристалічних сонячних елементів, що відрізняються способом формування, структурою й розташуванням контактів (Рис. 3.38).

Основний недолік монокристалічних кремнієвих сонячних елементів – велика витрата порівняно дорогого високочистого кремнію, більша частина якого відіграє роль пасивної підкладки. Слід зазначити, що технологія виробництва сонячних елементів на кристалічному кремнії перебуває в майже ідеальному стані й досить складно знайти шляхи покращення вже існуючих технологічних процесів, відпрацьованих протягом багатьох років у рамках виробництва мікроелектронних обладнань. Крім того, досить добре розроблена теорія фотогальванічних перетворень у монокристалі й на її основі створені комп'ютерні програми оптимізації параметрів монокристалічних сонячних елементів на основі кремнію. Єдиний шлях оптимізації с-Si СМ – це здешевлення вихідної сировини. Для зменшення собівартості кремнієвих сонячних елементів досліджується можливість використання як поглинача полі- і мульткристалічного кремнію.



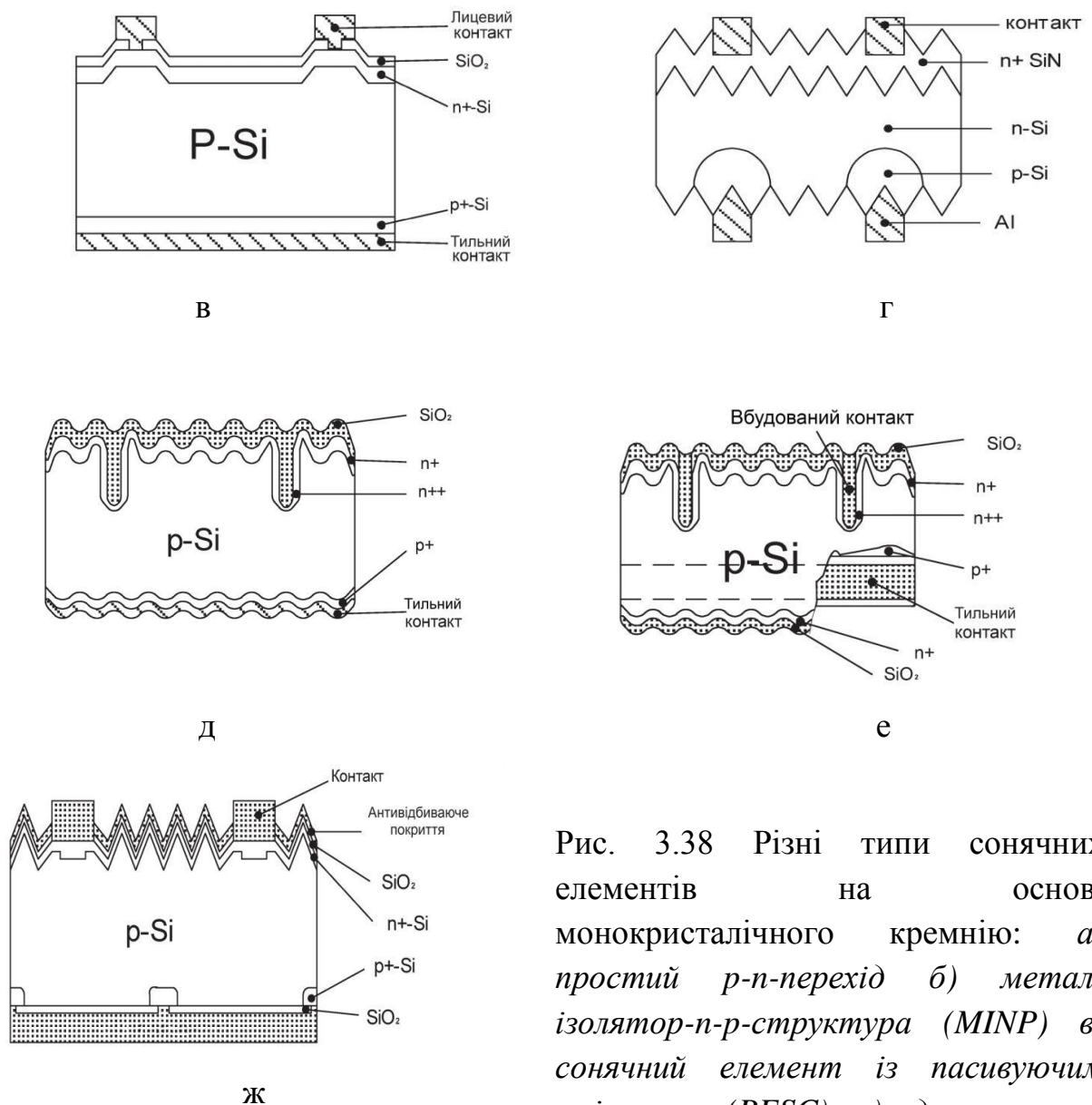


Рис. 3.38 Різні типи сонячних елементів на основі монокристалічного кремнію: а) простий *p-n-перехід* б) метал-ізолятор-*n-p-структура (MINP)* в) сонячний елемент із пасивуючим емітером (*PESC*) г) двошлицьовий сонячний елемент д) структура з одностороннім вбудованим контактом (*SSBS*) е) структура із двостороннім вбудованим контактом (*DSBS*) ж) структура з пасивуючим емітером і локальнодифузійним тильним контактом (*PERL*).

*Аморфний гідрований кремній.* Аморфні сонячні елементи використовують як поглинаючий шар аморфної речовини, що мають тільки близько впорядковану структуру. Ідеальним аморфним матеріалом для

використання як поглиначача є а-Si (аморфний кремній). Значення його забороненої зони може бути змінене шляхом введення домішки водню (гідрогенізації). Аморфний кремній, легований воднем (а-Si:H), є основою аморфних сонячних елементів. Іноді крім водню, в поглинаючому аморфному шарі використовуються також домішки германію (а-SiGe:H).

У якості робочого переходу для а-Si СМ можуть використовуватися бар'єр Шотткі, МОП-структура, р-і-n-структура (Рис. 3.39).

ITO
Pd
a-Si:H
n-a-Si:H
метал (Mo)

а

ZrO <sub>2</sub>
Pd
SiO <sub>2</sub>
a-Si:H
n-a-Si:H
сталь

б

скло
SnO <sub>2</sub>
p-a-Si:H
a-Si:H
n-a-Si:H
Al/Ti-контакт

в

скло
ITO (+)
p-a-Si:H
i-a-Si:H-буфер
500 нм i-a-Si:H
n-a-Si:H
метал (-)

г

скло
ITO (+)
p-a-Si:H
i-a-Si:H-буфер
500 нм i-a-Si:H
n-a-Si:H
метал (-)

д

Рис. 3.39 СЕ на основі аморфного кремнію: а) бар'єр Шотткі б) МДП (MUS) – структура; в) і-n-структура; г) і-n-структура з буферним шаром (одноперехідний елемент); д) трьохперехідний елемент (3 р-і-n-структури з послідовним з'єднанням).

Фотоелектронні властивості найбільш виражені в гідрованому аморфному кремнії (a-Si:H) та мікрокристалічному ( $\mu$ c-Si:H) і визначаються щільністю розірваних атомних зв'язків. Наявність водню призводить до пасивації електрично активних глибоких рівнів по межах зерен і перехідних областей (interfaces) між аморфною і кристалічною фазами в (a-Si)-структурах і асоціюється з концентрацією розірваних спінових зв'язків. Водень для стабілізації структури повинен проникати на всю глибину впровадження суміші в матрицю кристала і перебувати в моногідридному з'єднанні Si-H, оскільки ця конфігурація найбільш стабільна. При отриманні  $\mu$ c-Si:H наявність водню повинна привести до фіксованої геометрії наноструктур з обмеженими розмірами кристалітів. Це забезпечить збереження їх навіть при збільшених температурах відпалу.

Міграція водню в гідрогенізованому аморфному кремнії визначається енергією активації в області 0,5 - 2,7 еВ. Така велика невизначеність викликана сильною залежністю рухливості H від концентрації СН. Водень може дифундувати через дрібні пастки, а захоплюватися розірваними зв'язками (глибокі пастки). При  $СН \sim C_d$  ( $C_d$  - концентрація дефектів) водень мігрує після термічного вивільнення з глибоких пасток. При  $СН \gg C_d$  з типовою H концентрацією  $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup> глибокі пастки заповнені, надлишковий водень може мігрувати через дрібні пастки з малою енергією активації і розташовуватися в середині метастабільної конфігурації Si-H-Si. Оптична ширина забороненої зони  $\mu$ c-Si: H залежить від концентрації пов'язаних атомів водню так само, як і в (a-Si: H)-структурах. Різниця в їх величинах полягає в різній концентрації зв'язаних атомів водню. У звичайних плівках (a-Si: H) з підвищенням рівня легування бором оптична ширина забороненої зони швидко зменшується, що є сильним обмеженням у використанні цього матеріалу в сонячних елементах. У той же час значення оптичної ширини забороненої зони  $\mu$ c-Si: H (B) залишаються високою у всьому діапазоні концентрацій легуючої домішки. При високих рівнях легування бором провідність плівок  $\mu$ c-Si: H(B) досягає значень 10<sup>-1</sup> см/см.

Це робить даний матеріал придатним для використання в сонячних елементах в якості прозорого покриття з високою провідністю.

У створеній структурі міститься суміш ( $\mu\text{-Si:H}$  +  $\text{a-Si:H}$ ). При температурі відпалу до  $T \sim 350 - 370^\circ\text{C}$  зберігаються аморфна фаза і  $\mu\text{-Si:H}$  (В) з малим розміром кристалітів. При температурі відпалу  $T \geq 370^\circ\text{C}$  аморфна фаза відпалюється, залишається  $\mu\text{-Si:H}$  (В) зі збільшеним розміром кристалітів і тому величина питомого опору,  $R_{\text{min}}$ , підвищується. Це вказує на те, що властивості нанорозмірних структур будуть вичерпані і зразки кремнію набувають вже відомих властивостей мікроструктур. Плівки  $\text{a-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{H}$  більш теплостійкі в порівнянні з плівками  $\text{a-Si:H}$ , оскільки зв'язок  $\text{C-H}$  більш сильніший чим зв'язок  $\text{Si-H}$ . У створених  $\text{a-Si:H}$ -структурах в  $\text{c-Si}$  (р, n)-кристалі при радіаційній обробці його ядрами  $^{238}\text{U}$  через поділ носіїв зарядів в області вигинів енергетичних зон квантових структур інтенсивна фотолюмінесценція відсутня.

Для наземного виконання СЕ з високим ККД необхідно мати перетворювач короткохвильового випромінювання в довгохвильове за рахунок перевипромінювання зона-зона в  $\text{a-Si:H}$ -структурі. Вивід носіїв заряду з об'єму аморфної фази СЕ (мала рухливість НЗ) проводиться по провідних квантових структурах малої глибини або по усій глибині ниток  $\sim 300$  мкм без перетворювача УФ. У космічному просторі при великому потоці УФ і руйнуючого впливу ефекту Стаблера-Вронського гідровані аморфні структури не можуть бути використані і вивід носіїв заряду повинен проводитися дротами, розміщеними на всю глибину СЕ.

*Наноструктури на основі кремнію.* СЕ з мікродротоми (Vapor-Liquid-Solid-VLS-метод) відносяться до класу пристроїв із особливим конструктивним виконанням для одержання спрямованого транспортування носіїв заряду за рахунок геометрії й матеріалу таких структур. У тонкоплівковому СЕ аморфні шари кремнію синтезуються CVD-методом з газів  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{H}_2$  і вирощуються на підкладці з металевої фольги.

Застосовується геометрія з набору мікроструктур у вигляді дротів у коаксіальній формі з р-п-переходом.

Масиви квантових ниток у монокристалічному кремнії з малим питомим опором формуються двома радіаційними процесами – внаслідок часткового розриву міжатомних зв'язків потоком прискорених електронів і створенням довгих схованих треків у його структурі за рахунок процесів іонізації, створених багатозарядними іонами. Ступінь іонізації структури кристала визначається величиною зарядного стану іона й наявністю розірваних міжатомних зв'язків, що знижують сток заряду з об'єму напівпровідника для виникнення термічного піка й кулонівського вибуху з метою збільшення глибини отвору провідних квантових структур в об'ємі кремнієвого монокристала.

Критерієм виникнення схованого треку вважається підвищення температури локальної області кристалла до температури плавлення (аморфна фаза). При високих величинах виділення енергії ( $de/dx \propto Z^2$ ) процеси трекоутворення, посилені попереднім дефектоутворенням, характерні кожному іону. При опроміненні кристала легкими й важкими осколками ядер  $^{238}\text{U}$  з величиною заряду  $Z_1 = 38,6$ ;  $Z_2 = 53,4$  од. іонізація структури викликає зміну стану реагуючих дефектів. Іонізація змінює параметри дифузії домішок, що позначається на глибині їх зсуву й утворення енергетичних бар'єрів для основних НЗ. При малих флюенсах іонів безперервні треки неформуються, а тільки дефекти й кластери через швидку епітаксіальну рекристалізацію навколо траєкторії іона.

Для одержання безперервних треків необхідно підвищувати флюенс іонів для нагромадження досить великої кількості дефектів структури або робити попереднє радіаційне дефектоутворення для зриву процесу рекристалізації областей близько траєкторії іона.

Підвищення флюенса осколків проводиться за рахунок збільшення перетину фотоділення ядер урану при переході в область гігантського резонансу зі збільшенням енергії гамма-квантів.

Наявність квантових дротів дозволяє розв'язати проблему, що виникає при традиційному способі виробництва фотоелементів, яка пов'язана із процесом поглинання сонячного випромінювання в структурі матеріалу й з виведенням носіїв заряду з його об'єму – фотоелемент великої товщини забезпечує повне поглинання сонячного випромінювання, в той час як тонкий фотоелемент забезпечує ефективний збір носіїв заряду. Довгі квантові нитки створюють спрямований рух носіїв заряду з об'єму кремнію, а при оптимізації товщини р-n-структур забезпечать одержання високої ефективності перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію.

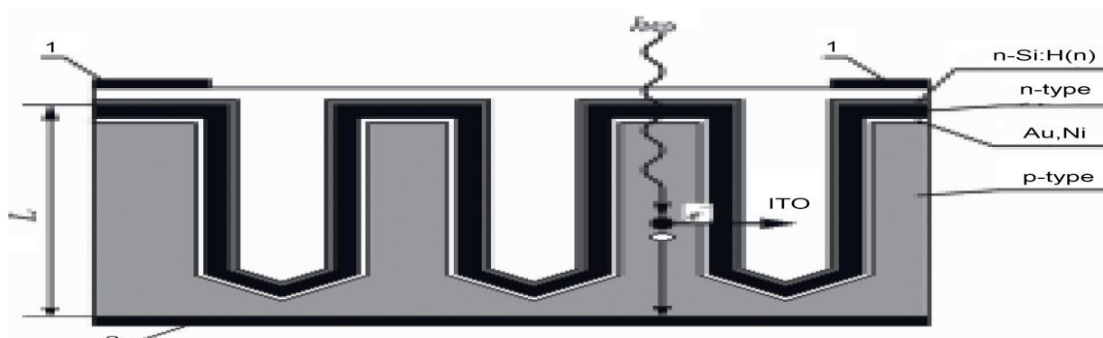


Рис. 3.40 Схема (архітектура) кремнієвого фотоперетворювача вертикальної конфігурації з мікродротами (California Institute of Technology, USA), 1 – фронтальний контакт, 2 – тильний контакт, L – товщина комірки фотоперетворювача.

Перспективним є також метод вертикальних мультипереходів, розташованих паралельно падаючому світлу (Рис. 3.40), який дозволяє неосновним НЗ досягати р-n-переходу, підвищити ефективність ФЕ й захищеність від радіаційного руйнування, що важливо для використання в космічних умовах. Велика кількість вибудованих мікродротів створює можливість збільшення виведення на колектор НЗ із малою дифузійною довжиною. Діаметр мікродроту повинен становити не менш декількох сотень нанометрів, довжина його повинна становити десятки мікронів для найбільшого поглинання фотонів із сонячного спектра. Для вирощування мікродротів використовується VLS-метод (varor-liquid-solid) з металевими каталізаторами.



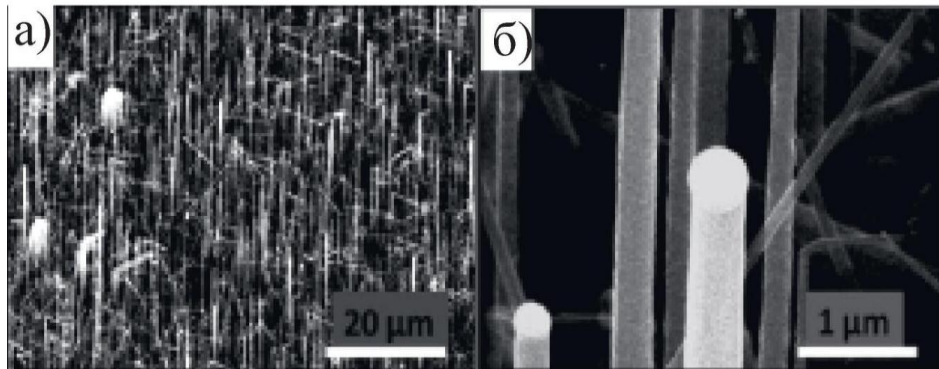


Рис. 3.41 Типовий приклад Si-мікродротів, вирощених на основі SiH<sub>4</sub>, (структури ФЕ з p-n-переходами в коаксіальному виконанні), California Institute of Technology, USA.

Для виведення НЗ пропонується використовувати сформовані випромінюванням провідні квантові дроти з мікро- і наноструктур. НЗ з малою рухливістю, генеровані фотонами широкого спектра сонячного випромінювання, виводяться з об'єму кремнієвого фотоперетворювача по провідним квантовим дротам (Мал...), створеними методом кулонівського вибуху. Оскільки дифузія домішок в аморфній фазі значно вища, ніж у кристалічній структурі, отже, кластерні об'єднання, зміщаючись від центру схованого треку на периферію, створять нанорозмірні нитки зі збільшеною концентрацією домішки. При зниженні рекристалізації на епітаксіальному шарі матриці область p+(n+) буде розширюватися в структуру p(n).

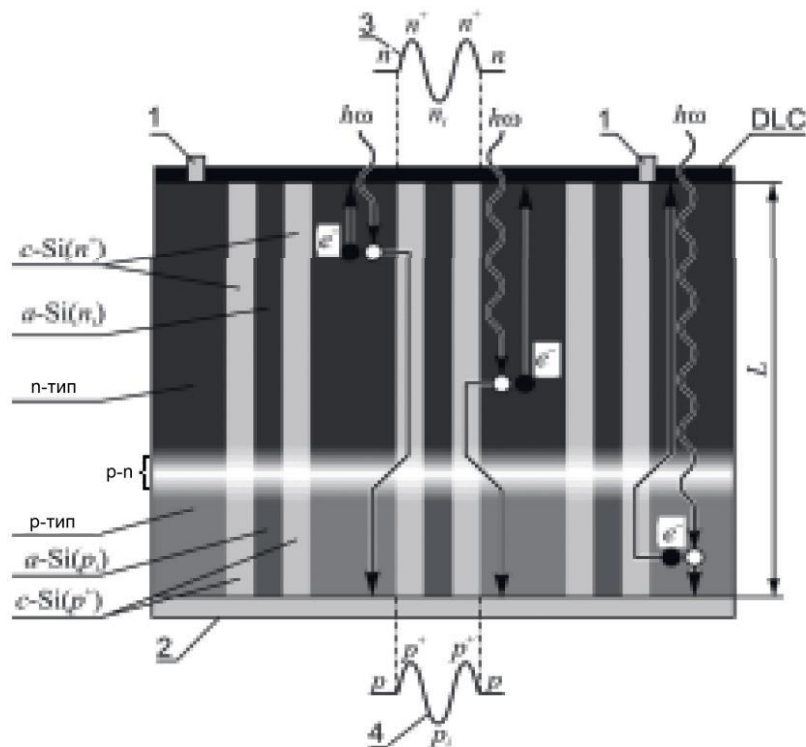


Рис. 3.42 Схема (архітектура) кремнієвого фотоперетворювача в планарному виконанні із провідними квантовими нитками (NSC KIPT, Kharkov, Ukraine), 1 – фронтальний контакт, 2 – тильний контакт,  $L$  – товщина комірки, 3, 4 – форма квантової нитки в  $n$ -і  $p$ -структурах кремнієвого фотоперетворювача.

### Сонячні елементи нового покоління

*Каскадні сонячні елементи.* Більшість сучасних СЕ володіють одним  $p$ - $n$ -переходом. У такому елементі вільні носії заряду створюються тільки тими фотонами, енергія яких більше або дорівнює ширині забороненої зони. Іншими словами, фотоелектричний відгук одноперехідного елемента обмежений частиною сонячного спектра, енергія якого вища ширини забороненої зони, а фотони меншою енергії не використовуються. Подолати це обмеження дозволяють багат шарові структури з двох і більше СЕ з різною шириною забороненої зони. Такі елементи називаються багатоперехідними, каскадними або тандемними.

Оскільки вони працюють зі значно більшою частиною сонячного спектра, ефективність фотоелектричного перетворення у них вища.

У типовому багатоперехідному сонячному елементі (Рис. 3.43) одиночні фотоелементи розташовані один за одним таким чином, що сонячне

світло спочатку потрапляє на елемент з найбільшою шириною забороненої зони, при цьому поглинаються фотони з найбільшою енергією. Пропущені верхнім шаром фотони проникають в наступний елемент з меншою шириною забороненої зони і т.д.

Основний напрямок досліджень в галузі каскадних елементів пов'язаний з використанням арсеніду галію в якості одного або кількох компонентів. Ефективність перетворення подібних СЕ досягає 35%. Крім того в каскадних елементах широко застосовуються аморфний кремній, та сплави на його основі ( $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ ), а також  $\text{CuInSe}_2$ .

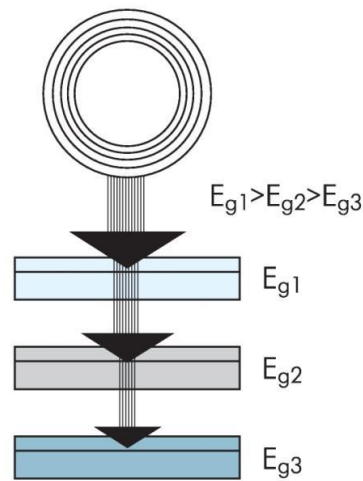


Рис. 3.43 Принцип побудови багатоперехідного сонячного елемента.

На Рис. 3.44 зображена каскадна батарея, в якій верхнім елементом служить структура на основі  $\text{GaInP}$  з  $n\text{-AlInP}$  як вікна, далі йде тунельний діод на  $\text{GaAs}$  для проходження носіїв між елементами і нижній елемент з  $\text{GaAs}$ .

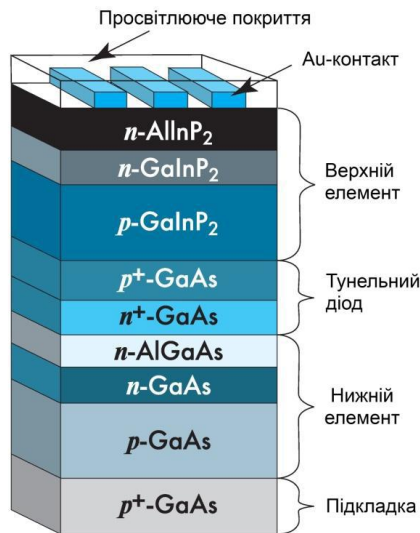


Рис. 3.44 Каскадний елемент.

Дуже перспективні каскадні батареї, що складаються з трьох елементів з різною шириною забороненої зони (Рис. 3.44). Верхній шар, що поглинає короткохвильову область сонячного спектра, сформований із сплаву на основі  $a\text{-Si:H}$  з шириною оптичної щілини 1,8 еВ. Для середнього елемента в якості шару і-типу використаний сплав  $a\text{-SiGe:H}$  з вмістом германію  $\sim 10\text{-}15\%$ . Ширина оптичної щілини даного шару (1,6 еВ) ідеальна для поглинання зеленої області сонячного спектра. Нижня частина СЕ поглинає довгохвильову частину спектра, для цього використовується шар  $a\text{-SiGe:H}$  з концентрацією германію 40-50%. Не поглинене світло відбивається від заднього контакту на основі  $\text{Ag/ZnO}$ . Усі три елементи каскадної сонячної батареї пов'язані між собою дуже легованими шарами, що утворюють тунельні переходи між сусідніми елементами.

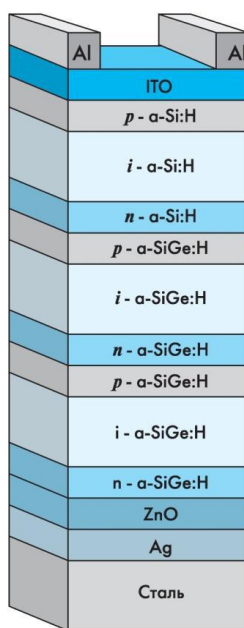
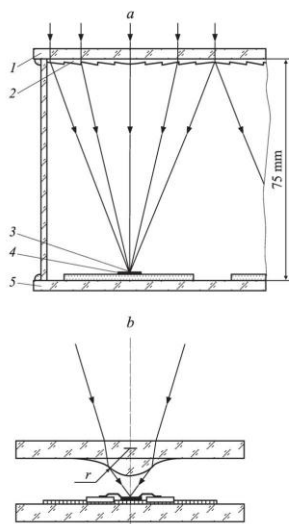


Рис. 3.45 Трьохкаскадний сонячний елемент на основі сплавів a-SiGe:H.

Таблиця 3.46 Теоретичні, очікувані та досягнуті значення ККД каскадних сонячних елементів

Спектр сонячного випромінювання	ККД, %					
	Значення	Кількість p-n-переходів в каскаді				
		1	2	3	4	5
В умовах навколоземного космосу (AM0)	Теоретичне	28	33	38	42	45
	Очікуване	23	28	33	36	38
	Реалізоване	21.8	27.2	29.3	—	—
У наземних умовах (AM1.5)	Теоретичне	30	36	42	47	49
	Очікуване	27	33	38	42	44
	Реалізоване [28]	25.1	30.3	31.0	—	—
У наземних умовах з концентрацією (AM1.5)	Теоретичне	35	42	48	52	54
	Очікуване	31	38	43	47	49
	Реалізоване [28]	27.6	31.1	34.0	—	—

*Елементи із концентрованим сонячним випромінюванням. Є ще одна можливість для збільшення ККД фотоелектричного перетворення. Йдеться про перехід до перетворення попередньо сконцентрованого сонячного випромінювання, (Рис. 3.47). Гранична розрахункова кратність концентрування випромінювання на відстані від Сонця, яка відповідає орбіті Землі, становить 46200 X.*



*Рис. 3.47 а – поперечний розріз концентруючого модуля: 1 – основа лінзової панелі, виконана зі скла; 2 – мікропризми лінз Френеля, виконані з силікону; 3 – сфокусовані сонячні промені, 4 – сонячний елемент, змонтований на металевій основі; 5 – основа панелі сонячних елементів, виконана зі скла. б – система з вторинними міні лінзами для збільшення кратності концентрування сонячного випромінювання.*

Те, що гетероперехідні сонячні фотоелементи на основі арсеніду галію можуть ефективно працювати при значній (в сотні і навіть тисячі разів) концентрації світлового потоку і вигідно відрізняються в цьому відношенні від кремнієвих, було встановлено ще на рубежі 1970-х-1980-х років. До цього часу відносяться перші дослідження по створенню концентруючих фотоелектричних модулів з дуже точними гетерофотоелементами. Генерований фотострум зростає лінійно зі збільшенням світлового потоку, а вихідна напруга в свою чергу зростає зі збільшенням струму за логарифмічним законом. Таким чином, вихідна потужність росла надлінійно при концентруванні випромінювання, а ефективність фотоелектричного перетворення збільшувалася.

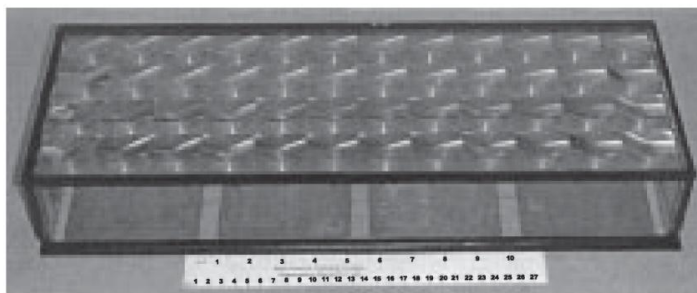


Рис. 3.48 Експериментальний фотоелектричний модуль для перетворення концентрованого сонячного випромінювання з панеллю з 48 лінз Френеля.

З початку 1990-х років у практиці створення сонячних концентраторних систем виник новий напрям, що базується на концепції малорозмірних модулів, що мають всі передумови для забезпечення вискоефективного і економічно виправданого фотоелектричного перетворення сонячного випромінювання.

Слід зазначити, що при розгляді перспектив великомасштабної сонячної електроенергетики витрата будь-яких, навіть самих звичайних, конструкційних матеріалів може бути економічно виправдана лише при високій ефективності перетворення в розрахунку на всю фотоприймальну поверхню. Це пов'язано з необхідністю покривати значні площі земної поверхні для використання випромінювання при виробленні великих потужностей.

Очевидно, що пристрої перетворення повинні бути захищені від атмосферних впливів для забезпечення їх довготермінової (протягом 20-30 років) працездатності. Малорозмірні лінзи Френеля тут об'єднані в інтегральну панель. В панель об'єднані також і змонтовані на тонких (0.5 мм) металевих тепловідведеннях концентруючі фотоелементи. Обидві ці панелі скріплені скляними боковими стінками, так що внутрішній об'єм модуля герметизований (Рис. 3.49). При перетворенні концентрованого сонячного випромінювання з ефективністю близько 40%, з використанням пристроїв для стеження за сонцем, питома (на одиницю площі) величина перетвореної кількості електроенергії збільшується в 2-2,5 рази в порівнянні з

установкою на основі кремнієвих ФЕП, що перетворюють пряме сонячне випромінювання.

*Сонячні елементи на основі сенсibilізованих барвником напівпровідників (СБСЕ).* СБСЕ представляє собою наноінженерний пристрій в якому, завдяки вдалому поєднанню властивостей матеріалів, вдалося реалізувати фотоелектричне перетворення, багато в чому близьке до фотосинтезу. Застосування недорогих технологій та матеріалів відкриває можливість їх широкого виробництва. Величезний прогрес, досягнутий останнім часом у розробці нанодисперсних матеріалів заданої морфології, дозволяє прогнозувати збільшення ефективності та підвищення стабільності характеристик СБСЕ. Ідея фотоелектрохімічного елемента на основі сенсibilізованого нанодисперсного діоксиду титану була запатентована в 1990 р., і розвинута в серії робіт. В якості робочого матеріалу для СБСЕ застосовується сенсibilізований барвником нанодисперсний оксидний напівпровідник; поглинання випромінювання та транспортування фотогенерованих носіїв відбувається у різних функціональних середовищах, що дозволяє гнучко керувати цими процесами.

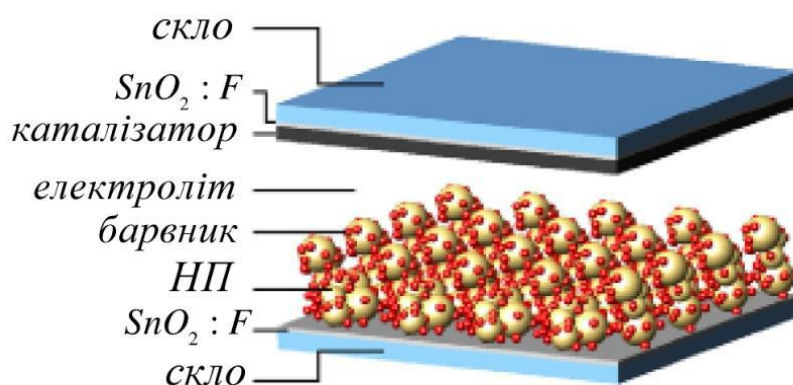


Рис. 3.49 Схема компонування СБСЕ.

Схема компонування СБСЕ представлені на Мал... Оксидна плівка нанокристалічної морфології (питома поверхня  $60-150 \text{ м}^2 / \text{г}$ , типова пористість 50-65%, середній розмір частинок 10-30 нм, середній розмір пор 15 нм), покрита моношаром органічного барвника, характеризується



широкою областю поглинання (від УФ до ближньої ІЧ областей спектру) і дозволяє захопити 70-90% фотонів сонячного випромінювання.

Поглимаючи фотон, молекула барвника-сенсibilізатора, хемосорбованого на поверхні нанодисперсного широкозонного оксидного напівпровідника (НП) n-типу, переходить в збуджений стан, що відповідає переносу електрона з найвищої заповненої молекулярної орбіти на найнижчу незаповнену. Релаксація збудженого стану молекули барвника відбувається через інжекцію електрона в зону провідності НП, який виступає в ролі транспортного середовища. З НП електрони переходять на колектор зарядів – фронтальний електрод, яким служить скляна пластинка, покрита провідним прозорим оксидом ( $SnO_2 : F$ ,  $SnO_2 : Sb$ ,  $In_2O_3$ ). Омичний контакт між провідним шаром на внутрішній поверхні фронтального електрода та мезопористою плівкою НП досягається шляхом прожарювання при температурі 350-450°C. Перенос заряду в зоні провідності НП відбувається шляхом дифузії електронів до фронтального електроду. Окислені молекули барвника відновлюються шляхом переходу електрона з електроліту. Реакція відбувається поблизу протиелектрода, покритого шаром каталізатора (Pt, графіт), на який через зовнішнє навантаження, замикаючи коло, переходить електрон з фронтального електрода. Різниця потенціалів, що генерується при освітленні дорівнює різниці між рівнем Фермі для нанодисперсного оксиду і редокс-потенціалом електроліту. Найпоширеніший тип електроліту – органічний розчинник, що містить редокс-пари йодиту та трийодиту I / I<sub>3</sub>.

Отже сонце – це найпотужніше джерело енергії для нашої планети. Без сонячного тепла і світла будь-яке життя на Землі було б неможливе.

Енергія Сонця може використовуватися для розв'язання багатьох проблем. Одна з них – це перетворення сонячної енергії в електричну. Переваги використання сонячної енергії для отримання електрики очевидні. Хоча сонячна електроенергетика є порівняно новим джерелом енергії, але вона в майбутньому може стати найважливішим джерелом енергії. Це обумовлено тим що:

- сонячна енергія, є поновлюваним ресурсом. Це означає, що немає передумов виснаження її запасів;
- сонячна енергія не забруднює довкілля. На відміну від вуглеводнів, використання сонячної енергії не пов'язано з виділенням парникових газів та забруднення навколишнього середовища;
- електрика і тепло від Сонця є безкоштовними. Після того, як сонячні батареї або сонячні теплові колектори встановлені, немає значних фінансових витрат;
- сонячні батареї зручні у використанні; в них немає в значній мірі частин, які рухаються;
- сонячні батареї можуть експлуатуватися тривалий час;
- використання сонячної енергії неймовірно різностороннє. Починаючи від простих калькуляторів і продовжуючи електро-автомобілями, водонагрівачами, фонтанами, будівлями, а також електростанціями і супутниками;
- у віддалених районах, сонячна енергія може бути єдиним джерелом електричної і теплової енергії.

Поряд з перевагами використання сонячної енергії, варто відзначити недоліки:

- залежність від погодних умов та від зміни дня і ночі;
- необхідність акумулюючи пристроях
- досить дороге спорудження сонячних електростанцій;
- виникає необхідність час від часу очищати поверхні батарей від бруду і пилу;
- досить сильно нагрівається, нагрівається простір над сонячною електростанцією.

### ***Сонячна термальна енергетика***

Сонячна енергія широко використовується як для виробництва електроенергії так і для нагрівання води тощо. Сонячні колектори

виготовляються з доступних матеріалів: сталь, мідь, алюміній і т. д., тобто без застосування дефіцитних і дорогих матеріалів. Це дозволяє значно скоротити вартість устаткування, і отриманої на ньому енергії.

Сонячні теплові колектори Інформаційним управлінням з енергетики США підрозділяються на низько-, середньо-, і високотемпературні. Низькотемпературні колектори є плоскими плитами і зазвичай використовуються для підігріву плавальних басейнів. Середньотемпературні колектори переважно теж є плоскими плитами, але використовуються для підігріву води для житлового та комерційного використання. Високотемпературні колектори концентрують сонячні промені за допомогою дзеркал і лінз і, як правило, використовуються для виробництва електроенергії.

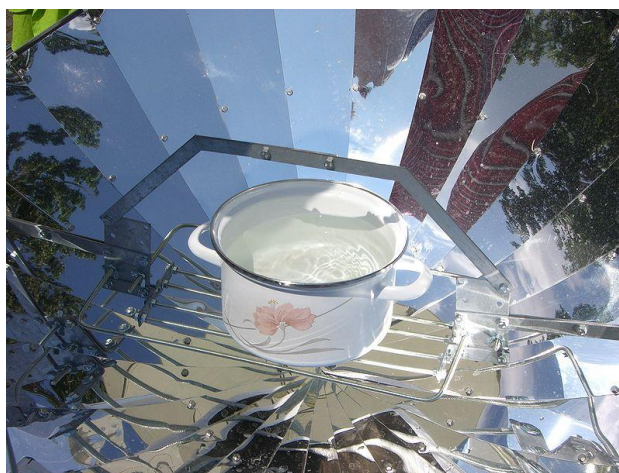
Сонячна енергія для обігріву, охолодження, вентиляції та технологічних потреб може бути використана для зменшення витрат на енергію. Теплова маса устаткування зберігає сонячну енергію протягом дня, і віддає її коли стає холодніше. Загалом до теплової маси відносяться кам'яні матеріали, бетон і вода. При розміщенні теплових мас слід враховувати низку факторів, таких як клімат, рівень денного світла, тіней та інших умов. При правильному розташуванні теплової маси можна підтримувати комфортну температуру в жилих приміщеннях, теплицях. Теплова енергія маси ґрунту також може бути використана для зберігання і використання тепла.

#### *Сонячна теплова енергія*

Типова конструкція побутової сонячної системи опалення складається з сонячної панелі (або сонячного колектору) з теплообмінною рідиною, що рухається через нього, переносячи зібрану теплову енергію до цистерни з водою або домашніх радіаторів. Сонячні панелі найчастіше розташовуються на даху будівлі. Насос рухає робочу рідину (часто добре очищену воду) до накопичувального контейнера. Тепло, таким чином, збирається і розподіляється контейнера.

Також можна використовувати пасивне сонячне опалення, яке не потребує електричного або механічного обладнання, і може враховувати дизайн і структуру будинку при збиранні, зберіганні і розподіленні тепла по ньому. Деякі пасивні системи використовують незначну кількість електричної енергії для управління заслінками, ставнями, нічними ізоляційними та іншими пристроями, що підвищують рівень збору, зберігання, використання та зниження небажаного теплообміну сонячної енергії.

### *Сонячна кухня*



#### Сонячна жаровня

Сонячні колектори можуть застосовуватися для приготування їжі. Температура в фокусі колектора досягає 150 °С. Такі кухонні прилади можуть широко застосовуватися в країнах, що розвиваються. Вартість матеріалів необхідних для виробництва «сонячної кухні» складає \$3 — \$7.

Традиційне паливо (дрова), що використовується для приготування їжі мають термічну ефективність біля 10%. Крім того, використання дров для приготування їжі приводить до масованої вирубки лісів.

Існують різні міжнародні програми розповсюдження сонячних кухонь. Наприклад, в 2008 р. Фінляндія і Китай уклали угоду про постачання 19 000 сонячних кухонь в 31 село Китаю. Це дозволило не тільки зекономити паливо, а й скоротити викиди CO<sub>2</sub> на 1,7 млн тон в 2008–2012 рр. В майбутньому Фінляндія зможе купувати квоти на ці викиди.

### *Використання сонячної енергії в хімічному виробництві*

Сонячна енергія може застосовуватися в різних хімічних процесах.

Наприклад:

Ізраїльський Weizmann Institute of Science в 2005 році випробував технологію отримання неокисленого цинку у сонячній башті. Оксид цинку у присутності деревного вугілля нагрівався дзеркалами до температури 1200 °С на вершині сонячної башти. В результаті процесу отримувався чистий цинк. Далі цинк можна герметично упакувати і транспортувати до місць виробництва електроенергії. На місці цинк поміщається у воду, в результаті хімічної реакції виходить водень і оксид цинку. Оксид цинку можна ще раз помістити в сонячну башту і отримати чистий цинк. Технологія пройшла випробування в сонячній башті канадського Institute for the Energies and Applied Research.

Швейцарська компанія Clean Hydrogen Producers (CHP) розробила технологію виробництва водню з води при допомозі параболічних сонячних концентраторів. Площа дзеркал установки становить 93 м<sup>2</sup>. У фокусі концентратора температура досягає 2200°С. Вода починає розділятися на водень і кисень при температурі близькій до 1700 °С. За світловий день установка CHP може розділяти на водень і кисень 94,9 літрів води. Виробництво водню складе 3800 кг в рік (близько 10,4 кг в день).

Водень може зберігатися значний час та використовуватися для виробництва електроенергії за допомогою паливних елементів, або як паливо для автотранспорту.

### *Цікаві факти*

У СРСР перша промислова сонячна електростанція СЕС-5 була побудована в Криму в 1985 р. близько міста Щолкіне. Вона мала потужність 5 МВт, тобто таку ж, як і перший ядерний реактор. За 10 років роботи вона дала 2000000 кВт год. електроенергії. В середині 90-х років її закрили.



У 2011 році в країні вже працювали батареї потужністю 67,55 МВт, у Криму було збудовано найбільший сонячний парк Європи та світу. За короткий час Україні вдалося зробити ривок і вийти в перші ряди за темпами розвитку сонячної енергетики.

Іноземний інвестор, австрійська компанія Activ Solar, взялася за проектування сонячного парку в селі Родникове (Сімферопольський район, АРК) і в короткий термін побудувала станцію потужністю 7,5 МВт, яка стала найбільшою на пострадянських просторах. У лютому 2011 року пілотний сонячний парк запрацював на повну потужність. Цей проект отримав нагороду в конкурсі «Успіх року» в номінації «Лідер Інновацій».

Після пілотного проекту у Родниковому розпочалося будівництво сонячних електростанцій у різних регіонах України. Наприклад, у Вінницькій області у січні розпочала роботу сонячна електростанція потужністю 35 кВт, змонтована на даху виробничого будинку Гніванського шиноремонтного заводу.



Компанія «Зоря 2003» запустила мікросонячну електростанцію в Луганській області. Її панелі потужністю 15 кВт розташовані біля траси «Харків-Ростов».

У грудні 2011 року, австрійська компанія Activ Solar завершила будівництво в Криму останньої, п'ятої, 20-мегаватної черги сонячного парку Перово, в результаті чого його сумарна встановлена потужність зростає до рекордних 100 МВт.



Перово у складі п'яти черг, стало найбільшим фотоелектричним парком у світі за показником встановленої потужності. За ним ідуть канадська електростанція Sarnia (97 МВт), італійська Montalto di Castro (84,2 МВт) і німецька Finsterwalde (80,7 МВт).

Завершує світову п'ятірку найбільших фотоелектричних парків інший проект у Криму – 80-мегаватна електростанція Охотникове, побудована також у 2011 році, в Сакському районі півострова.

У грудні 2012 року на території приміського села Ралівка Самбірського району запрацювала перша на Львівщині сонячна електростанція потужністю 1,1 Мвт. Вона складається з 3888 сонячних елементів. Побудована сонячна електростанція завдяки ТзОВ «Еко-Оптіма» спільно з чеськими інвесторами.

В Данії за рахунок сонячної енергії, яка, в основному, використовується для вироблення тепла в приватному секторі, покривається від 1/3 до 3/4 потреби в кожному житловому будинку, а ціна на електроенергію регулюється Міністерством енергетики.

У Німеччині до 70% витрат на «соляризацію» будинків компенсує держава. Крім того, вона купує у власників «сонячних дахів» електрику за цінами, що значно перевищують ринкові. Тобто, коли вдень будинок виробляє енергії багато, а споживає мало, її надлишки йдуть в міську мережу і господар отримує 80 центів за кожен кВт-год.



Вночі ж власник сам купує електрику в тій же самій мережі, але вже по 20 центів за кВт год. У країні обладнають сонячними елементами по 0,5 млн квадратних метрів дахів в рік.

В Австралії вже більше 19 років проводяться щорічні перегони на сонячних електромобілях на трасі між містами Дарвін і Аделаїда (3000 км). У



1990 році компанія «Sanio» побудувала літак на сонячних батареях, який перетнув всю Америку.



У США діє кілька гібридних сонячно-теплових електростанцій загальною потужністю понад 600 МВт. Вдень вони працюють від сонця, а вночі від газу. Температура пари до 370 С, а тиск — 100 атмосфер.

У Бельгії сонячні батареї використовують для живлення ділянки високошвидкісної лінії Париж-Амстердам. Відрізок завдовжки 3,5 км поблизу Антверпена перетворили на унікальний екологічний тунель.



Хоча, слово тунель тут не дуже підходить – це, скоріше, крига залізниця. На даху споруди розташували 16 тис. фотоелементів, загальною площею 50 тис. кв. м. У рік система генерує 3,3 ГВт електроенергії. Це

дозволяє забезпечити не лише рух поїздів, які їздять тут зі швидкістю 300 км/год., а й всю інфраструктуру залізничної ділянки. Так, свою частку сонячної енергії отримують вокзал в Антверпені, система освітлення, сигнальні пристрої і навіть вагонні розетки.

Будівництвом першого європейського залізничного екотунелю займалась бельгійська компанія Enfinity. Розробники запевняють – таким чином вдасться знизити щорічні викиди вуглекислого газу в атмосферу більш ніж на 20 тис. т.

“Загальна вартість проекту – близько 14 млн. євро. І це чимала сума. З огляду на останні тенденції у ЄС, подібні проекти можуть втратити фінансування. Але, якщо ж говорити конкретно про цей проект, то він виявився доволі вдалим. Хоча б тому, що система вироблятиме надлишкову електроенергію. Вона надходитиме у мережу Антверпена і забезпечуватиме світлом місцевих мешканців”, – розповідає міністр енергетики Великої Британії Грег Баркер.

Ще один бонус "сонячного тунелю" – захист від дерев, які раніше регулярно падали на залізницю. Справа в тому, що лінія проходить територією заповідника, і вирубка лісу тут заборонена. Тепер проблему вирішено.

### **3.7 Вітроенергетика**

Вітроенергетика є способом отримання електричної енергії за допомогою вітру. Засоби отримання енергії вітру – вітротурбіни (вітрогенератори, вітрові установки), які об'єднують у так звані вітроелектростанції (ВЕС). Вітроенергетика – галузь відновної енергетики, яка спеціалізується на використанні кінетичної енергії вітру. Це один з тих способів використання енергії навколишнього середовища, що був відомий з давніх часів.

Джерело вітроенергетики – Сонце, оскільки саме його активність спричинює утворення вітру. Атмосфера Землі вбирає сонячну радіацію

нерівномірно через неоднорідність її поверхні та різний кут падіння світла у різних широтах у різні пори року. Повітря розширюється та підіймається угору, утворюючи потоки. Там, де повітря нагрівається більше, ці потоки піднімаються вище і зосереджуються у зонах низького тиску, а холодніше повітря залишається нижче, створюючи зони високого тиску. Різниця атмосферного тиску змушує повітря пересуватися від зони високого тиску до зони низького тиску з пропорційною швидкістю. Цей рух повітря ми і називаємо вітром.

Щоб найкраще використати вітряну енергію, важливо досконало розуміти добові та сезонні зміни вітру, зміну швидкості вітру залежно від висоти над поверхнею землі, кількість поривів вітру за короткі відрізки часу, а також мати статистичні дані хоча б за останні 20 років. Від загальної кількості енергії Сонця лише 1-2 % перетворюється на енергію вітру. Ця кількість вп'ятеро перевищує річну світову енергетичну потребу. Сучасна технологія дає змогу використовувати тільки горизонтальні вітри, що розміщені близько до поверхні Землі і мають швидкість від 12 до 65 км/год.

Основна відмінність такої електростанції від традиційних (теплових, атомних) полягає у повній відсутності сировини та відходів. Єдина основна вимога – високий середньорічний рівень вітру. Потужність сучасних промислових вітрогенераторів досягає 6 МВт.

Людство використовує енергію вітру вже більше 5000 років. Одним з найперших винаходів, який застосовував використання енергії вітру, було вітрило. Ще у 3500 р. до н. е. мореплавці використовували силу вітру, щоб іти під вітрилами. Вітрильні човни ходили Нілом у Давньому Єгипті. Тобто вітрило було першою машиною, що використовувала енергію вітру. Звичайні вітрові млини були вже в Китаї 2200 років тому. На Середньому Сході, у Персії, близько 200 р. до н. е. почали застосовувати вітряні млини з вертикальною віссю для перемелювання зерна, їх виготовляли з в'язанок очерету, прикріплених до дерев'яної рамки, що оберталася, коли дув вітер. Стіна, що оточувала вітряк, спрямовувала потік вітру напроти лопаті.

Найпростіші вітрові млини мали досить низький ККД, незважаючи на те, що лопаті виготовлялись з досить легкого дерева чи матерії. Причиною неефективності було те, що сила вітру, яка штовхала одну половину вітроколеса, одночасно гальмувала іншу частину.

У I ст. до н. е. давньогрецький учений Герон Олександрійський винайшов вітряк, що керував органом. Перші вітряні млини для переробки зерна були збудовані на межі сучасного Ірану й Афганістану; вони мали вертикальну вісь, від шести до дванадцяти крил з полотна або очерету та використовувались як млини і помпи для води. Феномен вітру у давнину також застосовували для природної вентиляції та охолодження повітря у сухих і жарких країнах Середньої Азії.

У Європі вітряки з'явилися пізніше, у УШ-ІХ ст. Найбільш широко вітрові установки використовувалися в Голландії, де люди, починаючи з Х-ХІ ст., боролися з морем за кожен клаптик землі, придатної для сільського господарства. Голландці відкачували воду з відвойованих у моря територій саме завдяки роботі сотень вітряків. Спочатку будували земляні дамби, які відокремлювали мілководну ділянку моря, а потім споруджували млини з водовідливними колесами. Так, у 1608-1612 рр. було осушено місце, яке знаходилося на три метри нижче від рівня моря, за допомогою 26 вітродвигунів потужністю 37 кВт кожен. У 1582 р. у Голландії була побудована перша маслобійня, яка використовувала енергію вітру, а через 4 роки – перша паперова фабрика, яка забезпечувала підвищені вимоги до паперу, обумовлені винайденням друкарської машинки. Наприкінці ХVІ ст. з'явилися лісопильні заводи для виробництва лісоматеріалів, які імпортувалися з прибалтійських держав. У середині ХІХ ст. в Голландії для різних потреб використовувалося близько 9 тис. вітродвигунів. Голландці значно вдосконалили конструкцію вітряних млинів і, зокрема, вітроколеса.

Найактивніше у допромисловій Європі вітряні млини застосовували у ХVІІІ ст. За їх допомогою мололи зерно, качали воду, пиляли деревину. Згодом більшість вітряних млинів, нездатних конкурувати з дешевим і

надійним викопним паливом, замінили на парові двигуни. У дореволюційній Росії, наприклад, налічувалося близько 30 тис. вітряків. Ця установка була також атрибутом майже кожного другого села в Україні, проте парова машина, а потім двигун внутрішнього згорання витіснили їх.

Реконструкція голландцями вітряків і вітроколес була спрямована насамперед на те, щоб збільшити їх ККД і термін дії, У результаті великі вітрові млини заводського виготовлення при великих швидкостях вітру могли розвивати потужність до 66 кВт. У період промислової революції внаслідок застосування парових двигунів використання енергії вітру в Голландії суттєво зменшилося, тому на початку ХХ ст. тут працювало тільки біля 2,5 тис. вітродвигунів, а до 1960 р. в робочому стані залишилося менше тисячі з них.

Перша вітрова електростанція промислового типу була побудована у США у м. Клівленд (штат Огайо) у 1888 р. Ч. Брашем. Це багатолопатева конструкція з діаметром лопатей 17 м, яка мала лопатку для спрямовування вітроколеса перпендикулярно до напрямку вітру і здатна була виробляти 12 кВт електроенергії. Ця станція успішно пропрацювала майже 20 років, довівши, з одного боку, перспективність цього напрямку енергетики, а з іншого - стала для конструкторів робочою моделлю при виробництві більш удосконалених установок.

У середині ХІХ ст. у США було побудовано більше 6 млн малих вітродвигунів з одиничною потужністю до 0,75 кВт, які виробляли електроенергію, піднімали воду та виконували інші роботи. Для піднімання води переважно використовувалися вітродвигуни із суцільнометалічними вітроколесами діаметром 3,7-4,9 м, які оберталися на горизонтальному валу і були оснащені механізмом для орієнтації на напрямок вітру. Такі вітроколеса розвивали потужність близько 120 Вт при швидкості вітру 6.7 м/с та могли підняти 160 л/хв води на висоту до 7 м.

У Радянському Союзі перша вітрова електростанція потужністю 8 кВт була споруджена у 1929-1930 рр. під Курськом. Через рік у Криму було

побудовано більшу ВЕС потужністю 100 кВт, що на той час була найбільшою у світі. Вона успішно працювала до 1942 р., але під час війни була зруйнована. Проте найшвидше вітроенергетика розвивалася у США – ще у 1941 р. там побудували першу ВЕС потужністю 1250 кВт.

Останніми роками вітер все ширше використовується для одержання електроенергії. Створюються вітряки великої потужності і встановлюються на місцевості із частими й сильними вітрами. Кількість і якість таких двигунів зростає щорічно, налагоджено серійне виробництво. Наприклад, у Нідерландах спостерігається так званий мірошницький бум. Уряд запропонував великі субсидії усім, хто відкриє вітряк. Навіть парламент країни, що дбайливо охороняє "характерний національний пейзаж" і виступає проти надмірного шуму, цього разу не заперечував проти використання екологічно чистої вітрової енергії. Нині на території Нідерландів, що позбавлені запасів вугілля, нафти й газу, діють близько тисячі вітрогенераторів струму, що задовольняє потреби всієї країни в електроенергії приблизно на 10 %.

Вітер є стихією потужною і практично всюдисущою. Проте вона має і недоліки, що завадило їй поширитися як основне джерело забезпечення. Енергетичний потенціал вітру пропорційний кубу його швидкості, а території зі значною середньою швидкістю вітру, тобто 5 м/с і вище, що забезпечує економічність роботи вітроустановок, часто віддалені від місць споживання енергії. Найбільшу енергію мають ураганні вітри, однак ця енергія не може бути утилізована, до того ж урагани є головними руйнівниками вітроустановок.

Звичайно, можливості використання цього виду енергії у різних регіонах Землі неоднакові. Для нормальної роботи вітрових двигунів швидкість вітру не повинна падати у середньому за рік нижче за 4-5 м/с, а краще, коли вона становить 6-8 м/с. Проте для цих установок шкідливими є і надто великі швидкості вітру (урагани), які можуть їх зруйнувати. Найбільш сприятливими регіонами для використання вітрової енергії є узбережжя

морів і океанів, степи, тундра, гірські райони. Найефективніше вітрова установка використовується у місцях, де відсутнє централізоване енергопостачання, немає таких перешкод, як висотні будинки, пагорби та достатній вітровий потенціал.

За оцінками вчених США, площа, де середня швидкість вітру на висоті 8-10 м перевищує 5,1 м/с, охоплює 25 % поверхні Землі. Але не всюди її можна використати, і, якщо врахувати економічні, технічні, екологічні та інші обмеження, то до 2020 р. можна було б побудувати ВЕС загальною потужністю у 450 млн кВт, які могли б щороку виробляти 900 млрд кВт/год електроенергії. Це становило б 3,5 % усієї електроенергії, що, за прогнозами, буде вироблена. Одним із факторів, що обмежує масштаби використання енергії вітру, є неможливість будувати одиничні агрегати великої потужності через недостатню міцність лопатей. Доводиться будувати комплекси, що складаються з багатьох вітроустановок, об'єднаних у систему. Іншою проблемою є переривчастий графік роботи таких ВЕС, що вимагає акумулювання енергії для зручності користування.

Технічний прогрес (нові матеріали, електрогенератори, системи передачі обертового моменту, аеродинаміка лопатей) дозволили за останні два десятиліття на 80 % знизити собівартість електроенергії, одержаної з ВЕС. Великі ВЕС потужністю 50 МВт і більше, розміщені в місцях, де середня швидкість вітру досягає 9 м/с, здатні виробляти електроенергію за ціною 3 або навіть менше 1 цента за 1 кВт/год. Водночас собівартість електроенергії малих ВЕС (потужністю до 3 МВт), розміщених у районах із швидкістю вітру 7 м/с, може становити до 8 центів за 1 кВт/год. Зауважимо, що у США собівартість електроенергії на АЕС менша, ніж 2 центи за 1 кВт/год. Тобто економічність ВЕС значно більше залежить від місця розташування і проекту, ніж у випадку АЕС і ТЕС. Також за умов економічного програшу ВЕС у конкуренції з АЕС і ТЕС частка ВЕС залежатиме від політичної та економічної допомоги держави.

Сумарна оцінка потужності стійких вітрів у нижніх шарах атмосфери становить близько 5000 ГВт. Наприклад, Китай, багатий на вітроенергію, міг би подвоїти виробництво електроенергії лише за рахунок вітру. Міністерство енергетики США в реєстрі вітрових ресурсів вказує, що три штати - Північна Дакота, Південна Дакота і Техас - мають достатньо придатної для використання вітроенергії, щоб забезпечити всю національну потребу в електроенергії.

Вітроенергетика сьогодні перестала бути фантастикою і зростає найшвидшими темпами серед усіх інших альтернативних джерел енергії. Вітер є незвичайним енергоносієм, невичерпним, але при цьому має безліч складних і слабопередбачуваних фізичних параметрів для кожного окремо взятого географічного регіону. Тобто окрім середньорічної і максимальної швидкостей, слід враховувати такі показники внутрішньої структури повітряного потоку, як "троянда вітрів", поривчастість, щільність повітря, турбулентність, температура і різновекторні течії по висоті.

Станом на кінець 2007 р. загальна потужність установлених вітрових турбін у світі становила 94,1 ГВт, а отримана енергія – всього 1 % від загального обсягу споживання електроенергії у світі. Проте у деяких країнах показники дещо вищі: у Данії приблизно 19 % виробленої електричної енергії отримано від енергії вітру, в Іспанії і Португалії – 9 %, у Німеччині та Ірландії – 6 %. У глобальному вимірі виробництво електроенергії на основі енергії вітру зросло у п'ятеро за період від 2000 до 2007 р. Нині вітроенергетичні установки працюють приблизно у 96 країнах світу. Серед країн, що розвиваються, лідером є Індія з її 900 МВт встановленої потужності.

Розглянемо, які позиції завоювала вітрова енергетика у різних країнах. США ще у 1995 р., маючи у Каліфорнії три найбільші у світі ВЕС, володіли 40 % усієї світової потужності вітроагрегатів. За наступні 5 років потужності у США зросли у 1,5 рази, однак частка у світовій електроенергетиці зменшилась до 15 %. Енергетична політика США була розрахована на



будівництво потужних ВЕС переважно на найбільш придатних територіях, наприклад, у Каліфорнії (1600 МВт із загальних 1770 МВт). Саме там експлуатуються найпотужніші у світі ВЕС. Нині Міністерством енергетики США здійснюється програма, спрямована не тільки на підвищення технічного рівня ВЕС за кращими аеродинамічними та вартісними характеристиками, а й розширення географії розміщення ВЕС.

На сьогодні за допомогою вітру у США виробляється лише 1 % від усієї електроенергії. За прогнозами, до 2020 р. цей показник зросте до 15 %. Лідером є найбільш "нафтовий" і найбільш ліберальний в енергетичному питанні штат Техас. Саме тут нафтовий магнат Т.Б. Пікенс збирається спорудити найбільшу у світі ВЕС потужністю 1 ГВт і вартістю 2 млрд. дол. використовуючи найсучасніші турбіни.

У 2001 р. на перше місце у світі за сумарною потужністю ВЕС із 6113 МВт вийшла Німеччина. Лідером її вітроенергетики останніми роками є фірма Enercon, яка у 2000 р. виробила 27,4 % усього обсягу продукції вітроенергетики країни. Загалом у Німеччині до виробництва комерційних вітроустановок залучено 20 фірм, а вітроенергетикою займаються 10 інститутів та організацій. Сучасні вітроустановки провідних німецьких виробників мають значну потужність - від 3000 кВт до 4,5 МВт.

Протягом останнього десятиліття у світовій енергетиці незаперечну першість за темпами розвитку незмінно утримує саме вітроенергетика. Темпи приросту сумарної потужності ВЕС протягом останніх років коливаються у межах 20-30 % щороку. Лідерами у цій справі є США і Німеччина. Данія планує покрити власні потреби у електроенергії за рахунок вітроенергетики на 50 %. На сучасних ВЕС Данії вартість 1 кВт енергії можна порівняти з вартістю виробленого на ТЕС, що працює на вугіллі.

З усіх пристроїв, що перетворюють енергію вітру на механічну роботу, у переважній більшості використовуються лопатеві машини з горизонтальним валом, установленим за напрямком вітру, набагато рідше – пристрої з вертикальним валом. Турбіни з горизонтальною віссю і високим

коефіцієнтом швидкохідності мають найбільше значення коефіцієнта використання енергії вітру (0,46-0,48). Вітротурбіни з вертикальним розташуванням осі менш ефективні (0,45), але не вимагають налаштування на напрямок вітру. Сьогодні запропоновано безліч варіантів механізмів для отримання електричної енергії з вітру.

Основним елементом у таких установках є вітроколесо. За принципом роботи та будовою вітроколеса вітрові двигуни поділяють на три класи:

- крильчасті (пропелерні) - мають вітроколесо з лопатями, розташованими перпендикулярно до валу;
- карусельні, або роторні;
- барабанні.

У карусельних і барабанних вітродвигунах вал вітроколеса встановлюється вертикально. Воно обертається під дією вітру на лопаті, розташовані з одного боку осі колеса, тоді як інші лопаті прикриваються ширмою або повертаються за допомогою спеціального пристрою ребром до вітру. Обидва класи громіздкі та менш ефективні, порівняно з крильчастими, тому вся сучасна вітроенергетика базується в основному на крильчастих типах вітродвигунів. Пропелерні вітродвигуни досконаліші, потребують мало матеріалів, забезпечують досить високий коефіцієнт використання енергії вітру. Розташуватися один поряд з іншим вони мають не ближче, ніж за три "висоти", аби не перехоплювати одні й ті самі потоки вітру.

Вітрогенератор (вітрова турбіна) - це пристрій для перетворення кінетичної енергії вітру на електричну. Також вітрогенератори можна умовно поділити на дві категорії: промислові і домашні (для приватного використання). Промислові встановлюються державними органами або великими енергетичними компаніями. Як правило, їх об'єднують у мережу утворюючи в результаті справжні електростанції.

Будова вітрогенератора (вітрової турбіни) наведена на мал., крім того він може містити систему пожежегасіння, телекомунікаційну систему для передачі даних про свою роботу, а також систему захисту від блискавки.



Рис. 3.50 Вітрогенератор

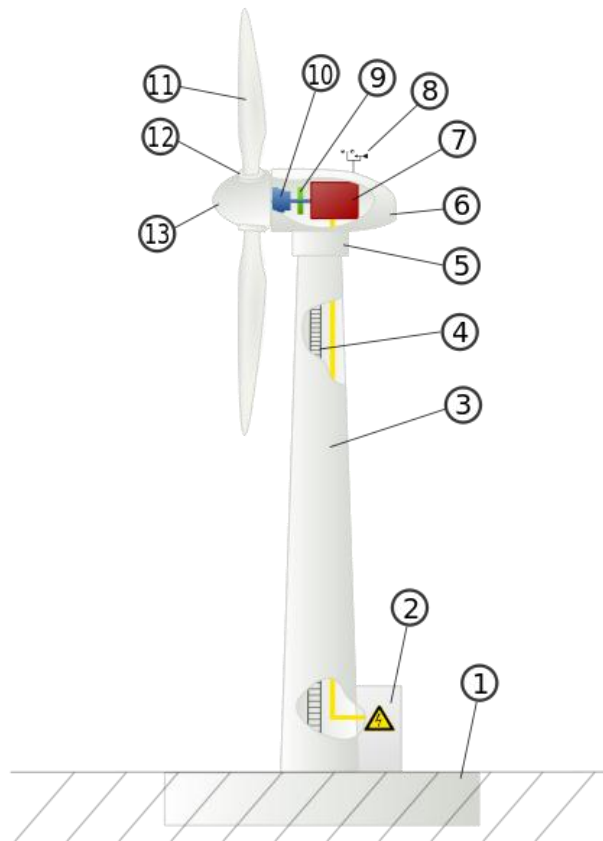


Рис. 3.51 Будова вітрогенератора: 1 - фундамент; 2 - силова шафа, що включає силові контактори і ланцюги керування; 3 - вежа; 4 - сходи; 5 - поворотний механізм; 6 - гондола; 7 - електричний генератор; 8 - система спостереження за напрямком і швидкістю вітру (анемометр); 9 - гальмова система; 10 - трансмісія; 11 - лопаті; 12 - система зміни кута атаки; 13 - ковпак ротора

Система з вітроенергетичних установок і є вітровою електростанцією. Малі вітряки можуть повністю забезпечувати електроенергією один або декілька будинків, невеликі промислові об'єкти. Такі установки здатні працювати при середній швидкості вітру від 4 м/с, і ціни на них невпинно знижуються. Індустрія домашніх вітряків активно розвивається. Як правило, для невеликого котеджу достатньо вітряка номінальною потужністю 1 кВт, при швидкості вітру 9 м/с. Якщо місцевість не вітряна, то його можна доповнити сонячними батареями - ці джерела енергії можуть доповнювати одне одного.

Водночас система вітроенергетичних установок має і недоліки, оскільки вітрогенератори:

- створюють високий рівень шуму;
- потребують відведення значних земельних площ: вітроагрегати близько один до одного розміщувати не можна, тому що вони перешкоджатимуть один одному в роботі - мінімальний проміжок між вітряками повинен бути не менше за їх потрійну висоту;
- потребують значних затрат матеріалів;
- можуть заважати прийому сигналів телепередач на відстані до 1,6 км, оскільки частота обертання лопатей синхронна з частотою передавання телесигналів (використання лопатей зі скловолокна дасть змогу зменшити цю відстань приблизно вдвічі);
- розполохують птахів і звірів порушуючи їх природний спосіб життя;
- можуть бути причиною смерті птахів, які часто потрапляють у лопоті вітрогенератора;
- побутує думка, що вітроустановки є джерелами досить інтенсивного інфразвукового шуму: вітродвигуни генерують нечутні для вуха коливання з частотами нижче за 16 Гц; не дивно, що у багатьох країнах, у тому числі в Ірландії, Великій Британії, місцеві жителі виступають проти розміщення ВЕС поблизу населених пунктів і сільськогосподарських угідь;

- завдає збитків довкіллю виготовлення акумуляторних батарей вітрогенератора;
- встановлення більшої кількості ліній передач електроенергії від численних вітрогенераторів теж шкодить навколишньому середовищу;
- подача електроенергії внаслідок не прогнозовано нерівномірної роботи вітрогенератора нерівномірна, прикладом може бути ситуація у Нідерландах, де частка ВЕС на початку 1990-х років становила 0,11 % від усіх встановлених потужностей, тоді як частка виробленої електроенергії - лише 0,02 %.

Для вирівнювання подачі струму застосовують акумулятори, але це дорого і малоефективно. Було висунуто ідею розміщення систем вітряків у відкритому морі. Так, у Швеції розроблено проект, відповідно до якого передбачається в Балтійському морі встановити систему із 300 вітряків заввишки 90 метрів, на яких розташують дволопатеві пропелери з розмахом лопатей 80 м. Вартість будівництва лише перших 100 таких гігантів становить більше 1 млрд дол., а вся система, будівництво якої триватиме понад 20 років, забезпечить лише 2 % споживаної Швецією електроенергії. Вже розпочато будівництво у Швеції ще однієї ВЕС потужністю 200 кВт у морі на відстані 250 м від берега, яка буде передавати енергію на землю через підводний кабель. Аналогічні проекти були і у СРСР: пропонували встановлювати вітряки у акваторії Фінської затоки, на Арабатській Стрілці в Криму. Крім складності й затратності таких проектів, вони можуть зашкодити судноплавству та рибальству. Шведські рибалки вимагають перегляду запропонованого проекту, оскільки підводний кабель, як і сама станція, негативно впливатимуть на рибу, зокрема, на вугрів, які мігрують у тих місцях.

Сьогодні ж для виробництва вітрових турбін використовують розробки космічних відомств, що підвищує їх ефективність та надійність. Якщо у 2002 р. середній час простою вітрових турбін через технічні причини становив 15 %, то нині - близько 3 %. Турбіни останнього покоління мають не тільки

більші (що дає змогу максимально використовувати силу навіть слабого вітру), а й гнучкіші (що дає можливість позбавлятися надлишків енергії) лопаті. Крім того, сучасні турбіни розставляються вже не безсистемно, а з урахуванням рекомендацій кваліфікованих метеорологів (причому різниця в один-два кілометри може виявитися дуже істотною). А ще рекомендації тих самих метеорологів дають можливість зв'язувати сусідні вітрові турбіни у найефективніші ланцюги, які дозволяють турбінам не зупинятися навіть за цілковитої відсутності вітру.

Отже, ВЕС самі по собі не можуть бути надійною основою енергетики. Вони або доповнюють основні потужності, роблячи певний внесок у виробництво необхідної електроенергії, або ж є джерелом електрики у віддалених чи ізольованих місцях, де складно чи неможливо забезпечити постачання електроенергії іншим чином, наприклад, на крижинах в зимівників або у інших місцях, де є проблеми з постачанням енергії, а потреби в ній невеликі. Але з погляду екології і здорового глузду використовувати їх для розвитку великої енергетики зовсім нереально ні зараз, ні у найближчому майбутньому.

За даними Міжгалузевого науково-технічного центру вітроенергетики Національної академії наук України, територія нашої країни має значні ресурси вітрової енергії, які оцінюються у 30 ТВт х год./рік.

На території України придатними для будівництва ВЕС вважаються площі до 7 тис. км<sup>2</sup>, це - карпатський, приазовський, донецький, західнокримський, гірнокримський, керченський регіони, Харківська й Полтавська області. За розрахунками науковців, при максимальному використанні сили вітру в цих регіонах можна було б одержувати електроенергію в обсягах, які б надавали можливість забезпечити до 50% загального енергоспоживання країни.

Сьогодні в Україні побудовано 13 вітроелектростанцій: 10 в АР Крим (з яких працюють тільки 6), по одній ВЕС у Донецькій і Миколаївській областях, а також одна станція поблизу м. Трускавець у Карпатах.

Особливо актуальним є розвиток вітроенергетики для Кримського півострова. До 93% всієї електроенергії сюди надходить з материкової частини України від ДП «Енергоринок». Решта електроенергії видобувається за допомогою вітроелектростанцій. Сьогодні на півострові працюють 6 ВЕС. Це установки старого зразка, що мають одиночні потужності до 600 кВт. Для порівняння.

У Європі планується промислове виробництво вітроенергетичних установок одиничною потужністю 6 МВт, а найпоширеніша застосовувана потужність одного вітряка становить 2-3 МВт. В Україні ж тільки освоюється випуск установок одиничною потужністю до 2 МВт, до цього випускалися вітроелектростанції по 110-600 кВт. На відміну від країн СНД, тільки Україна сьогодні має налагоджене серійне виробництво ліцензійних ВЕУ. У їхньому виробництві беруть участь 20 заводів колишнього військово-промислового комплексу, а зборку вітротурбін для ВЕУ здійснює Дніпропетровський «Південний машинобудівний завод».



Рис. 3.52 Новоазовська вітрова електростанція

### 3.8 Біоенергетика

**Біоенергетика** – галузь електроенергетики, заснована на використанні біопалива, яке створюється на основі використання біомаси.

До біомаси відносять усю рослинну і вироблену тваринами субстанцію. При використанні біомаси в енергетичних цілях для виробництва тепла, електроенергії і палива, розрізняють енергетичні рослини і органічні відходи.

Енергетичними рослинами вважаються:

- швидко зростаючі сорти дерев і спеціальні однорічні рослини з високим вмістом сухої маси для використання як тверде паливо;
- цукро- та крохмалевмісні польові культури для переробки в етанол, а так само маслянисті культури для виробництва біодизеля для застосування як рідке паливо;
- польові культури, придатні для силірування і використання у виробництві біогазу.

До органічних відходів відносяться речовини, що виникають в сільському, лісовому, домашньому господарстві і промисловості: відходи деревообробки, солома, трава, листя, гній, шлам, органічні відходи домашнього господарства і т. д.

До біогенного твердого палива відносяться усі не викопні види палива органічного походження, які до моменту їх використання знаходяться в твердому стані, як наприклад: деревина усіх видів і у будь-якій формі, солома, макуха, зерно, кукурудза, злаки, цукровий буряк, рапс, рослинні олії, біологічні відходи, екскременти, водорості і т. д.

*Біомаса є одним з найдавніших джерел енергії, однак її використання до недавнього часу зводилося до прямого спалювання при відкритому вогні або в печах і топках з відносно низьким к.к.д. Під біомасою розуміються органічні речовини, які утворюються в рослинах в результаті фотосинтезу і можуть бути використані для отримання енергії, включаючи всі види рослинності, рослинні відходи сільського господарства, деревообробної та інших видів промисловості. У більш широкому розумінні до біомаси*



*відносять також побутові й промислові відходи не завжди рослинного походження, але для яких характерні однакові принципи їх утилізації.* Використання біомаси для отримання енергії на основі сучасних технологій є екологічно значно більш безпечним в порівнянні з енергетичним використанням традиційних органічних ресурсів, таких як вугілля.

Потенціальні ресурси рослинної біомаси, які можуть бути використані в якості джерела енергії, досягають 100 млрд. т у. п.

У теперішній час у світовому енергобалансі рослинна біомаса (в основному дрова) не перевищує 1 млрд. т у. п. (біля 12%).

З використанням сучасних технологій частка біомаси в світовому енергобалансі може значно зрости.

Біомаса грає суттєву роль в енергобалансах промислово розвинених країн: у США її частка складає 4%, в Данії – 6%, в Канаді – 7%, в Австрії – 14%, в Швеції – 16% загального споживання первинних енергоресурсів цих країн.

У світі в 2004 р. встановлена потужність електростанцій на біомасі склала 39 млн. кВт.

У плані використання біомасу можна розділити на дві основні групи: первинна біомаса і вторинна. Джерелом первинної біомаси є наземний і водний рослинний світ, вторинної – відходи біомаси, що утворюються після збирання і перероблення первинної біомаси в товарну продукцію, і відходи, обумовлені життєдіяльністю тварин і людей.

Згідно с цим біоенергетика забезпечує отримання енергії шляхом використання біомаси, включаючи:

- продукти лісу у вигляді відходів лісозаготівель і лісопереробки;
- сільськогосподарські відходи, які підрозділяються на рослинні відходи сільськогосподарських культур (солома злакових культур, стеблі кукурудзи, соняшника тощо) і тваринні відходи (гній і гнійні стоки тощо);
- водну рослинну біомасу (водорості, макрофіти тощо);

- промислові й міські відходи (тверді побутові відходи, відстої міських і промислових стічних вод тощо), утилізація яких дозволяє вирішувати важливі екологічні та соціальні проблеми.



Рис. 3.53 Електростанція на біомасі у Данії



Рис. 3.54 Пилевугільна станція «Куміярві» (Фінляндія), де одночасно спалюється сміття з вугіллям при роздільній їх подачі.

**Використання біомаси.** Найбільш ефективними технологіями використання біомаси в біоенергетиці є пряме спалювання; піроліз;

газифікація; анаеробна ферментація з утворенням метану; виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива.

Технології використання біомаси постійно вдосконалюються, забезпечуючи отримання енергії в придатній для споживача формі й з максимально можливою ефективністю.

У загальному випадку енергія з органічних відходів отримується або фізичними, або хімічними чи мікробіологічними методами. Фізичним методом енергію отримують шляхом спалювання органічних відходів. Основою хімічного методу є використання процесів піролізу і газифікації. Найрозповсюдженішим у світі є мікробіологічний метод безвідходного виробництва – отримання біогазу анаеробним зброджуванням. Дуже цінним продуктом виробництва біогазу є отримання високоякісних органічних добрив.

Класифікація технологій з поетапним перетворенням біомаси в енергетичні продукти представлена на малюнку...

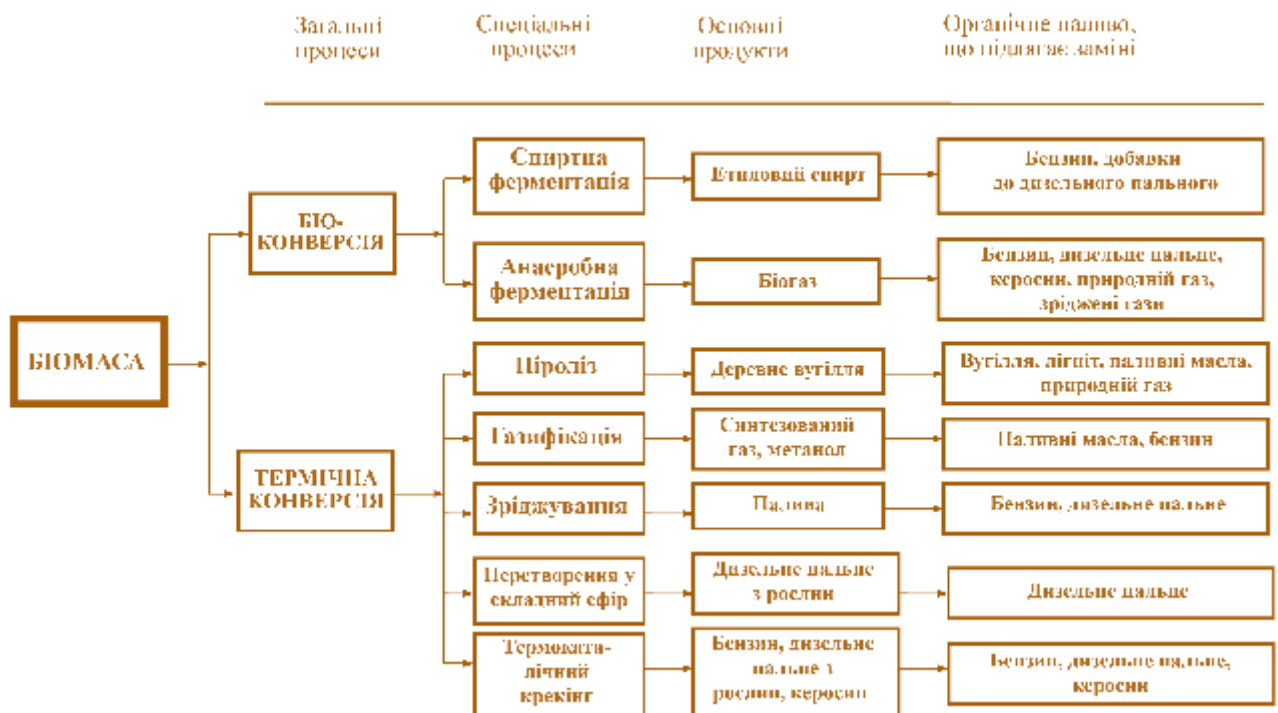


Рис. 3.55 Класифікація технологій перетворення енергії біомаси

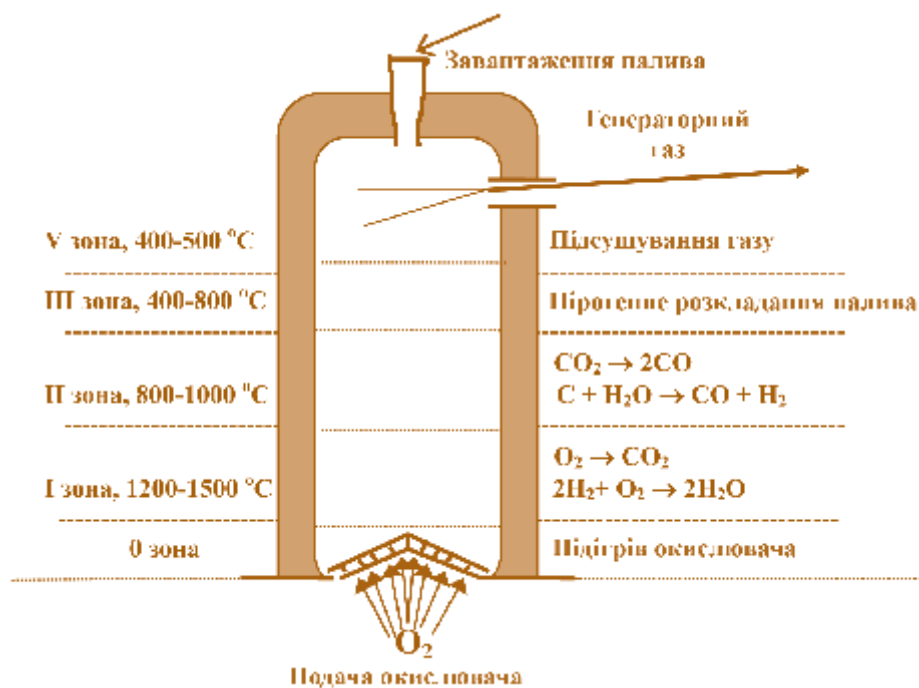


Рис. 3.56 Газофікатор

**Газифікація біомаси.** Пряме спалювання біомаси в атмосфері повітря або кисню – один з найбільш старих методів отримання теплової енергії. Однак існує ряд проблем при його практичному використанні, головною з них є досягнення найбільш повного згоряння палива, в результаті якого утворюються діоксин вуглецю і вода, що не завдає шкоди довкіллю. До технічних пристроїв, які використовуються для прямого спалювання біомаси, відносяться печі, топки, камери згоряння. Біомаса може використовуватися шляхом прямого спалювання в енергетичних установках у факелі, киплячому або ущільненому шарі з подальшим отриманням теплової і електричної енергії. Основна промислова технологія цього напрямку – пряме спалювання в котлі й генерація електроенергії в паротурбінній установці.

Піроліз біомаси – хімічне перетворення одних органічних сполук в інші під дією теплоти або так звана суха перегонка без доступу окислювачів (кисню, повітря). Розроблений ряд технологічних процесів піролізу біомаси, експлуатаційні умови кожного з них визначаються природою сировини, методами переробки і заданими продуктами виробництва. Характеристика продуктів піролізу залежить від типу сировини і умов проведення процесу.

Основними продуктами піролізу можуть бути вуглиста речовина, паливна рідина, паливні гази, причому часто технологічний процес орієнтований на переважне отримання одного з продуктів піролізу.

Газифікація біомаси – це перетворення твердих відходів біомаси в горючі гази шляхом неповного їх окислення повітрям (киснем, водяною парою) при високій температурі. Газифікувати можна практично будьяке паливо, в результаті чого отримують генераторні гази, які мають значний діапазон використання – як паливо для отримання теплової енергії в побуті та різних процесах промисловості, в двигунах внутрішнього згорання, як сировина для отримання водню, аміаку, метилового спирту і синтетичного рідкого палива. Не дивлячись на значні різновиди способів газифікації, всі вони характеризуються одними і тими ж реакціями (Мал..).

Газифікатори мають різну продуктивність з різним виходом енергії в паливному газі. Низькокалорійний газ може бути отриманий газифікацією різних видів біомаси – органічних компонентів твердих міських відходів, відходів лісу та сільськогосподарських відходів.

Ефективним є використання установок газифікації біомаси на газотрубних і парогазових електростанціях.

***Анаеробна ферментація біомаси.*** У процесі анаеробної ферментації складні органічні речовини розкладаються на  $CO_2$  і  $CH_4$  з утворенням біогазу у вигляді суміші вуглекислого газу і метану, причому на частку метану може припадати до 70%. Технологічний процес анаеробного зброджування біомаси відбувається без надходження кисню в спеціальних реакторах-метантенках, конструкція яких забезпечує максимальне виділення метану. Особливо важливим в процесі анаеробного зброджування є створення оптимальних технологічних умов в реакторі метантенку: температури, надходження кисню, достатньої концентрації живильних речовин, допустимого значення рН, відсутності або низької концентрації токсичних речовин.

Таблиця 3.57 Порівняльні енергетичні показники традиційних енергоносіїв і біогазу

Продукт	Одиниці вимірювання	Еквівалент	1	Еквівалент	1
		м <sup>3</sup> неочищеного біогазу	23 МДж/м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> очищеного біогазу	35,2 МДж/м <sup>3</sup>
Електроенергія	кВт·ч		0,62		0,94
Природний газ	м <sup>3</sup>		0,61		0,93
Вугілля	кг		0,82		1,25



Рис. 3.58 Зовнішній вигляд біогазової установки

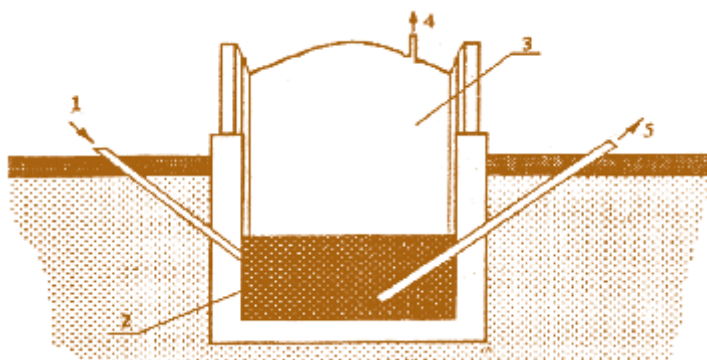


Рис. 3.59 Принципова схема анаеробної установки: 1 – приймальний пристрій; 2 – біореактор (метантенк); 3 – простір для збирання біогазу; 4 – патрубок, що з'єднує метантенк з газгольдером; 5 – пристрій для відкачування шламу з метантенку.

Найбільш ефективними вважаються біореактори, що працюють в термофільному режимі 43–62°C. На таких установках з триденною ферментацією гною вихід біогазу складає 4,5 л на кожний літр корисного об'єму реактора.

Порівняльні енергетичні показники традиційних енергоносіїв і біогазу наведені в таблиці 3.57.

Сучасні біогазові анаеробні установки складаються з таких основних систем:

- системи підготовки і подачі сировини в біореактор;
- біореактора (метантенка) із системою підтримання постійної температури та іншими комплектуючими пристроями;
- системи зберігання і використання біогазу;
- системи вивантаження і транспортування шламу.

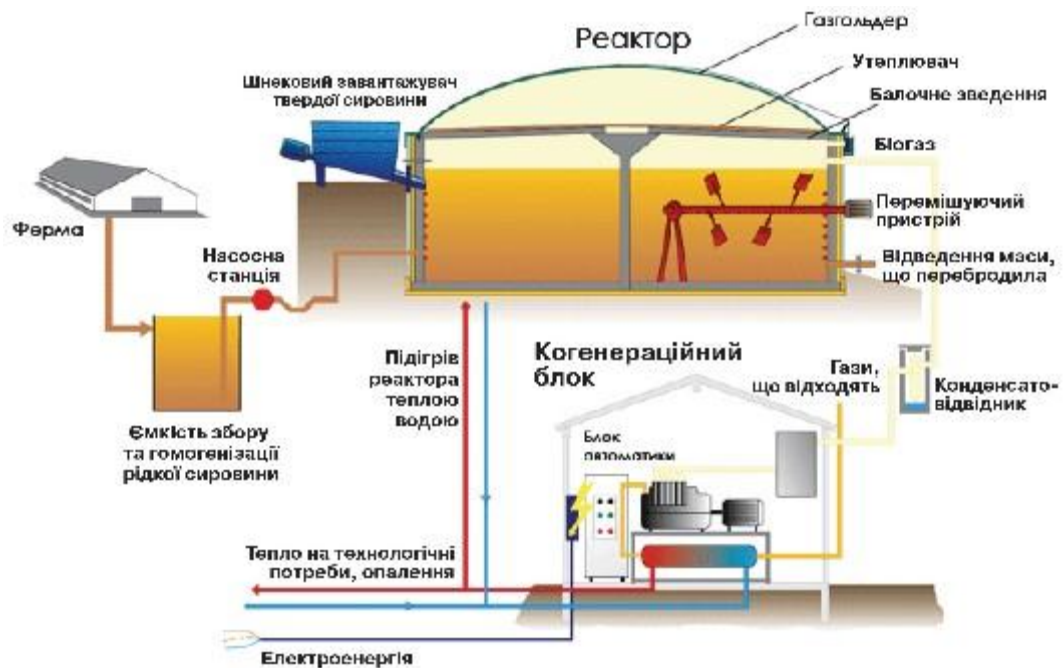


Рис. 3.60 Схема біогазової установки

Схема найпростішої біогазової анаеробної установки для індивідуального господарства зображена на Рис. 3.60.

Використання біогазу забезпечує можливість отримання теплової і електричної енергії, що є особливо привабливим для фермерських господарств. При масовому розповсюдженні біогазових технологій в



сільських регіонах можна досягнути значної економії органічного палива

Рис. 3.61.

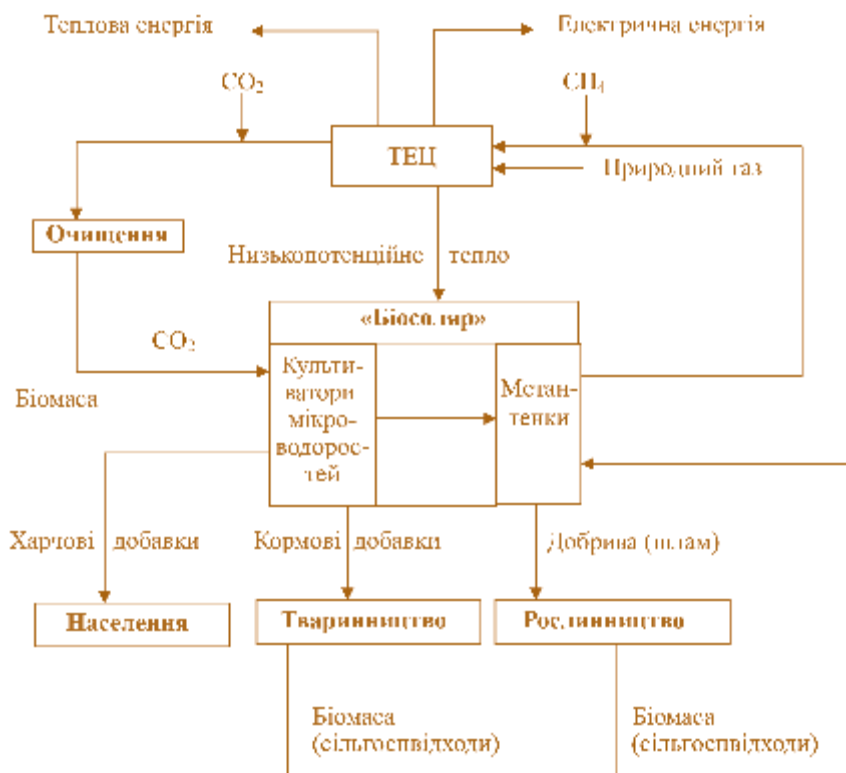


Рис. 3.61 Блок-схема гібридної енергосистеми «Біосоляр» – ТЕЦ



Рис. 3.62 Паливний склад ТЕЦ «Albolmens Kraft-2» (Фінляндія), яка спалює відходи деревообробних підприємств

Значний інтерес викликає вирощування і використання в метантенках водної рослинної біомаси для отримання біогазу. Однією з найбільш



продуктивних водоростей є бура водороль макроцистис, розповсюджена в прибережній зоні морів і океанів, врожайність якої складає 450–1200 т сирової маси на 1 га.

З кожної тонни широко відомої хлорели можна отримати 22 кДж енергії. Високою врожайністю характеризуються морські водоролі дуналієла, водяний гіацинт, червона водорість тощо.

Існує гібридна енергосистема «Біосоляр» – ТЕЦ, яка є замкненою для всіх біогенних елементів, окрім вуглецю, що спалюється (Мал...). Система «Біосоляр» являє собою комплекс з культивування мікробіодоростей, з яких виділяються харчові й кормові добавки, а інше є одним з елементів наповнення метантенків. Для культивування мікробіодоростей необхідний  $CO_2$ , який подається до них після очищення в результаті спалювання біогазу в котлах ТЕЦ.

Для отримання біогазу використовуються також відходи тваринництва і рослинності. У схемі передбачене додаткове джерело у вигляді природного газу, який використовується в разі необхідності в зимовий період при відсутності рослинної біомаси.

У біоенергетиці України може бути використаний значний енергетичний потенціал біомаси, в тому числі існуючий в сільському господарстві надлишок соломи і стебел сільськогосподарських рослин, що складають біля 20 млн. т, для опалювальних котелень, розташованих в сільській місцевості (споживають біля 2,9 млн. т у. п. за рік), а також для промислових енергетичних установок.

Ефективним шляхом є виробництво і використання біогазу при переробці рослинної і тваринної біомаси.

Іншим джерелом біомаси є звалища сміття. Потенціальні можливості отримання біогазу зі звалищ можуть складати 1,6 млн. т у. п. Сировиною, з якої можна отримати біогаз, можуть бути практично всі відходи, до складу яких входять органічні компоненти.

### 3.9 Геотермальна енергія

*Поняття геотермальної енергії Землі.* Геотермальна енергія (від грецьк: Geo – земля; thermu – тепло) або термальна енергія - це теплова енергія, яка міститься в надрах земної кулі.

Геотермальна енергія – це тепло Землі, яке переважно утворюється внаслідок розпаду радіоактивних речовин у земній корі та мантії. Наша планета має розжарене ядро, яке є джерелом величезних запасів теплової енергії. Ядро Землі передає тепло до поверхні безпосередньо через жерла вулканів чи у вигляді гарячої води та пари. Із заглибленням у Землю зростає температура (у середньому на 30 °С на 1 км, а у вулканічних районах – значно вище). Температура земної кори углиб підвищується на 2,5-3 °С через кожні 100 м (так званий геотермальний градієнт). Геотермальний градієнт, а саме, різниця температур між ядром планети і її поверхнею вказує на існування безперервного потоку термальною енергії у формі тепла від ядра Землі до її поверхні.

Так, на глибині 20 км вона складає близько 500 °С, на глибині 50 км – порядку 700...800 °С, а в ядрі Землі - близько 5000 °С. У певних місцях, особливо по краях тектонічних плит материків, а також у так званих “гарячих точках”, температурний градієнт вище майже в 10 разів, і тоді на глибині 500-1000 метрів температура порід сягає 300 °С.

Однак і там, де температура земних порід не така висока, геотермальних енергоресурсів цілком достатньо.

За сучасними оцінками, геотермальна енергія, акумульована у перших 10 км земної кори, досягає 137 трлн. т умовного палива, що у 10 разів перевищує геологічні ресурси усіх видів палива, разом узятих. Теоретично лише 1 % цього тепла достатньо для забезпечення всього людства на найближчі 4000 років.

На сьогодні це друге за важливістю та обсягом використання поновлюване джерело енергії.

### *Джерела і типи геотермальної енергії, її переваги і недоліки.*

Поверхня Землі складається з 12 окремих тектонічних плит, величезних платформ земної кори, які постійно дуже повільно рухаються.

*Джерела геотермальної енергії* можливо виявити в трьох основних зонах – там, де стикаються дві тектонічні плити, при цьому одна з них рухається під другою:

- субдукційна зона (наприклад, Японські острови та Анди в Південній Америці);
- зони, де магма виходить на нижній горизонт ґрунту чи просто на поверхню (Каліфорнійська затока, рифові долини в Африці, Середньо-атлантичний хребет);
- "гарячі точки", в яких магма постійно витискається на поверхню Землі (Гавайські острови).

Геотермальний резервуар є насправді масою породи, що розтріскалася в земній корі й насичена гарячою водою чи паром, при цьому перший тип є найбільш поширеним. Щоб доставити воду чи пару на поверхню, в резервуарі бурять свердловини. Розміри резервуарів - від кількох тисяч кубічних метрів до кількох кубічних кілометрів. Якщо вода достатньо гаряча, вона підіймається на поверхню природним шляхом, при більш низькій температурі може знадобитися насос.

Розрізняють чотири *основні типи геотермальної енергії*:

- 1) нормальне поверхнєве тепло землі, яке використовується геотермальними тепловими насосами;
- 2) гідротермальні системи, тобто резервуари пари, гарячої чи теплої води біля самої поверхні землі (нині для вироблення електроенергії використовуються саме ці ресурси);
- 3) глибока коркова теплота, яка утримується під поверхнею землі, але може не мати води;
- 4) енергія магми, теплота, що накопичена під вулканами та кальдерами; іноді магма частково буває в розплавленому стані.

З усіх видів геотермальної енергії найкращі економічні показники мають гідрогеотермальні ресурси - термальні води, пароводяні суміші і природна пара.

Гідрогеотермальні ресурси, які практично використовуються на сьогодні, становлять лише 1 % від загального теплового запасу надр. Досвід показав, що перспективними варто вважати ті регіони, де зростання температури з глибиною відбувається досить інтенсивно, колекторські властивості гірських порід дозволяють одержувати з тріщин значні кількості нагрітої води чи пари, а мінеральний склад термальних вод не створює додаткових труднощів (наприклад, боротьба з відкладеннями солей і корозія устаткування).

*Переваги:* геотермальну енергію отримують від джерел тепла з великими температурами, вона має декілька особливостей: температура теплоносія значно менша за температуру при спалюванні палива і найкращий спосіб використання геотермальної енергії – комбінований (виробництво електроенергії та обігрів).

*Недоліки:* низька термодинамічна якість; необхідність використання тепла біля місця видобування; вартість спорудження свердловин виростає зі збільшенням глибини.

Це джерело енергії характеризується різноплановим впливом на природне середовище. Так в атмосферу надходить додаткова кількість розчинених підземних водних сполук сірки, бору, миш'яку, аміаку, ртуті; викидається водяна пара, збільшуючи вологість; супроводжується акустичним ефектом; опускання земної поверхні; засолення земель.

***Застосування геотермальної енергії.*** Перші дані про використання гарячих джерел датовані I-II сторіччями нашої ери, коли у Стародавній Греції для лікування людей почали використовувати геотермальну бальнеотерапію. У II сторіччі н.е. у Римі почався розвиток термолазень, після чого відповідні купальні з'явилися у середньоморських країнах, Туреччині, Угорщині та Великій Британії.

У XV столітті вперше в Ісландії було спроектовано обладнання, завдяки якому теплу воду із джерел подавали до прибудинкового басейну.

У 1872 році на території США було відкрито перший у світі національний парк гейзерів та гарячих джерел.

Електричну енергію вперше було отримано з використанням геотермального резервуару сухої пари в 1904 році італійцем П. Джинсші Конті. Перший резервуар гарячої води, використаний для виробництва електричної енергії, був створений у Новій Зеландії в 50-ті роки. Перша комерційна геотермальна електростанція в США почала виробляти енергію в 1960 році.

В 1995 році потужність усіх геотермальних електростанцій світу становила 6000 МВт і 11300 МВт – теплових станцій для прямого використання тепла (1 МВт достатньо для забезпечення побутових потреб 1000 жителів).

Геотермальна енергія сьогодні використовується для теплопостачання (виробничі технологічні процеси харчової та обробної промисловості, опалення тощо) та вироблення електроенергії.

Найбільше геотермальної електроенергії виробляє Каліфорнія: 1200 МВт у Долині гейзерів та ін. ГеоТЕС побудовані і в інших країнах світу – в Японії, Філіппінах, Новій Зеландії.

Використання тепла геотермальних вод – найпростіший і найдоступніший спосіб споживання геотермальної енергії. Для цього необхідно тільки пустити по трубах геотермальні води прийнятної для споживачів температури. Обігрівання геотермальними водами широко застосовується в усьому світі для опалення лікарень і шкіл, житлових і виробничих приміщень, теплиць та підігріву води в басейнах, а в Сибіру застосовується для розтоплювання замерзлого ґрунту тощо. Оскільки геотермальна вода легко доступна, її використання буде зростати швидкими темпами.

Експлуатація геотермальних джерел базується на попередньому геологічному дослідженні, щоб уникнути значного фінансового ризику за умови подальших капітальних витрат.

Отже, для того, щоб визначити, чи має певна місцевість потенціал постачання геотермальної теплоти для промислових та побутових потреб, потрібен попередній пошук, що є ризикованим, але необхідним. Ця особливість є однією з головних відмінностей геотермальної енергії від інших поновлюваних джерел енергії.

***Геотермальні електростанції.*** Є два види геотермальних станцій: перші для генерування струму використовують пару, другі – перегріті геотермальні води. У перших суха пара зі свердловини надходить у турбіну або генератор для вироблення електроенергії. Вони простіші в проектуванні й експлуатації, ніж ті, що працюють на воді, оскільки тут не потрібне переміщення великих об'ємів води. Саме на такій станції вперше було отримано електроенергію. На станціях іншого типу використовуються геотермальні води температурою понад 190 °С. Вода природним чином підіймається вгору свердловиною, подається в сепаратор, де внаслідок зменшення тиску частина її кипить і перетворюється на пару. Пара спрямовується в генератор або турбіну і виробляє електрику. Це найбільш поширений тип геотермальної електростанції.

Принципову схему геотермальної електростанції з паровою турбіною наведено на рисунку 3.63, при цьому використовується резервуар сухої пари, яка зі свердловин подається в турбіну для вироблення електроенергії.

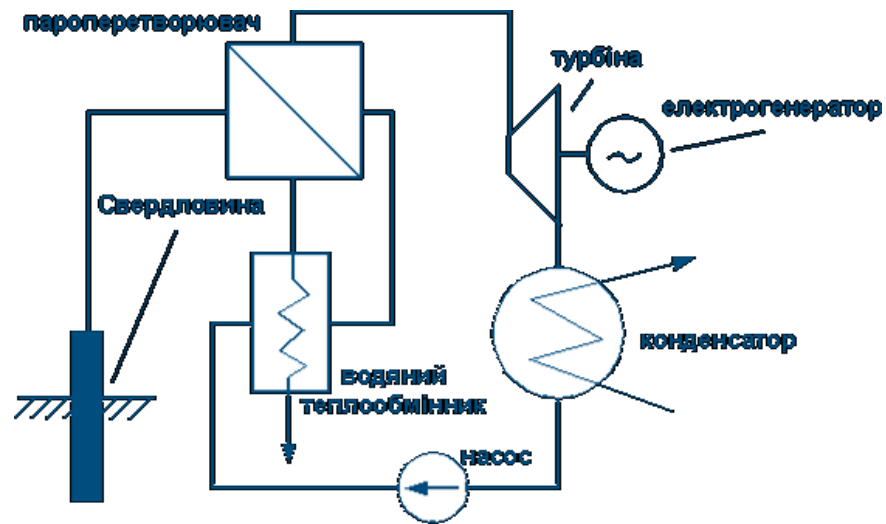


Рис. 3.63 Принципова схема геотермальної електростанції

На станціях іншого типу використовуються геотермальні води з температурою, вищою за  $190^{\circ}\text{C}$ . Вода, яка природним чином підіймається вгору по свердловині, подається в сепаратор, де частина її кипить та перетворюється на пару. Пара використовується для одержання електроенергії.

Електростанція з бінарним циклом ґрунтується на двох замкнених циклах – один для геотермальної води, другий – для робочої рідини чи газу з низькою температурою кипіння (наприклад, ізобутан).

Робоча рідина, нагріта геотермальною водою, перетворюється на пару, яка надходить у теплообмінник та використовується для обертання турбіни. Оскільки обидва контури замкнені, немає практично ніяких викидів, що робить систему екологічно чистою. Робоча рідина випаровується при більш низькій температурі, ніж вода, тому бінарні станції працюють при значно нижчих температурах, ніж інші типи геотермальних станцій ( $100\text{-}190^{\circ}\text{C}$ ). А оскільки джерела геотермальної води з температурою нижчою за  $190^{\circ}\text{C}$  найбільш поширені, то в майбутньому цей тип станцій матиме перевагу.

Геотермальні води, які використовуються для тепlopостачання, можна умовно поділити на 3 групи:

1) води, які можуть безпосередньо використовуватися споживачами і підігріватися без будь-яких негативних наслідків, тобто води найбільш вигідної якості;

2) води, які можуть безпосередньо використовуватися споживачами для опалення, але не можуть підлягати підігріву через їхні агресивні властивості;

3) води підвищеної мінералізації та агресивності, які неможливо використовувати безпосередньо.

Схема системи геотермального теплопостачання, розроблена Інститутом механічної теплофізики НАН України, подана на рисунку 3.64 і має такі показники:

теплова потужність модуля, МВт - 5;

зокрема теплопостачання, МВт - 3;

гаряче водопостачання, МВт - 2;

температура на виході свердловини, °С - 60-80;

температура води в опалювальній системі, °С - 55-75;

температура води гарячого водопостачання, °С - 50;

тиск води свердловини, МПа, не менше як - 1,5;

габаритні розміри будівлі, м.



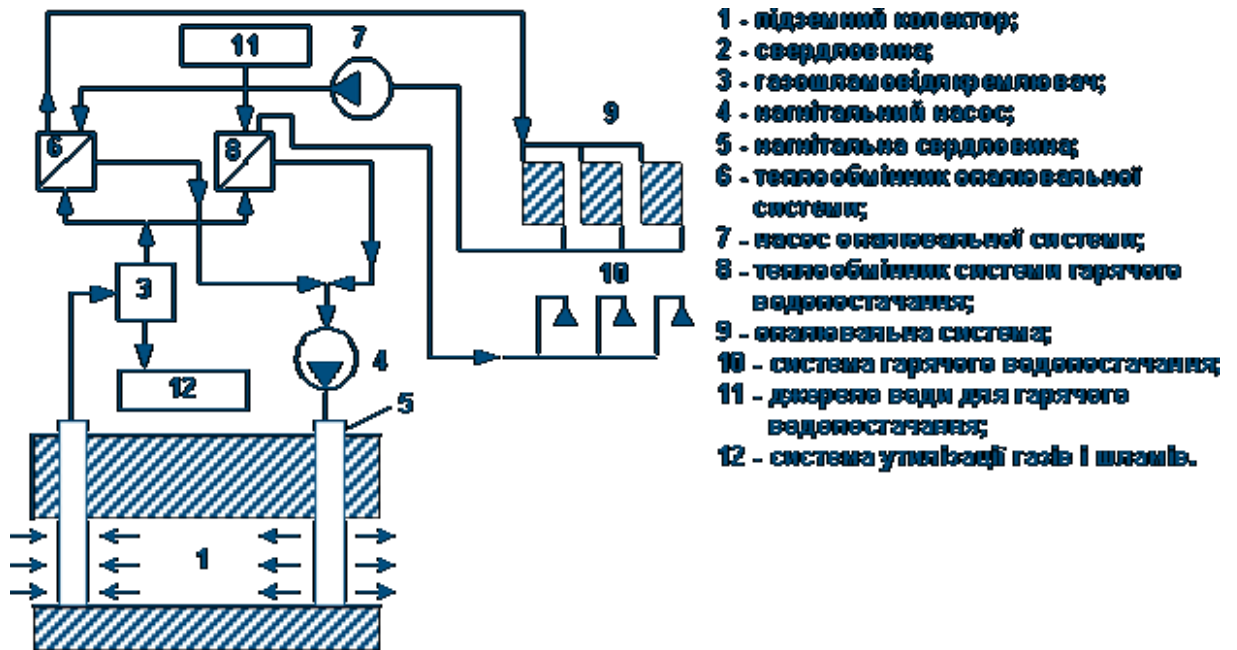


Рис. 3.64 Схема системи геотермального постачання

**Геотермальні теплові насоси.** Середня температура Землі на глибині 3-5 м впродовж року становить 10-13 °С і вище. Цим можна скористатися для опалення й охолодження будинків, виробничих приміщень, тваринницьких ферм за допомогою теплообмінників і тепло насосних установок, що дає змогу заощаджувати до 50-70% теплоти, яка використовується для створення оптимального температурного режиму в приміщеннях.

Для цього в землі за певною схемою прокладають канали для руху повітря або заривають труби, у які подається вода (чи інший теплоносіє). Незалежно від того, що циркулює в такій системі, за рахунок теплообміну з землею такий тепловий насос може поглинати тепло землі й передавати його в будинок у холодну пору року або переміщувати тепло з будинку в землю в спекотну пору.

Така система вентиляції була вперше змонтована 1977 р. у США для створення мікроклімату в свинарнику площею 7,2x15 м. Для цього біля свинарника на глибині 3 м. прорили 12 каналів довжиною 30 м. За рахунок постійної циркуляції повітря в системі температура в приміщенні навіть

узимку при  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  трималася на рівні  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а влітку при  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$  та сама система охолоджувала повітря в приміщенні до  $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В деяких випадках використання теплової геотермальної помпи дозволяє економити до  $2/3$  енергії, що використовується для опалення.

Робочою речовиною служить кипляча при низькій температурі рідина – холодоагент.

Енергоносії, які постачають теплову енергію з низькою температурою для здійснення теплопомпового циклу, називаються джерелами теплоти. Вони віддають теплову енергію шляхом теплопередачі, конвекції і (або) випромінювання. Енергоносії, які сприймають у теплопомповому циклі теплову енергію підвищеного потенціалу, називаються приймачами теплоти. Вони сприймають теплову енергію шляхом теплопередачі, конвекції і (або) випромінювання. Енергоносій, який служить джерелом теплоти, надходить у випаровувач, де випаровується рідкий холодоагент. Теплота випаровування, необхідна для цього, відбирається від джерела теплоти, так як випаровування холодоагенту проходить при низькій температурі

У круговому циклі пари холодоагенту всмоктуються компресором і стискаються до високого тиску. При стискуванні їх температура підвищується, що створює можливість віддачі теплової енергії теплоприймачу.

Пари холодоагента при підвищенні тиску надходять у конденсор, через який протікає енергоносій, що служить приймачем теплоти. Його температура нижча температури пари холодоагенту при підвищеному тиску. При конденсації пари виділяється теплова енергія, яка сприймається теплоприймачем. Із конденсора рідкий холодоагент через регулюючий вентиль (дросельний клапан) надходить знову у випаровувач, і круговий цикл замикається. У регулюючому вентилі високий тиск, при якому надходить холодоагент із конденсора, знижується до тиску в випаровувачі. Одночасно знижується його температура.

Таким чином, за допомогою теплової помпи можлива передача теплової енергії від джерела теплоти з низькою температурою до приймача з високою температурою при підводі зовні механічної енергії для привода компресора (приводна енергія).

Геотермальна енергія, акумульована на глибині до 400 м, може використовуватися не тільки як джерело енергії в системах поверхневого опалення та гарячого водопостачання, але також і в якості джерел енергії в системах поверхневого охолодження, що дозволяє значною мірою знизити рівень експлуатаційних витрат.

Термальна енергія може бути використана в усіх типах будівель, починаючи з односімейних будинків і закінчуючи офісами та промисловими будівлями великої площі. При експлуатації системи, що використовує термальну енергію, виробничі витрати зводяться практично до нуля, і така система має тривалий термін експлуатації. Хоча обсяг інвестиційних витрат на систему з використанням термальної енергії дещо більше, ніж на традиційні бойлери та охолоджувальні установки, завдяки низькому рівню експлуатаційних витрат амортизаційний період в першому випадку буде коротшим.

Термальна енергія в якості джерела енергії, при використанні у поєднанні з системами генерації променевої енергії, є комплексним рішенням у разі спільного використання систем опалення та охолодження. Такі системи є більш ефективними і більш простими при монтажу в порівнянні з монтуванням і використанням двох окремих систем для опалення та охолодження. До того ж системи генерації променевої енергії мають перевагу, що полягає в можливості знизити робочу температуру для опалення та високу робочу температуру для охолодження.

Таким чином, тепловий насос може експлуатуватися більш ефективно (з більш високим коефіцієнтом використання), що дозволяє знизити рівень споживання енергії і, отже, експлуатаційні витрати.

Чому використання геотермальної енергії є екологічно привабливішим? Вона поновлювана та екологічно безпечна, керована та універсальна. Їй притаманна висока ефективність. Вона економічно-раціональна у використанні.

Наразі розроблені для практичного використання різні типи ґрунтового теплообмінника: горизонтальний колектор, вертикальний колектор, енергетичні кошики, енергетична свая, пасивне охолодження.

Це теплообмінники, які встановлюються в горизонтальній площині у верхньому шарі ґрунту на глибині до двох метрів. Дана система являє собою окремі контури труб або паралельні трубні реєстри, які, як правило, встановлюються поряд із будівлею.

**Розвиток альтернативного виду енергії в світовій практиці.** Група експертів із Всесвітньої асоціації з питань геотермальної енергії, яка здійснила оцінку запасів низько- і високотемпературної геотермальної енергії кожного з континентів, отримала такі дані про потенціал різних типів геотермальних джерел нашої планети (Табл. ).

Таблиця 3.65 Потенціал геотермальних джерел планети

Найменування континенту	Тип геотермального джерела		
	високотемпературний, що використовується для електроенергії, ТДж/год		низькотемпературний, що використовується у вигляді теплоти, ТДж/год (нижня межа)
	традиційні технології	традиційні і бінарні технології	
Європа	1830	3700	>370
Азія	2970	5900	>320
Африка	1220	2400	>240
Північна	1330	2700	>120

Америка			
Південна Америка	2800	5600	>240
Океанія	1050	2100	>110
Світовий потенціал	11200	22400	>1400

Як видно з таблиці, потенціал геотермальних джерел енергії просто таки колосальний. Проте використовується він дуже мало: потужність встановлених геотЕС в усьому світі на початку 90-х років становила лише близько 5000, а на початок 2000-х років – близько 6000 МВт, істотно поступаючись за цим показником більшості електростанцій, що працюють на інших поновлюваних джерелах енергії.

Однак на цей час геотермальна електроенергетика розвивається прискорено, не в останню чергу через збільшення вартості нафти. Її активному розвитку сприяє реалізація урядових програм, розроблених у багатьох країнах світу, що підтримують цей напрям розвитку геотермальної енергетики.

Зазначимо, що геотермальні ресурси розвідані в 80 країнах і в 58 їх активно використовують. Найбільшим виробником геотермальної електроенергії є США, де геотермальна електроенергетика серед альтернативних джерел енергії має особливу урядову підтримку.

Наприклад, у 2005 році на ГеоТЕС було вироблено близько 16 млрд. кВт·год електроенергії у таких основних промислових зонах як зона Великих гейзерів, розташована у 100 км північніше Сан-Франциско (1360 МВт встановленої потужності), північній частині Солоного моря в центральній Каліфорнії (570 МВт встановленої потужності), Неваді (235 МВт встановленої потужності) та інших.

Геотермальну енергію давно і широко застосовують Ісландія, США, Нова Зеландія, Франція, Угорщина і багато інших країн. У м. Рейк'явік

(Ісландія) потужність геотермальної опалювальної системи складає 350 МВт і обслуговує понад 100 тис. жителів. В Угорщині площа геотермальних теплиць складає 1,5 млн. м<sup>2</sup>. На ці та інші потреби кожного року використовується 30 млн. Гкал геотермальної енергії. Одна із найпотужніших у світі геотермальних електростанцій (1400 МВт) знаходиться у районі Гейзерс (США).

В Австрії експлуатується геотермальна система, яка складається з двох повітрозабірних вертикальних повітропроводів та 20 підземних пластмасових повітропроводів довжиною 35 м та діаметром 200 мм кожний. Максимальна подача повітря – 10 000 м<sup>3</sup>/г. Протягом року температура у тваринницьких приміщеннях підтримувалася на рівні +15-21°C. Такі геотермальні системи окуповуються за 3-5 років.

Характеризуючи розвиток світової геотермальної електроенергетики як невід'ємну складову частину поновлюваної енергетики на більш віддалену перспективу, відзначимо, що відповідно до прогнозних розрахунків, із 2030 року очікується деяке зниження частки відновлювальних джерел енергії в загальносвітовому обсязі виробництва енергії.

***Геотермальні ресурси України.*** Геотермальні ресурси України – це передусім термальні води і тепло нагрітих сухих гірських порід. Крім цього, до перспективних для використання в промислових масштабах можна віднести ресурси нагрітих підземних вод, які виводяться з нафтою та газом діючими свердловинами нафтогазових родовищ.

Досить перспективним напрямком енергозберігаючої технологічної політики, що дозволяє забезпечити значну економію традиційного палива, є використання геотермальної енергії для опалення, водопостачання і кондиціонування повітря в житлових та громадських будівлях і спорудах у містах і сільській місцевості, а також технологічне використання глибинного тепла Землі в різних галузях промисловості та сільського господарства.

Одним із перспективних напрямів розвитку геотермальної енергетики є створення комбінованих енерготехнологічних вузлів для отримання

електроенергії, теплоти та цінних компонентів, що містяться в геотермальних теплоносіях.

Геотермальні установки потребують зовсім невеликих ділянок землі, набагато менших, ніж необхідні під енергетичні установки інших типів. Вони можуть розміщуватися практично на будь-яких землях, включаючи сільськогосподарські угіддя.

В Україні найбільш перспективним для розвитку геотермальної енергетики регіоном є Закарпаття, де, за геологічними та геофізичними даними, на глибинах до 6 км температури гірських порід сягають 230- 275 °С. Так, на території області в районі с. Залуже унікальне місце площею 30 км де на глибині 4 тис.м середня температура сухих порід +200 °С. Цих запасів вистачає для роботи невеликих геотермальних електричних станцій і тепличних агропромислових комплексів.

Значні ресурси геотермальної енергії має Крим, для якого найбільш перспективними є Тарханкутський і Керченський півострови, де перепад температур менший і на глибині 3,5 - 4 км температура гірських порід сягає 160-180 °С.

Виходячи з наявних оцінок запасів геотермальної енергії, пріоритетними районами для будівництва є Керченський півострів, Закарпаття, Прикарпаття (Львівська обл.), Донецька, Запорізька, Луганська, Полтавська, Харківська, Херсонська, Чернігівська та інші області.

Значні масштаби розвитку геотермальної енергетики в майбутньому можливі лише в разі одержання теплової енергії безпосередньо з гірських порід. У цьому випадку в місцях, де знайдено сухі гарячі скельні породи, бурять паралельні свердловини, між якими утворюють систему тріщин. Тобто фактично формується штучний геотермальний резервуар, в який подається холодна вода з наступним отриманням пари або пароводяної суміші.

Затверджені Міністерством екології та природних ресурсів України потенційні геотермальні ресурси становлять 27,3 млн. м<sup>3</sup>/ добу

теплоенергетичних вод, а їх теплоенергетичний потенціал з урахуванням особливостей термальних вод, як теплоносія – 84 млн. Гкал/рік. Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал геотермальної енергії в Україні є еквівалентним 12 млн. т. у.п., його використання дозволяє заощадити біля 10 млрд. м<sup>3</sup> природного газу.

*Найперспективнішим для видобутку високопотенційних енергоресурсів є Карпатський геотермічний район, який характеризується високим геотермічним градієнтом і відповідно високими температурами гірських порід порівняно з іншими регіонами України. Температура порід в свердловинах, пробурених у Карпатах, на глибині 4 км. сягає 210°C. Необхідні температури теплоносія для геотермальних електростанцій знаходяться на значно менших глибинах (на 1 – 1,5 км.), ніж у інших сприятливих місцях.*

Тут легкодоступними є геотермальні бурові свердловини глибиною від 55 до 1500 м, у яких температура води в гирлі свердловини складає 40-60°C, а при глибинах до 2000 м температура зростає до 90-100°C. Варто відзначити економічну доцільність використання термальних вод таких родовищ як Берегівське, Косинське, Залезьке, Теремлянське, Велятинське, Велико-Паладське, Велико-Бактянське, Ужгородське. Тепло цих родовищ можна використовувати за допомогою створення підземних циркуляційних систем.

Енергія підземного тепла використовується для теплопостачання спортивного комплексу «Закарпаття» у м.Берегове, теплично-парникового господарства «Присивашся», обігріву будинків емпаторійських курортів. Запаси тепла, зосереджені тільки в районі Закарпатської області, рівноцінні запасам кам'яного вугілля Львівсько-Волинського басейну.

На Закарпатті є унікальне місце площею 30 км: у районі с. Защелочі з ізотермою сухих порід +200°C на глибині 4 тисяч метрів. Цих запасів вистачає для роботи невеличких геотермальних електричних станцій і тепличних агропромислових комплексів. Ще у 70-ті роки Інститутом «Атомтеплоэлектропроект» розроблено техніко-економічне обґрунтування



геотермальної електростанції потужністю до 10 МВт на базі Залузької геотермальної площі з перспективою розширення енергетичних потужностей. Вартість 1 кВт встановленої потужності геотермальної електростанції становить 800-900 доларів США.

При сьогоднішніх цінах на енергоресурси вартість електроенергії, що виробляється на геотермальній електростанції, буде у 1,2-1,5 разів нижча ніж на теплової електростанції такої ж потужності, яка працює на вугіллі. При використанні теплових “відходів” ГеоТЕС для тепlopостачання населених пунктів, агропромислових і промислових споживачів рентабельність станції збільшується удвічі.

У 1999 році почалася експлуатація першої на Закарпатті геотермальної установки для потреб теплoзабезпечення санаторію “Косино” Берегівського району. На території санаторію розташовані 2 двоповерхівки, 6 одноповерхових будинків, тепломережі від котельної, яка працює на твердому паливі. Бурові свердловини глибиною від 900 до 1300 м, пробурені у 1988 році, забезпечують добове видобування в об’ємі 7500 м<sup>3</sup> термальної води температурою +32°C. Для потреб тепlopостачання санаторію застосовується насосний спосіб видобування термальних вод, який забезпечує, за допомогою сучасних пластинчатих теплообмінників, загальну теплову потужність установки 1,2 МВт. Для пікового нагрівання води тепломережі використовують водонагрівальний котел на рідкому паливі. Експлуатація даної енергетичної установки забезпечує економію 143 т у.п. на рік. Для розвитку геотермальної енергетики немає потреб створювати нові підприємства енергетичного машинобудування. Обладнання для геотермальних установок і систем можуть виробляти заводи, які ми уже маємо.

*Також перспективним районом для розвитку геотермальної енергетики є Дніпрово-Донецька западина, що включає в себе області: Чернігівську, Полтавську, Харківську, Луганську та інші. Цей регіон одночасно є крупним споживачем теплової та електричної енергії.*

Пріоритетними районами *першочергового освоєння* геотермальних ресурсів є Львівська та Закарпатська області, окремі родовища в Харківській, Полтавській та Донецькій областях.

Залучення до паливно-енергетичного комплексу України розвіданих родовищ геотермальних вод і, в першу чергу, існуючих на цих родовищах свердловин, дасть можливість створити геотермальні теплогенеруючі установки сумарною тепловою потужністю 200 МВт (з них 140 МВт на основі існуючих свердловин). До 2030 року цілком реально є створення енергогенеруючих геотермальних установок сумарною тепловою потужністю 2160 МВт, електричною 400 МВт.

Теплові помпові установки можуть бути альтернативою теплопостачання житлово-комунального господарства і промислових об'єктів, які являють собою енергозберігаюче екологічно чисте технологічне обладнання, застосування якого дозволяє не тільки забезпечити економію органічного палива, але й суттєво знизити забруднення оточуючого середовища.

В Україні визначено *шість пріоритетних напрямків розвитку геотермальної енергетики*:

- створення геотермальних станцій для теплопостачання міст, населених пунктів і промислових об'єктів;
- створення геотермальних електростанцій;
- створення систем теплопостачання з підземними акумуляторами теплоти;
- створення сушильних установок;
- створення холодильних установок;
- створення схем геотермального теплопостачання теплиць.

Науково-дослідницькі роботи з геотермальної енергетики виконуються відповідно до Державної науково-технічної програми “Екологічно чиста Україна”. Виходячи з технічних можливостей геотермальних ТЕС та

обмежень з екологічних та економічних причин, розвиток геотермальної енергетики вважається *оптимальним за такими напрямками:*

- створення достатньо великих геотермальних ТЕС на базі високотемпературних геотермальних родовищ з температурою більше 150°C та одиничною потужністю блоків 10-50 МВт;
- розвиток мережі малих геотермальних ТЕС з одиничною потужністю 50-5000 кВт;
- створення комбінованих електростанцій з використанням як тепла термальних вод, так і тепла, отриманого унаслідок спалювання органічних видів палива;
- створення комбінованих електротехнічних вузлів для отримання електроенергії, тепла й цінних компонентів, які містяться в геотермальних теплоносіях.

Вступивши до Європейського енергетичного співтовариства, Україна зробила свій вибір на користь відновлюваних джерел енергії як економічно вигідних та екологічно чистих. Кожна країна обирає свій шлях енергонезалежності: це вже не просто доцільно, а необхідно. І залежно від природних факторів обирається той вид відновлюваних джерел енергії, який є найбільш ефективним для даної території. Найбільш привабливими для інвесторів в Україні стали вітрова, сонячна та біо-енергетика – залежно від регіону.

## РОЗДІЛ IV ТЕПЛОВІ МАШИНИ ТА УСТАНОВКИ

### 4.1 Котельні установки

*Загальні відомості.* Високі темпи промислового виробництва і соціального прогресу вимагають різкого збільшення вироблення теплової енергії на базі потужного розвитку паливно – енергетичного комплексу країни. Централізовані системи теплопостачання від теплових електричних станцій (ТЕС) найбільш ефективні. В даний час централізоване теплопостачання великих міст здійснюється на базі потужних атомних станцій теплопостачання. Для невеликих теплоспоживачів джерелом теплоти служать промислові та опалювальні котельні. Питома вага їх в балансі теплопостачання становить більшу частину.

Незважаючи на будівництво великих теплових електростанцій, з кожним роком збільшується випуск і поліпшуються конструкції котлоагрегатів малої та середньої потужності, підвищується надійність і економічність котельного обладнання, знижується металоємність на одиницю потужності, скорочуються терміни і витрати на виробництво будівельно-монтажних робіт. В якості палива для котельних установок використовують вугілля, торф, сланці, деревні відходи, газ та мазут. Газ і мазут – ефективні джерела теплової енергії. При їх застосуванні спрощуються конструкція і компоновка котельних установок, підвищується їх економічність, скорочуються витрати на експлуатацію. Практичне використання паросилових установок дало нове джерело енергії і відіграло велику роль у розвитку промислового виробництва.

Ряд теоретичних і експериментальних робіт з дослідження робочих процесів котельних установок був проведений в кінці XVIII і початку XIX ст. вченими В.В.Петровим і Я.Д.Захаровим.

В теплопостачанні великих міст, районних центрів, селищ, котельні відіграють найважливішу роль. Міська мережа теплопостачання зазвичай розділена на райони споживання по числу ТЕЦ. В системі теплопостачання

подача тепла в житлові квартали і промисловим підприємствам здійснюється від районних теплових станцій – великих котелень з водогрійними котлами.

**Елементи котельних установок.** Котельна установка являє собою комплекс пристроїв, розміщених у спеціальних приміщеннях служать для перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію пари або гарячої води. Кожна котельна установка складається з окремих елементів – пристроїв. Одні пристрої є основними і без них котельня функціонувати не може, інші – можна назвати додатковими і без них установка буде працювати, але з великою витратою палива, а отже, з меншим коефіцієнтом корисної дії; треті – механізми і пристрої, що виконують допоміжні функції.

До основних елементів котельні відносяться:

- *Котли*, що заповнюються водою і обігріваються теплом від спалювання палива. Котел – це теплообмінний пристрій, в якому теплота від гарячих продуктів згоряння палива передається воді. У результаті цього в парових котлах вода перетворюється в пару, а у водогрійних котлах нагрівається до необхідної температури.
- *Топки* в яких спалюють паливо і отримують нагріті до високих температур димові газу. Топковий пристрій служить для спалювання палива і перетворення його хімічної енергії в теплоту нагрітих газів. Живильні пристрої ( насоси, інжектори) призначені для подачі води в котел.
- *Газоходи*, по яких переміщаються димові газу і, стикаючись зі стінками котла, віддають останньому свою теплоту.
- *Димові труби*, за допомогою яких димові газу переміщаються по газоходам, а потім після охолодження виходять в атмосферу.

Без перерахованих елементів не може працювати навіть найпростіша котельна установка.

До допоміжних елементів котельної відносять:

- Пристрої паливовіддачі і пило приготування.

- *Золоутворювач*, який застосовується при спалюванні твердих видів палива та призначені для очищення димових газів і поліпшення стану атмосферного повітря біля котельні.
- *Дуттьові вентилятори*, необхідні для подачі повітря в топку котлів.
- *Димососи* – вентилятори, що сприяють посиленню тяги і тим самим зменшують розміри димової труби;
- *Живильні пристрої* (насоси), необхідні для подачі води в котли.
- *Пристрої з очищення живильної води*, що запобігають накипоутворенню в котлах і їх корозію;
- *Водяний економайзер* служить для підігріву живильної води до її надходження в котел;
- *Повітропідігрівник* призначений для підігріву повітря перед його надходженням у топку гарячими газами, що виходять з котлоагрегату.
- *Прилади теплового контролю* і засоби автоматизації, що забезпечують нормальну і безперебійну роботу всіх ланок котельні. Крім того, в котельнях, що працюють на рідкому паливі, є мазутне господарство, а при спалюванні газу – газорегулюючі станції.

Технологічна схема котельної установки показано на рисунку 4.1

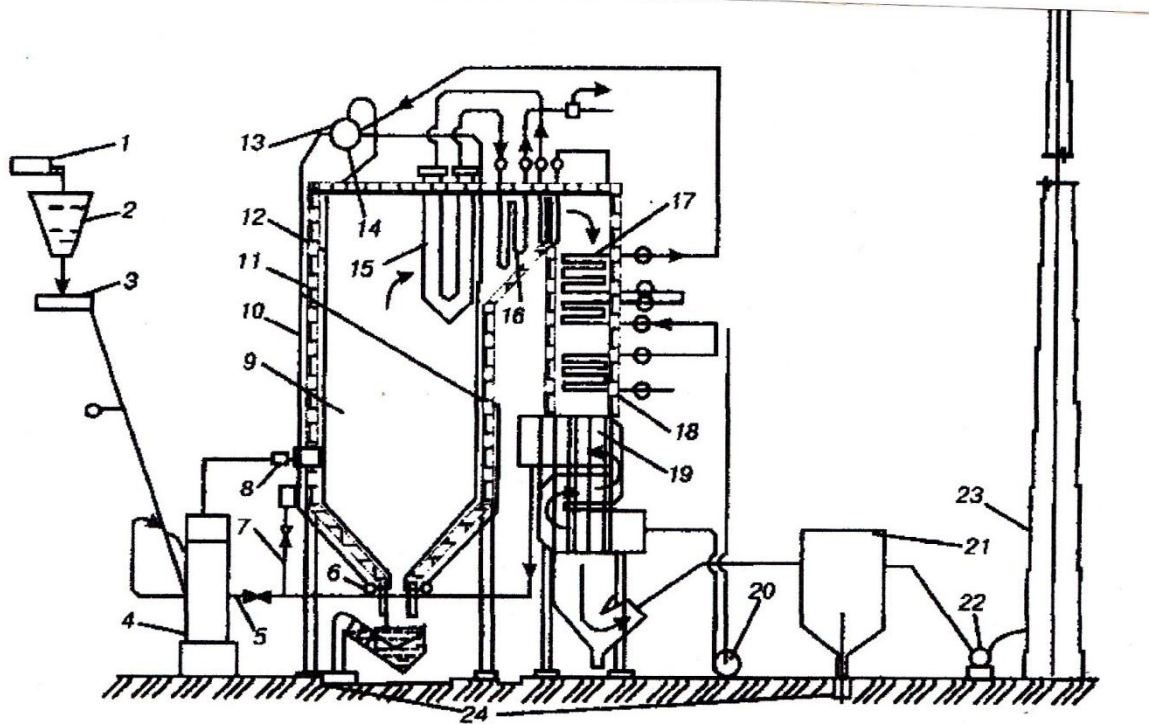


Рис. 4.1 технологічна схема котельної установки: 1 – конвеєр; 2 – бункер; 3 – живильник; 4 – млин; 5 – короб первинного повітря; 6 – нижній розподільний колектор; 7 – короб вторинного повітря; 8 – пальники; 9 – топка; 10 – опускні труби; 11 – обмуровка котла; 12 – підйоми труби; 13 – 14 – барабан; 15 – ширмові перегрівники; 16 – конвективний перегрівник; 17 – другий ступінь економайзера; 18 – перший ступінь економайзера; 19 – повітропідігрівник; 20 – вентилятор; 21 – газоочистка; 22 – димосос; 23 – димова труба; 24 – виведення золи т шлаку

Допоміжні системи і пристрої котельних установок містять: систему транспорту і паливопідготовки, систему водопідготовки і водного режиму, систему золовловлювання й очищення димових газів, систему тягодуттьових пристроїв, насоси живильної води, димову трубу.

Котельну установку також обладнують різними регульовальними запірними і захисними пристроями, а також системою автоматичного регулювання, що підвищує економічність і надійність її роботи. Потреба в тих або інших допоміжних пристроях і їх елементах залежить від призначення котельної установки, виду палива і способу його спалювання.

**Системи пилоприготування** у процесі спалювання вугілля складаються з пристроїв подрібнення і сушіння палива, його дозування,

транспортування і нагромадження. Середовище, що використовується для сушіння палива, називають сушильним агентом. Як сушильний агент палива можна використовувати гаряче повітря, гарячі продукти згорання, водяну пару або їх суміші. Газоподібне середовище з випареною вологою після процесу сушіння вугілля називають відпрацьованим сушильним агентом.

За типом зв'язку розмелювальних пристроїв з котлами розрізняють два види систем пилоприготування: центральні та індивідуальні.

У *центральних системах пилоприготування* сушіння і розмел вугілля винесено за межі котельних цехів. Іноді сушіння виконують на сушильному заводі.

В *індивідуальних системах пилоприготування* пристрої для розмелу і сушіння вугілля знаходяться в котельному цеху і пов'язані з роботою котла як у часі, так і за сушильним агентом (повітря або продукти згорання, що забирають з котла). Індивідуальні системи пилоприготування найбільше поширені. Їх поділяють на системи з прямим вдювом пилу і з проміжними бункерами готового пилу. У системах прямого вдюву вугільний пил після сушіння подається до пальників топкової камери. У системах з проміжними бункерами пил після відділення від сушильного агента нагромаджується в бункерах. Вибір типу млинів визначається типом твердого палива. На котел установлюють не менше двох млинів. Розмелювальні пристрої розрізняються за принципом подрібнення і швидкістю руху подрібнювальних органів.

*Молоткові млини* широко використовують для підготовки до спалювання кам'яного вугілля зі значним виходом летких речовин ( $Y_{\text{п}}^{\text{г}} > 30\%$ ), бурого вугілля, сланців і фрезерного торфу. Вони належать до швидкохідних млинів, мають частоту обертання 9,8... 16,5 с<sup>-1</sup>. Млини вентилятори також належать до швидкохідного типу млинів (частота обертання 9,8...24,5 с<sup>-1</sup>).

*Шарові барабанні млини* встановлюють у системах пилоприготування для абразивного вугілля з низькою розмельністю, а також щоб одержати тонке мливо (антрацити, напівантрацити, деяке кам'яне і буре вугілля). Вони



мають знижену чутливість до наявності металу, є універсальними і можуть працювати на будь-якому паливі. Їх відносять до тихохідного типу млинів (частота обертання 0,25... 0,4 с<sup>-1</sup>).

**Системи водопідготовки і водяного режиму котельної установки** забезпечують хімічну підготовку живильної води і відновлення втрат конденсату за рахунок відповідної обробки природної води, що містить певну кількість шкідливих для роботи котла домішок (розчинених солей і газів і не розчинених завислих речовин).

Найшкідливішими є *жорсткі солі* (різні сполуки кальцію і магнію, розчинність яких у воді незначна) і *корозійноактивні гази* (кисень і вуглекислий газ). Жорсткі солі, що відкладаються на поверхнях нагріву, створюють щільний шар накипу. Речовини, що кристалізуються в об'ємі води, утворюють завислі в ній частинки у вигляді шламу. Теплопровідність накипу (0,1...0,2 Вт/мК) в багато разів менша від теплопровідності металу, тому через накип малої товщини різко погіршується теплопередача від газів до води і підвищується температура стінок труб. Це, у свою чергу, знижує економічність котла в результаті підвищення температури димових газів і зменшує термін служби металевих стінок поверхонь нагріву. Щоб запобігти відкладенню накипу, природну воду попередньо спеціально обробляють: освітлюють - видаляють механічні домішки відстоюванням і фільтруванням; пом'якшують - видаляють накипоутворювачі і деаерують - видаляють розчинені у воді гази.

У процесі пароутворення концентрація солей води, що знаходиться в об'ємі котла, збільшується. Для підтримки її на сталому рівні, що виключає випадання солей з розчину, застосовують безупинну або періодичну продувку, під час якої з барабана котла виводиться деяка частина води з великою концентрацією солей. Для котлів малої потужності використовують лише внутрішньокотлову обробку води, коли в живильну воду добавляють хімічні речовини - антинакипіни, що вступають в реакцію з солями і сприяють випаданню їх в вигляді шламу, який видаляють продувкою.

Щоб зменшити винесення солей з парою і небажане відкладення їх в трубах пароперегрівника і проточної частини турбіни, застосовують сепарацію пари в спеціальних пристроях барабана котла, що забезпечують відділення крапель води від пари.

**Система очищення газів** існує у зв'язку з тим, що в продуктах згоряння палива містяться шкідливі для навколишнього середовища токсичні складові: летка зола, оксиди сірки  $SO_2$  і  $SO_3$  і азоту  $NO$  і  $NO_2$ .

Під час роботи котельної установки на твердому паливі обов'язково треба застосовувати зололовлювачі. За принципом дії зололовлювачі поділяють на механічні сухі і мокрі й електростатичні. Механічні сухі зололовлювачі циклонного типу відокремлюють тверді частинки від газу за рахунок відцентрових сил під час обертального руху потоку. Ступінь вловлювання золи в них 75-80 % при гідравлічному опорі 0,5...0,7 кПа.

Механічні мокрі зололовлювачі являють собою вертикальні циклони з водяною плівкою, що стікає по стінках. Ступінь вловлювання золи в них дещо вищий, ніж в механічних, і перевищує 80-90 %. Електрофільтри забезпечують високий ступінь очистки газів (95-99 %) при гідравлічному опорі 150...200 Па без зниження температури і зволоження димових газів.

**Газоповітряні допоміжні пристрої (вентилятори, димососи)** подають повітря на горіння в топку котла й евакуюють продукти згоряння.

Тяга може бути природною і штучною. *Природна тяга* виникає в димарі внаслідок різниці густини атмосферного повітря і гарячих газів в димарі.

В установках з великим гідравлічним опором газового тракту, коли димар не забезпечує природної тяги, застосовують *штучну тягу*, установлюючи димососи за котлом (після зололовлювача). Розрідження, створюване димососом, визначається гідравлічним опором газового тракту і потребою підтримувати розрідження в топці на рівні 20...30 Па. В невеликих котельних установках розрідження, створюване димососом, становить 1...2 кПа, а в потужних - 2,5...3 кПа.

Для подачі повітря в топку і подолання гідравлічного опору повітряного тракту (повітроводів, повітропідігрівника, шару палива або пальників) перед повітропідігрівником встановлюють вентилятори. Опір повітряного тракту котла малої потужності становить 1... 1,5 кПа, великої - 2...2,5 кПа.

**Система автоматичного регулювання котельних установок** забезпечує зміну навантаження установки, зберігаючи задані параметри (тиск і температура пари) і максимального ККД установки. Крім того, ця система підвищує безпеку, надійність і економічність роботи котла, скорочує кількість обслуговуючого персоналу і полегшує умови його роботи.

Автоматичне регулювання котла включає регулювання подачі води, температури перегрітої пари і процесу горіння. Живлення котла можна регулювати, щоб забезпечити відповідність між витратами води, що подається в котел, і виробленої пари, що характеризується сталістю рівня води в барабані.

У котельних установках, які працюють на пилоподібному паливі, можна також регулювати роботу системи пилоприготування регулятором завантаження млинів, що забезпечують сталість завантаження кульових барабанних млинів, і регулятором температури пилоповітряної суміші за млином. Система керування котла має забезпечувати його роботу із заданими оптимальними техніко-економічними показниками. Вирішення цього завдання визначається досконалістю комплексу устаткування котельної установки, а також кваліфікацією і досвідом персоналу.

**Класифікація котельних установок.** Котельні установки в залежності від типу споживача поділяються на енергетичні, виробничо – опалювальні й опалювальні. За видом вироблення теплоносія вони поділяться на парові (для вироблення пари) і водогрійні (для вироблення гарячої води). Енергетичні котельні установки виробляють пару для парових турбін на теплових електростанціях. Такі котельні обладнують, як правило, котлоагрегатами великої і середньої потужності, які виробляють пару підвищених параметрів.

Виробничо – опалювальні котельні установки ( зазвичай парові ) виробляють пару не тільки для виробничих потреб, але і для опалення, вентиляції і гарячого водопостачання. Опалювальні котельні установки ( в основному водогрійні, але вони можуть бути і паровими ) призначені для обслуговування систем опалення, гарячого водопостачання та вентиляції виробничих та житлових приміщень. У залежності від масштабу тепlopостачання опалювальні котельні поділяються на місцеві ( індивідуальні ), групові та районні.

Місцеві опалювальні нагрівом котельні об'єднують водонагрівними котлами з води до температури не більше  $115^{\circ}$  або отримання пари з низьким робочим тиском 70 кПа. Такі котельні призначені для постачання тепла до одного або декількох будівель. Групові опалювальні котельні забезпечують теплотою групи будівель, житлові квартали або мікрорайони. Такі котельні обладнають як паровими, так і водонагрівними котлами, як правило, більшою теплопродуктивністю, ніж котли для місцевих котелень. Ці котельні зазвичай розміщують у спеціальних будівлях.

Районні опалювальні котельні призначені для тепlopостачання великих житлових масивів; їх обладнують порівняно потужними водонагрівними і паровими котлами.

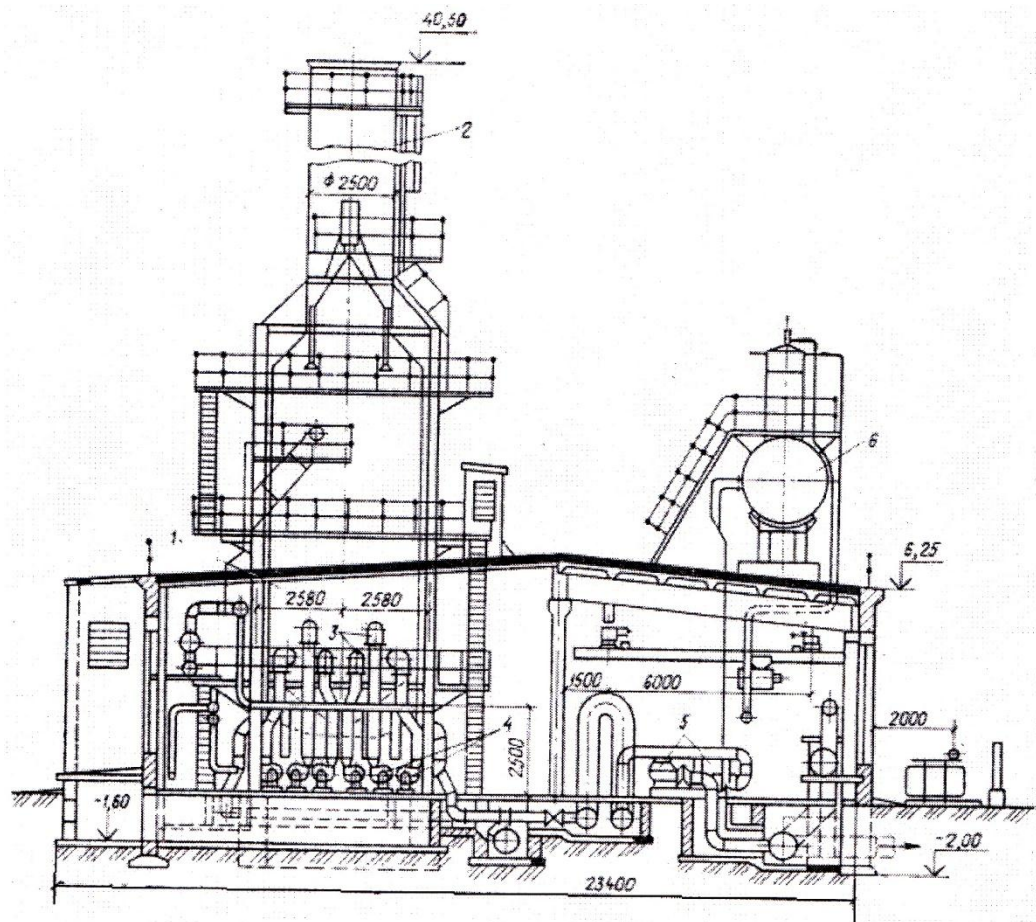


Рис. 4.2 Схема районної опалювальної котельної установки.

На рисунку 4.2 наведена схема районної опалювальної котельні з водогрійними котлами 1 типу ПТВМ – 50 теплопродуктивністю 58МВт. Котли можуть працювати на рідкому і газоподібному паливі, тому вони обладнані пальниками і форсунками 3. Повітря, необхідне для горіння, подається в топку дуттьовими вентиляторами 4, що приводяться в дію електродвигунами. На кожному котлі встановлено 12 пальників і стільки ж вентиляторів.

Вода в котел подається насосами 5, які приводяться в дію електродвигуном. Пройшовши через поверхню нагріву, вода нагрівається і надходить до споживачів, де віддає частину тепла, із зниженою температурою, знову повертається в котел.

Димові гази з котла виходять в атмосферу через трубу 2. Ця котельня має компонування напіввідкритого типу: нижня частина котлів (приблизно до висоти 6 м) розташована в будівлі, а верхня на відкритому повітрі.

Всередині котельні розміщують дуттьові вентилятори, насоси, а також щит управління. На перекритті котельні встановлюють деаератор 6 для видалення кисню із води.

У котельних установках з паровими котлами (Рис.4.3) паровий котел 4 має два барабани – верхній і нижній. Барабани з'єднані між собою трьома пучками труб, що утворюють поверхню нагріву котла. При роботі котла нижній барабан заповнений водою, верхній – в нижній частині водою, а у верхній частині насиченою водяною парою. У нижній частині котла розташована топка 2 з механічною колосниковою решіткою для спалювання твердого палива. При спалюванні рідкого і газоподібного палива замість решітки встановлюють форсунки або пальники, через які паливо разом з повітрям подається в топку.

Котел оточений цегляними стінами – обмурований. Робочий процес в котельні протікає таким чином. Паливо з паливного складу транспортером подається у бункер, звідки воно поступає на колосникові решітки топки, де і згорає. У результаті згоряння палива утворюються димові гази – горять продукти згоряння. Димові гази з топки поступають в газоходи котла, утворені обмурівкою і спеціальними перегородками, встановленими в пучках труб. При русі гази омивають пучки труб котла пароперегрівача 3, проходять через економайзер 5 і повітронагрівач, де вони охолоджуються внаслідок віддачі тепла воді, яке надходить в котел, і повітрю, що подається в топку. Охолоджені димові гази за допомогою димососа 8 видаляються через димар 7 в атмосферу. Димові гази котла можуть відводитися і без димососа під дією природної тяги, яка створюється димовою трубою.

Вода з джерела водопостачання до живильного трубопроводу насосом 1 подається у водяній економайзер, звідки після нагріву поступає у верхній барабан котла. Заповнення барабана котла водою контролюється складним водовказівним пристроєм, встановленим на барабані.

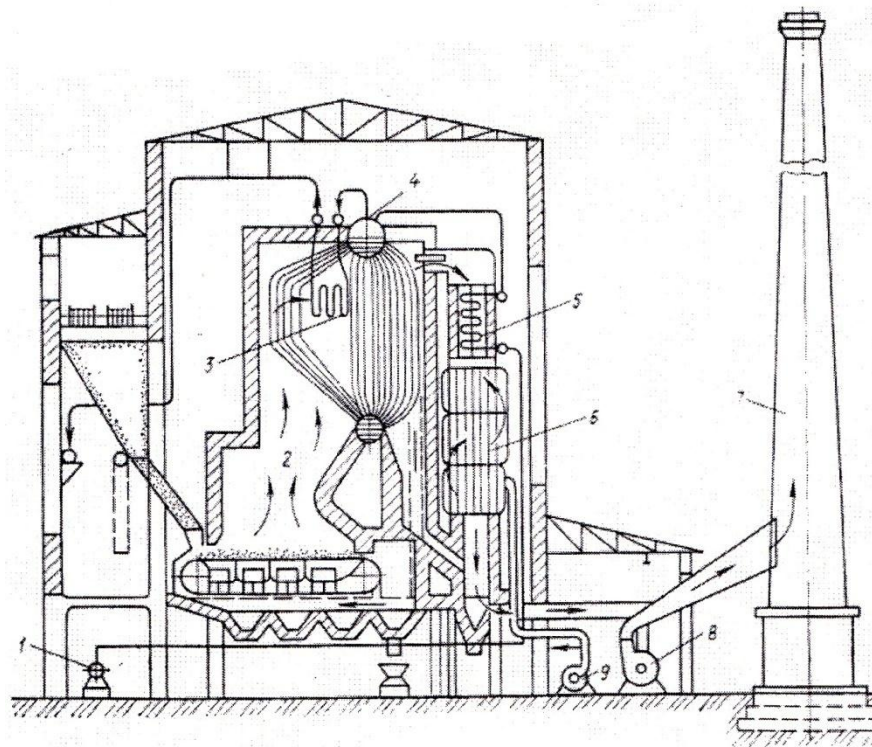


Рис. 4.3Схема парової котельної установки.

З середнього барабана котла вода по трубах опускається в нижній барабан, звідки по лівому пучку труб вона знову піднімається у верхній барабан. При цьому вода випаровується, а пара, що утворюється, збирається у верхній частині верхнього барабана. Потім пара надходить у пароперегрівач 3, де теплом димових газів вона повністю підсушується, в результаті чого її температура підвищується. З пароперегрівача пара надходить в головний паропровід і звідти до споживача, а після використання назад в котельню. Втрати конденсату у споживача поновлюються водою з водопроводу або інших джерел водопостачання. Перед подачею в котел воду піддають відповідній обробці. Повітря, необхідне для горіння палива, постачається, як правило, з верху приміщення котельні і подається вентилятором 9 в повітропідігрівник, де воно підігрівається і потім подається в топку. У котельнях невеликої потужності повітропідігрівачі зазвичай відсутні, і холодне повітря в топку подається або вентилятором, або за рахунок розрідження в топці, яке створюється димарем.



Котельня установка з паровими котлами має компонування закритого типу, коли все основне обладнання котельної розміщене в будівлі. Котельні установки обладнюються водопідготовчими пристроями (на схемі не показані), контрольно – вимірювальними приладами і відповідними засобами автоматизації, що забезпечує їх безперервну і надійну експлуатацію.

Водонагрівальні котельні установки призначені для отримання гарячої води, що використовується для опалення, гарячого водопостачання та інших цілей.

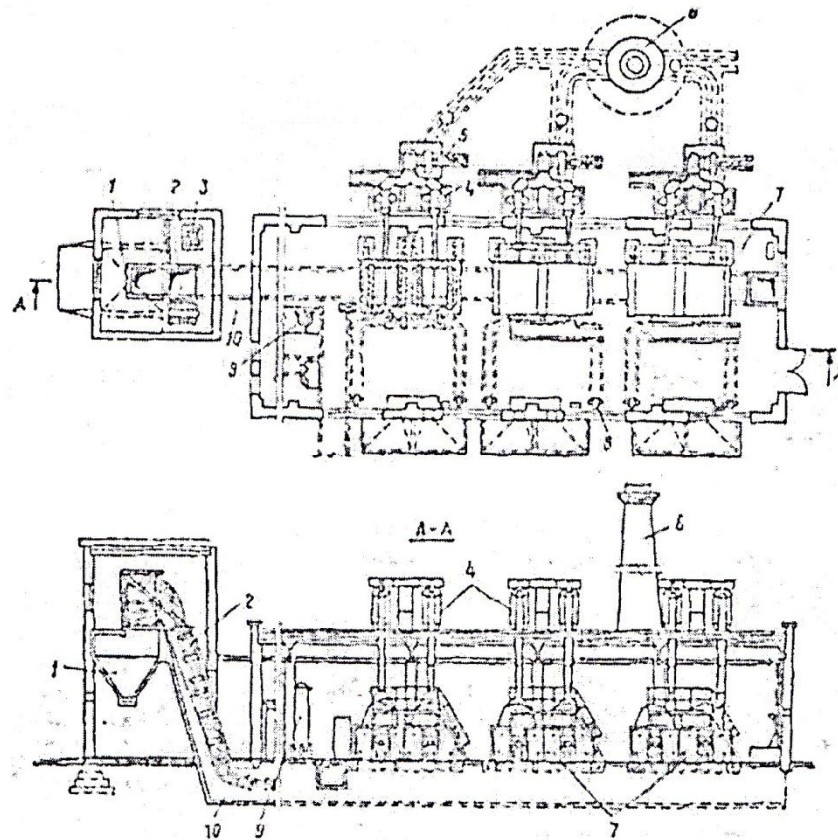


Рис. 4.4 Котельня з чавунними водонагрівальними котлами: 1 – бункер для збору золи та шлаку; 2 – лебідка приводу скрепера; 4 – золоуловлювач Циклонного типу; 5 – димосос; 6 – цегляна димова труба; 7 – котел; 8 – дутьовий вентилятор; 9 – установка хімічної чистки води (фільтр); 10 – скреперний канал для видалення шлаку і золи;

Водонагрівальна котельня має один теплоносій – воду на відміну від парової котельні, у якої два теплоносії – вода і пара. У зв'язку з цим в паровій котельні необхідно мати окремі трубопроводи для пари і води, а також бака для збору конденсату. Водонагрівні і парові котельні різняться в



залежності від виду використовуваного палива, конструкції котлів, топок і тд. До складу як парової, так і водонагрівної котельної установки зазвичай входять кілька котлоагрегатів, але не менше двох і не більше чотирьох – п'яти. Всі вони зв'язуються між собою загальними комунікаціями – трубопроводами, газопроводами та ін. Дедалі більшого поширення набувають установки, що працюють на ядерному паливі, основною сировиною в яких є уранова руда.

**Принципові схеми котельні.** Окремі елементи принципової схеми котельної установки прийнято умовно позначати у вигляді прямокутників, кіл, кружків з'єднувати їх між собою лініями (суцільними, пунктирними), що позначають трубопровід, паропровід і тд. У принципових схемах парових та водонагрівних котельних установках є істотні відмінності.

Парова котельна установка (Рис. 4.5, а) складається з двох парових котлів 1, обладнаних індивідуальними водяними 4 і повітряними 5 економайзерами, включає груповий золоуловлювач 11, до якого димові гази підходять по збірному колектору 12. Для відсмоктування димових газів на ділянці між золоуловлювачем 11 і димовою трубою 9 встановлені димососи 7 з електродвигунами 8. Для роботи котельні без димососів встановлені шибери (заслонки) 10.

Пара котлів з окремих паропроводів 19 надходить у загальний паропровід 18 і по ньому подається до споживача 17. Віддавши теплоту, пара конденсується і по конденсатопроводу 16, повертається в котельню в збірний конденсаційний бак 14. Через трубопровід 15 в конденсаційний бак подається додаткова вода з водогону або хімводоочистки. У випадку, коли частина конденсату втрачається у споживача, з конденсаційного бака суміш конденсату і додаткової води подається насосами 13 по живильному трубопроводу 2 спочатку в економайзер 4, а потім в котел 1.

Повітря, необхідне для горіння, засмоктується відцентровими дуттєвими вентиляторами 6 частково з приміщення котельні, частково ззовні

і по повітропроводам 3 подається спочатку до повітряпідігрівачів 5, а потім до топків котлів.

Водонагрівальна котельна установка (Рис. 4.5, б) складається з двох водогрійних котлів 1, одного групового водяного економайзера 5, який обслуговує обидва котли. Димові гази після виходу з економайзера по загальному збірному колектору 3 надходять безпосередньо в димову трубу 4. Вода, нагріта в котлах, надходить у загальний трубопровід 8, звідки подається до споживача 7. Віддавши теплоту, охолоджена вода по зворотному трубопроводу 2 направляється спочатку в економайзер 5, а потім знову в котли. Вода по замкненому контуру (котел, споживач, економайзер, котел) переміщується за допомогою циркуляційних насосів 6.

Водонагрівальна котельна установка, як і парова, може бути обладнана димососами і економайзерами. Принципова відмінність парової від водогійної установки полягає в тому, що в першому ми маємо два види теплоносіїв – пару, яка переміщується за рахунок своєї пружності, і конденсат, який переміщується за рахунок ухилу трубопроводу, а в другому маємо один теплоносій – воду, яка переміщується за рахунок насосів або природної циркуляції.

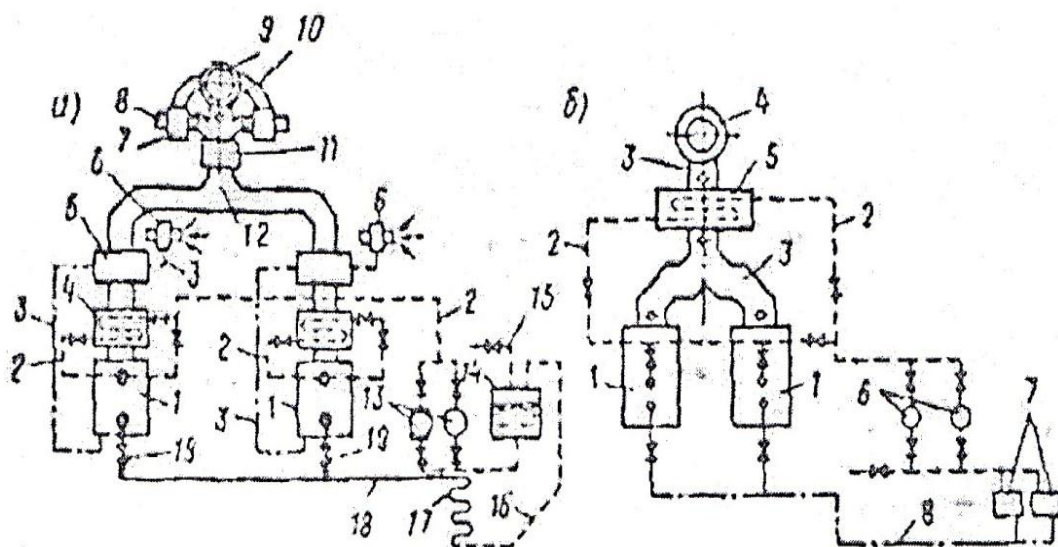


Рис.4.5 Будова та принцип роботи котлів

Паровий або водонагрівний котел є пристроєм у вигляді металевої посудини, яка обігривається продуктами згоряння палива і служить для отримання гарячої води або пари. Основним елементом котла є поверхня нагріву – поверхня металевих стінок, які з одного боку обтікає гарячими газами, а з іншого водою. У сучасних котлах поверхня нагріву виготовляється у вигляді труб, приєднаних до барабанів і колекторів. В залежності від місця розташування поверхня нагріву котла ділиться на радіаційну та конвективну. Радіаційна поверхня нагріву сприймає теплоту від газів головним чином внаслідок їх променевипромінювання. Велика частина цієї поверхні, розташована в топці, називається екраном.

В залежності від місця розташування екрани поділяються на бічні (труби розміщені на бічних стінках топки), і фронтальні (труби знаходяться на передній стінці) і тд.

Конвективна поверхня нагріву сприймає теплоту від газів при зіткненні (конвекції) з ними. Вона розташована в газоходах котла, де передача теплоти випромінюванням хоча і спостерігається, але не є головною і за величиною значно менша передачі теплоти конвекцією. Таким чином, повна площа поверхні нагріву котла,  $H_k$  м<sup>2</sup>, дорівнює:

$$H_k = H_p + H_{конв},$$

де  $H_p$  і  $H_{конв}$  – площі радіаційної та конвективної поверхні нагрівання котла. Площа поверхні нагріву котла визначається збоку, що омивається газами.

При роботі парового котла нижня частина його об'єму завжди заповнена водою, а верхня частина – парою. Об'єм котла, зайнятий водою, називається водяним простором або водяним об'ємом. Та частина об'єму котла, яка при роботі заповнена паром, називається паровим простором. Від водяного, об'єму котла залежить стійкість його роботи, тому що вода в котлі виконує роль акумулятора теплоти: запасє теплоту в період зменшення навантаження і віддає її під час збільшення витрати пари. Тому у котлах з великим водяним об'ємом майже не змінюється тиск навіть при значних

коливаннях витрати пари. Паровий простір необхідний для збору і висушування пари, що утворюється в котлі. Чим більший паровий простір котла, тим сприятливіші умови для видалення вологи з пари – висушування. Наявність вологи в парі негативно впливає на роботу більшості апаратів, що використовують пару. Для видалення вологи з пари в котлі передбачають сепаруючі пристрої.

У процесі роботи котла паровий і водяний простір змінюються в залежності від рівня води в котлі. Найнижчий рівень води приймається з умови безпечної роботи котла. Верхній рівень води в котлі не повинен перевищувати рівень води при якому можливе різке збільшення вологості утвореної пари або викид котлової води в паропровід. Проміжок між нижнім і вищим рівнями води (в залежності від розмірів котла) у середньому складає 50 – 100 мм. Об'єм води між зазначеними рівнями називається живлячим, який в процесі роботи котла заповнюється по черговою водою і паром. На цих рівнях встановлюють водовказівні стекла і пароводопробивні крани, за допомогою яких можна визначити, чи знаходиться рівень води у котлі в допустимих межах.

Тиск пари в котлі контролюється манометрами, які приєднують за допомогою сифонної зігнутої трубки до парового простору котла. Крім того, на котлі встановлюють запобіжні зворотні клапани, вентилі на живильному і паровому трубопроводах, а також на спускній лінії, що розміщуються в самій нижній частині котла. Ця лінія служить для продувки котла з метою видалення осаду бруду (шламу) і випуску води при ремонті.

Паровий котел малої потужності має два барабани: верхній і нижній, які з'єднані між собою пучком труб, що утворюють конвективну поверхню котла. У передній частині котла розміщена топка для спалювання палива. Бічні стінки покриті трубами – водяними екранами, які створюють радіаційну поверхню котла. Верхні кінці екранних труб завальцьовані у верхньому барабані, а нижні приварені до колекторів.

В результаті спалювання палива в топці утворюється димові гази високої температури. Ці гази проходять по газоходу котла, утвореному перегородками, що омивають пучки труб, по яких рухається (циркулює) вода. В результаті гази віддають частину своєї теплоти і охолоджуються, а вода нагрівається і перетворюється на пару, яка збирається у верхньому барабані котла. Повітря для горіння подається в топку знизу через піддувало (зольник), де частково збираються зола і дрібні шматочки палива, що провалилися через решітки.

Каркас котла – це несуча металева конструкція, яка сприймає вагу котла з урахуванням тимчасових і особливих навантажень і забезпечує необхідне взаємне розташування елементів котла.

Конструкція каркаса залежить від потужності і компоновки котла. Каркас котла (Рис. 4.6) являє собою жорстку просторову рамну конструкцію, що складається з колон, опорних і допоміжних балок. Несучі колони 2 – найбільш відповідальна частина каркасу; вони сприймають основні навантаження і передають їх на фундамент 1. Колони виготовляють з швелерів або двотаврів, зварених між собою за допомогою спеціального прокату. Опорний башмак нижньої частині колони складається з опорної плити, траверс і ребер. Щоб оберегти каркас від нерівномірного нагрівання, його виносять із зони підвищених температур за обмуровку. Однак деякі елементи каркаса, наприклад опорні балки водяного економайзера, не вдається винести із зони підвищених температур. У цьому випадку їх ізолюють або охолоджують повітрям, що проходить всередині елементів каркасу коробочного перетину.

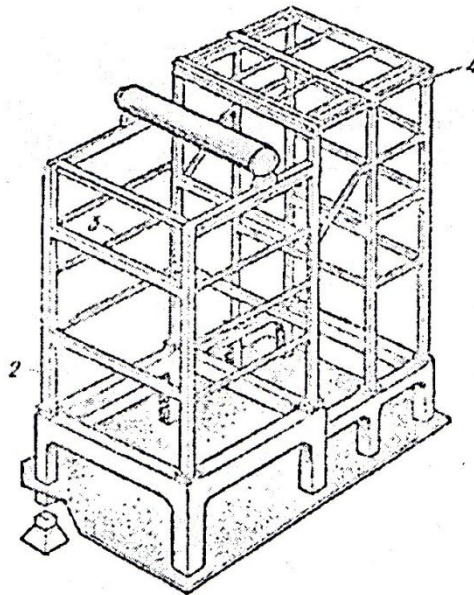


Рис. 4.6 Каркас котла типу БГ: 1 – фундамент; 2 – несуча колона; 3 – зв'язка; 4 – балка.

Обмуровка котла – це система вогнетривких і теплоізоляційних огорож або конструкцій котла, призначених для зменшення теплових втрат і забезпечення газової щільності. Конструкція обмуровки залежить від умов, в яких вона працює. Якщо стіни топкової камери закриті трубами поверхонь нагріву – екрановані, то температура внутрішньої вогневої стінки обмуровки буде значно нижче, ніж у не екранованих котлів, і різниця температур між зовнішньою і внутрішньою стінками обмуровки зменшиться, тобто обмуровка буде працювати в більш сприятливих умовах. У цьому випадку її можна виконати більш легкою і дешевою.

Для котлів малої і середньої потужності застосовують важкі і полегшені обмуровки. Маса одного  $m^3$  важкої обмуровки становить 1600 – 1900 кг, а полегшеної 350 – 1300 кг. Для створення жаростійкого шару в котлах малої та середньої потужності застосовують порівняно дешеві матеріали: шамотна цегла і шамотобетон.

Для теплоізоляційного шару використовують діатомову цеглу, діатомобетон, совелітові і вермикулітові плити, вироби з шлако - скловати азбозуріт та ін. Для полегшених обмуровок застосовують плити, панелі та щити з жаростійких і теплоізоляційних бетонів, набивних мас і обмазок. До

гарнітури котла відносяться пристрої для обслуговування газоходів і топки котла: лази, вічка, затвори шлакових і золових бункерів, газові і повітряні клапани і заслінки, вибухові клапани а також обдувочні апарати.

Лази – призначені для огляду і ремонту поверхонь нагрівання, можуть бути прямокутними, з розмірами не менше 400 ×400 мм, або круглими, діаметром не менше 450 мм. Дверці лазів встановлюють на чавунній рамі, яку закріплюють в обмуровку або на каркасі котла.

Вічка – служать для візуального огляду топки газоходів і зовнішньої сторони котла. За будовою вони не відрізняються від лазів, але мають значно менші розміри.

Затвори шлакових і золових бункерів – використовують для періодичного видалення золи та шлаку з бункерів. Газові і повітряні клапани і заслінки – застосовують для відключення газоходів, а також регулювання тяги і дуття.

Вибухові клапани випускають димові гази при підвищенні тиску в топці або газоході котла, оберігаючи їх від руйнування. Під час роботи котла на його поверхнях нагріву можуть відкладатися шлаки і зола, що погіршує теплопередачу. Очищають поверхні нагрівання від золи та шлаку струменем пари, повітря або за допомогою дробоочисних установок. Не дивлячись на великі розходження в будові у всіх котлах по суті протікають два однакових процеси: горіння палива з утворенням газів високої температури (продуктів згоряння) і передачі теплоти від цих газів воді. У результаті цього в парових котлах вода нагрівається і випаровується, перетворюючись на пару. У водогрійних котлах, на відміну від парових, вода лише нагрівається до необхідної температури і випаровування не відбувається.

Роботу парових котлів характеризують наступні показники: 1 – паропродуктивність (потужність котла).  $D$  – кількість виробленої пари кг., або т., за одну секунду або за одну годину; 2 – паронапряга поверхні нагрівання  $D/H_K$  – кількість пари, кг, одержуваної з одного метра квадратного поверхні нагрівання за одну годину. Ця величина є важливою

характеристикою, що відображає інтенсивність пароутворення в котлі; 3 – параметри одержаного пару – тиск і температура; 4 – ККД котла – відношення кількості теплоти що витрачається на утворення пари (корисна теплота), до всієї витраченої теплоти, що вноситься в топку з паливом. Отже, К.К.Д. характеризує ступінь використання теплоти згоряння палива в котлі.

Робота водогрійних котлів (Рис. 4.7) характеризується теплопродуктивністю (потужністю).  $Q$  – кількістю виробленої теплоти в одиницю часу Вт, а також тепловою напругою поверхні нагріву котла  $Q/N_K$ , температурою нагріву води та ККД. Теплова напруга поверхні нагрівання (або питома теплове навантаження),  $Вт/м^2$ , вироблена кількість теплоти, передана за одиницю часу через  $1 м^2$  поверхні нагрівання. ККД як парового, так і водогрійного котла виражаються у відсотках.

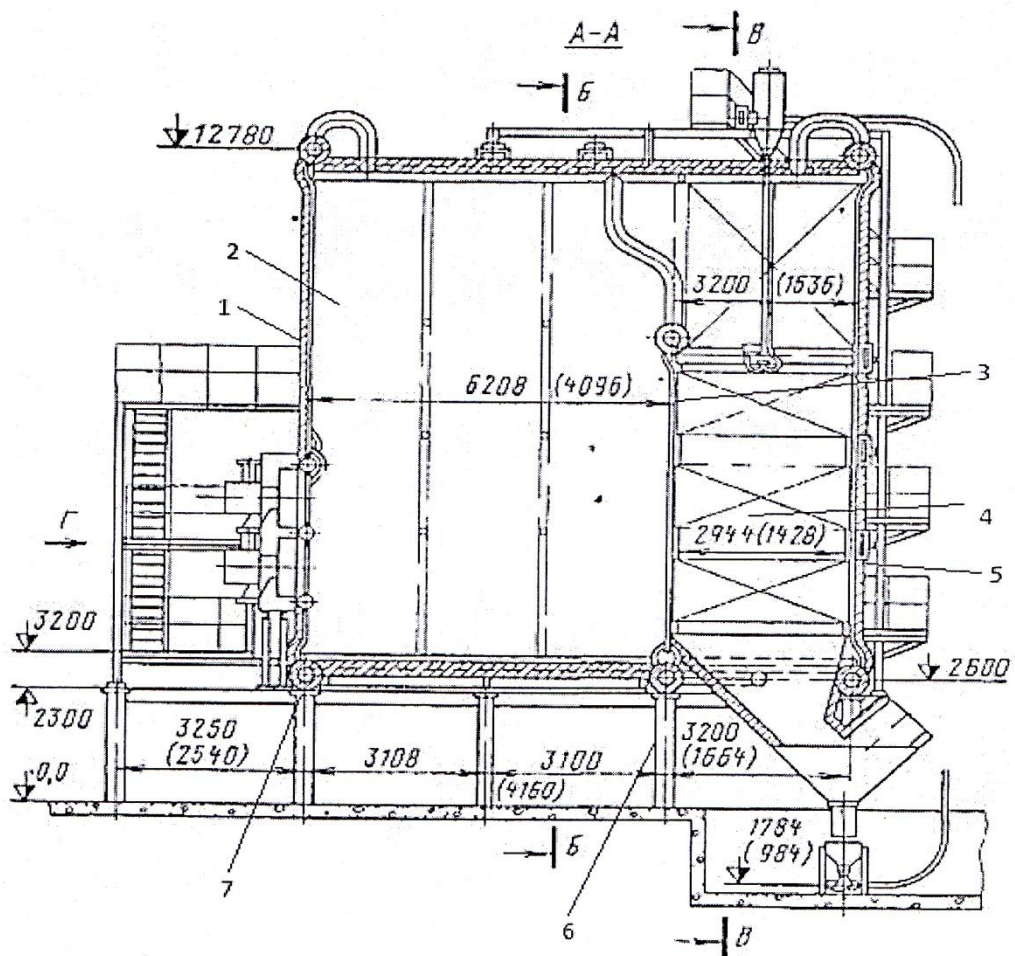


Рис. 4.7 Котел KB – МГ – 100 1 – передній екран; 2 – боковий екран; 3 – проміжний екран; 4 – конвективні пакети; 5 – задній екран; 6 – портал; 7 – камера.



*Котел – утилізатор* – це паровий котел, який не має власної топки і використовує тепло відвідних газів промислової або енергетичної установки. Температура газів, що надходять в котел-утилізатор коливається від 350-400 °С (при установці котла-утилізатора за двигунами внутрішнього згорання) до 900- 1500 °С (за відбивними, рафінувальними і цементними печами). Великі котли - утилізатори мають всі елементи котлоагрегата, за винятком топкових і інших пристроїв, пов'язаних з спалюванням палива. Для малих продуктивностей і низьких тисків застосовуються котли-утилізатори газотрубні або з багаторазовою примусовою циркуляцією, рідше - прямоочні сепараторні і барабанні котли-утилізатори з природною циркуляцією. Водогрійні котли- утилізатори зазвичай називають утилізаційними економайзерами, або підігрівачами. У деяких випадках котли-утилізатори на стільки зрощуються з елементами технологічного обладнання, що не можуть бути виділені як самостійні агрегати (пристрій для випарного охолодження мартенівських печей, хімічних установок тощо). Котли-утилізатори широко застосовуються в хімічній, нафтохімічній, харчовій, текстильній та інших галузях промисловості.

Технічний стан джерел теплопостачання, теплових мереж та інших об'єктів комунальної теплоенергетики на сьогоднішній день не відповідає сучасним вимогам. Необхідна технічна реконструкція та модернізація всієї системи теплопостачання і впровадження нового енергоефективного та екологічно чистого теплоенергетичного обладнання.

Робота котельних установок повинна бути надійною, економічною і безпечною для обслуговуючого персоналу. Для виконання цих вимог котельні установки експлуатуються відповідно до правил будови і безпечної експлуатації парових котлів і робочими інструкціями, складеними на основі правил Держ-нагляду охорони праці з урахуванням місцевих умов і особливостей устаткування. Котел повинен бути обладнаний необхідною кількістю контрольно – вимірювальних приладів, автоматичною системою

регулювання найважливіших параметрів котла, захистними пристроями, блокуванням і сигналізацією. Режим роботи котла повинен відповідати режимній карті, в якій вказуються рекомендовані технологічні та економічні показники його роботи: параметри пари і живильної води, вміст  $CO_2$  в газах, температура і розрідження по газовому тракту, коефіцієнт надлишку повітря і тд.

Більшість сучасних котельних установок повністю автоматизовані. При порушенні нормальної роботи котла в наслідок несправностей, які можуть призвести до аварії, він повинен бути негайно зупинений.

Капітальний ремонт котлів проводиться через кожні 2 – 3 роки. Котел періодично піддається технічному огляду за трьома видами: зовнішній огляд (не рідше одного разу на рік); внутрішній огляд (не рідше одного разу на 4 роки); гідравлічне випробування (не рідше одного разу на 8 років).

## **4.2 Теплові й газові турбіни**

### **Парові турбіни**

*Історія розвитку парових турбін.* Історія науки і техніки знає багато цікавих винаходів, в яких людина прагнула використовувати енергію пари. Деякі з цих винаходів були корисними, інші були просто хитромудрими іграшками, але, принаймні, два винаходи треба назвати великими, вони характеризують цілі епохи в розвитку науки і техніки. Ці великі винаходи – парова машина і парова турбіна. Парова машина, що отримала промислове застосування в другій половині XVIII ст., здійснила переворот в техніці. Вона швидко стала головним двигуном, що застосовують у промисловості і на транспорті. Але в кінці XIX і на початку XX ст., досягнута потужність і швидкохідність парової машини вже стали недостатніми.

Назріла необхідність у будівництві великих електричних станцій, для яких був потрібний потужний і швидкохідний двигун. Таким двигуном стала парова турбіна, яка може бути побудована на величезні потужності при

високому числі обертів. Парова турбіна швидко витіснила парову машину з електричних станцій і великих пароплавів.

Історія створення й удосконалення парової турбіни, як і будь-якого великого винаходу, пов'язана з іменами багатьох людей. Більш того, як зазвичай буває, основний принцип дії турбіни був відомий задовго до того, як рівень науки і техніки дозволив побудувати турбіну.

Принцип дії парової машини полягає у використанні пружних властивостей пари. Пара періодично надходить в циліндр і, розширюючись, здійснює роботу, переміщуючи поршень. Принцип дії парової турбіни інший. Тут пара розширюється, і потенційна енергія, накопичена в котлі, переходить у швидкісну (кінетичну) енергію. У свою чергу кінетична енергія струменя пари перетворюється в механічну енергію обертання колеса турбіни.

Історія розвитку турбіни починається з кулі Герона Олександрійського і колеса Бранка. Можливість використання енергії пари для отримання механічного руху була відзначена відомим грецьким вченим Героном Олександрійським більше 2000 років тому. Він побудував прилад, названий кулею Герона. Куля могла вільно обертатися на двох опорах, виготовлених з трубок. Пара котла надходила в кулю і далі виходила в атмосферу з двох зігнутих під прямим кутом трубок. Куля оберталася під дією реактивної сили, що виникала при виході з трубок струменів пари.

В колесі Бранка струмінь пари, потрапляючи на лопаті колеса, змушував його обертатися.

Модель Герона і колесо Бранка не були двигунами, але вони вже вказували можливі шляхи отримання механічного руху за рахунок енергії пари.

У принципах дії кулі Герона і колеса Бранка є суттєва відмінність. Куля Герона, як вже було сказано, обертається під дією реактивної сили. У турбіні Бранка потенціальна енергія пари спочатку переходить у кінетичну енергію струменя, потім при ударі струменя в лопаті колеса частина кінетичної

енергії пари переходить в механічну енергію обертання колеса. Тут використовується так званий активний принцип.

Конструктивне оформлення парової турбіни і подальший її розвиток намітився в кінці XIX ст., коли в Швеції інженер Густав Лаваль і в Англії Чарльз Парсонс незалежно один від одного почали працювати над створенням і удосконаленням парової турбіни. Досягнуті ними результати дозволили паровій турбіні з часом стати основним типом двигуна для приводу генераторів електричного струму і отримати широке застосування в якості двигуна для цивільних і військових кораблях. У паровій турбіні Лавалю, пара поступає в одне або кілька паралельно включених сопел, набуває в них значну швидкість і направляється на робочі лопатки, розташовані на ободі диска, що закріплений на валу турбіни.

Зусилля, викликані струменем пари на робочих лопатках, обертають диск і пов'язаний з ним вал турбіни. Особливістю цієї турбіни є те, що розширення пари в соплах від початкового до кінцевого тиску відбувається на одному щаблі, що обумовлює дуже високі швидкості потоку пари. Перетворення кінетичної енергії пари в механічну відбувається без подальшого розширення пари, лише внаслідок зміни напрямку потоку в лопаткових каналах.

Турбіни, побудовані за цим принципом, тобто турбіни, в яких весь процес розширення пари і пов'язаного з ним прискорення парового потоку відбувається в нерухомих соплах, отримали назву активних турбін.

При розробці активних одноступінчастих турбін було вирішено низку складних питань, що мало надзвичайно велике значення для подальшого розвитку парових турбін. Були застосовані сопла, які мають великий ступінь розширення пари і дозволяють досягти високих швидкостей парового потоку (1200-1500 м/сек). Для кращого використання великих швидкостей потоку пари Лаваль розробив конструкцію диска різного опору, що забезпечувало роботу з великими коловими швидкостями (350 м/сек). В одноступінчастій активній турбіні були застосовані такі високі числа обертів (до 32 000 об/хв.),

які набагато перевищували числа обертів поширених у той час двигунів. Це спричинило винахід гнучкого валу, частота вільних коливань якого менше частоти збурюючих зусиль при робочому числі обертів.

Незважаючи на ряд нових конструктивних рішень, використаних у одноступінчастих активних турбінах, економічність їх була невисока. Крім того, необхідність застосування редукторної передачі для зниження числа обертів приводного валу до рівня числа обертів робочої машини також гальмувала в той час розвиток одноступінчастих турбін і особливо збільшення їхньої потужності. Тому турбіни Лавалю, отримавши на початку розвитку турбобудування значне поширення в якості агрегатів невеликої потужності (до 500 кВт), надалі поступилися місцем іншим типам турбін.

Парова турбіна, запропонована в 1884 р. Парсонсом, принципово відрізняється від турбіни Лавалю. Розширення пари в ній відбувається не в одній сопловій групі, а в ряді розташованих один за одним ступенів, кожна з яких складається з нерухомих направляючих апаратів (соплових решіток) і лопаток, що обертаються разом з диском.

Напрямні лопатки закріплені на нерухомому корпусі турбіни, а робочі розташовуються рядами на барабані. У кожного ступеня такої турбіни відбувається перепад тиску, що становить лише невелику частку повного перепаду між тиском свіжої пари і тиском пари, що залишає турбіну. Таким чином, стало можливим працювати з невеликими швидкостями парового потоку в кожній ступені і з меншими коловими швидкостями робочих лопаток, ніж в турбіні Лавалю. Крім того, розширення пари в ступенях турбіни Парсонса відбувається не тільки в сопловій, але і в робочій решітці. Тому на робочі лопатки передаються зусилля, викликані не тільки зміною напрямку потоку пари, а й реактивне зусилля.

Ступені турбіни, в яких застосовується розширення пари і пов'язане з ним прискорення парового потоку в каналах робочих лопаток, отримали назву реактивні. Таким чином, така турбіна стала типовим представником багатоступінчастих реактивних парових турбін.

Принцип послідовного включення ступенів, в кожній з яких використовується лише частина наявного теплового перепаду, виявився дуже плідним для подальшого розвитку парових турбін. Він дозволив досягти в турбіні високої економічності при оптимальних числах обертів ротора турбіни, що допускає безпосереднє з'єднання вала турбіни з валом генератора електричного струму. Цей же принцип дав можливість виготовляти турбіни дуже великої потужності, що сягає декількох десятків і навіть сотень тисяч кіловат в одному агрегаті.

Багатоступінчасті реактивні турбіни в даний час знайшли широке застосування, як в стаціонарних установах так і на флоті.

Розвиток активних парових турбін пішов також по шляху послідовного розширення пари не в одній, а в ряді щаблів, розташованих один за одним. У цих турбінах ряд дисків, укріплених на загальному валу, розділений перегородками, що одержали назву діафрагми, в яких розташовані нерухомі соплові решітки. У кожній з побудованих таким чином ступенів відбувається розширення пари. У робочих гратках відбувається лише перетворення кінетичної енергії парового потоку без додаткового розширення пари в каналах робочих лопаток. Активні багатоступінчасті турбіни отримали широке застосування в стаціонарних установах, наприклад у суднобудуванні.

Поряд з турбінами в яких пара рухається в напрямку осі вала турбіни (аксіальні), були створені конструкції радіальних турбін, в яких пара подається перпендикулярно осі турбіни. З останніх найбільш цікавою є радіальна турбіна, запропонована в 1912 р. у Швеції братами Юнгстремами.

Останнім часом розвиток парових турбін йде винятково швидкими темпами. Цей розвиток значною мірою обумовлений таким же швидким розвитком електричних машин і широким використанням електричної енергії в промисловості. Економічність парової турбіни і потужність її в одному агрегаті досягли високих значень. За своєю потужністю турбіни далеко перевершили потужність всіх без винятку інших типів двигунів. Є турбіни

потужністю 500 МВт, з'єднані з генератором електричного струму, причому доведена можливість виготовлення ще більш потужних агрегатів, принаймні до 1 000 МВт.

*Дія робочого тіла у парових та газових турбінах.* Турбомашина (турбіна) є двигуном, в якому теплота робочого тіла – пари або газу – послідовно перетворюється в кінетичну енергію струменя, а потім у механічну роботу.

Потік робочого тіла, що витікає з сопла має значну кінетичну енергію. Він діє на лопатки з силою яка залежить від форми їх поверхні (Рис. 4.8).

Розрахунки показують, що за інших рівних умов, наприклад при заданій швидкості витікання  $c_0$  і витраті робочого тіла  $m$ , з найбільшою силою потік буде впливати на лопатку, форма якої забезпечує його поворот на  $180^\circ$  (Рис. 4.8, б). Якщо дозволити лопаткам переміщатися під дією струменя то рух газу за схемою (Рис. 4.8, б) забезпечить при однаковій в усіх схемах швидкості найбільшу потужність, що дорівнює добутку діючої на лопатку сили на швидкість її переміщення. Звідси, зокрема впливає, що для отримання максимальної роботи потік повинен обтікати її плавно без завихрення.

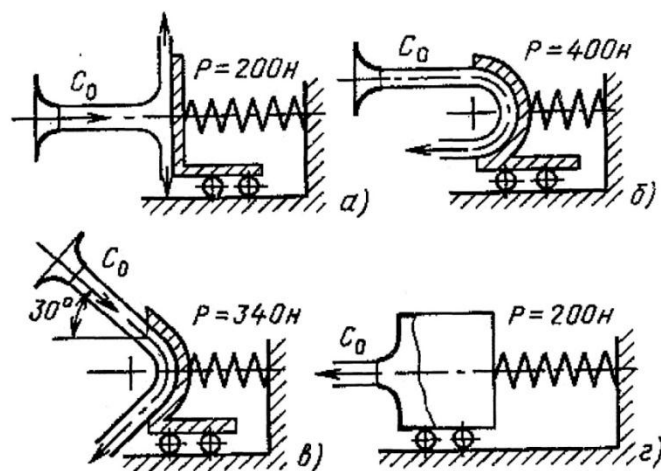


Рис. 4.8 Схема дії струменя газу на поверхні тіл різної форми

Але використовувати найбільш вигідний (з точки зору отримання максимальної потужності) профіль лопаток для теплового двигуна

безперервної дії, наприклад турбомашин, не можливо, так як практично не вдається при обертвовому русі диска з лопатками подавати на них газ у напрямку, що співпадає з площиною обертання. Тому в турбінах струмись газу, що витікає з нерухомого сопла, подається на лопатки, зігнуті під деяким кутом до площини обертання (Рис. 4.8, в), причому з конструктивних міркувань цей кут не вдається зробити менше  $11-16^\circ$  (у ряді випадків його приймають рівним  $20-30^\circ$ ).

Розглянутий принцип дії струменя на поверхні різних форм називається **активним**, на відмінну від реактивного, коли сила створюється за рахунок реакції струменя, що витікає з сопла (Рис. 4.8, г). Реактивна сила, прикладена до циліндра, спрямована відповідно до третього закону Ньютона в сторону, протилежну до витікання газів. З такою ж силою діє струмись на поверхню (активний принцип, Рис. 4.8, а), але при реактивному способі конструкція теплового двигуна виявляється більш раціональною, оскільки суміщуються сопловий і руховий апарати.

*Активні турбіни.* Турбіни, в яких весь теплоперепад перетворюється в кінетичну енергію потоку в соплах, а в каналах між робочими лопатками розширення не відбувається (тиск робочого тіла не змінюється), називаються **активними** або **турбінами рівного тиску**.

У найпростішій активній турбіні робоче тіло надходить в сопло 1 (або групу сопел), розганяється в ньому до високої швидкості і прямує на робочі лопатки 2 (Рис. 4.9 ). Зусилля, викликані поворотом струменя в каналах робочих лопаток (див. Рис. 4.8, в), обертають диск 3 і пов'язаний з ним вал 4. Диск із закріпленими на ньому робочими лопатками і валом називається ротором. Один ряд сопел і один диск з робочими лопатками становлять ступінь.



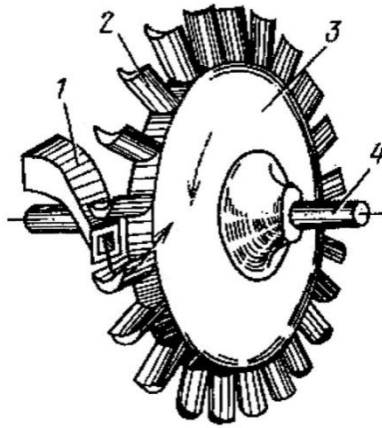


Рис. 4.9 Схема ступеня турбіни

Приріст кінетичної енергії на виході з сопла можна визначити за формулою:

$$c_{1T}^2/2 - c_0^2/2 = h_0 - h_{1T},$$

де  $c_0$ ,  $h_0$  – швидкість і ентальпія потоку перед соплом;  $c_{1T}$ ,  $h_{1T}$  – теоретична швидкість і ентальпія потоку на виході з сопла.

Якщо прийняти, що перед соплами швидкість  $c_0=0$ , отримаємо

$$c_{1T}^2/2 = (h_0 - h_{1T}) = \Delta h_T,$$

де  $\Delta h_T$  – наявний теплоперепад, відповідний швидкості  $c_{1T}$ .

У реальних умовах в результаті тертя і завихрення при течії потоку частина кінетичної енергії спрямованого руху молекул перетворюється в енергію неупорядкованого руху молекул, що підвищує ентальпію робочого тіла за соплом, зменшує наявний теплоперепад та швидкість потоку:

$$c_1 = \varphi_c c_{1T},$$

де  $\varphi_c$  – коефіцієнт швидкості сопла, для соплових апаратів сучасних турбін  $\varphi_c = 0,95 \div 0,98$ .

На лопатках робочого колеса кінетична енергія потоку перетворюється в роботу. При вході на лопатку навколишня складова швидкості потоку співпадає з напрямком руху лопатки, а при виході – протилежна їй (Рис. 4.10). Тому абсолютна швидкість потоку на виході набагато менша, ніж на вході.

Рухомий потік діє на робочі лопатки з силою  $P$ . Проекція цієї сили на вісь машини  $P_z$  (осьова сила) сприймається упорними підшипниками, що запобігають зміщенню ротора уздовж осі, а проекція цієї сили на напрямок колової швидкості  $P_u$  (колова сила) викликає обертання ротора.

Схема одноступінчастої турбіни показана на рисунку 4.10.

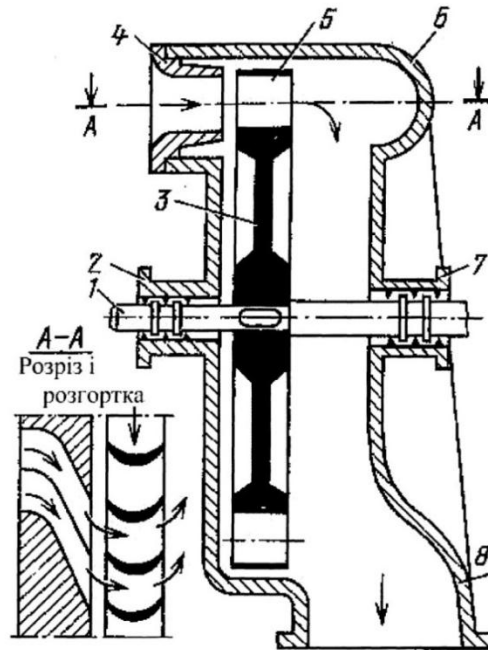


Рис. 4.10 Схема одноступінчастої турбіни Лаваля

Пара надходить в одне або кілька сопел 4, набуває в них значну швидкість і спрямовується на робочі лопатки 5. Відпрацьована пара виходить через вихлопний патрубок 8. Ротор турбіни складається з диска 3, закріплених на ньому лопаток і вала 1, встановленого в корпусі 6. У місці проходу вала через корпус встановлені переднє 2 і заднє 7 лабіринтові ущільнення, що запобігають витoku пари. Оскільки весь наявний теплоперепад зпрацьовується в одному ступені, то швидкості потоку, в соплах виявляються більшими. При розширенні, наприклад, перегрітої пари, що має параметри 1 МПа і 500 °С, до тиску 10 кПа теплоперепад дорівнює близько 980 кДж/кг, що відповідає швидкості потоку 1400 м/с. При таких швидкостях потоку неминучі великі втрати і, найголовніше, неприпустимі за умовами міцності лопаток коллові швидкості в них. Тому одноступінчасті турбіни Лаваля мають обмежену потужність (до 1 МВт) і низький ККД. Всі великі

турбіни роблять багатоступінчастими. На Рис. 4.11 показана схема активної багатоступінчастої турбіни, яка включає кілька послідовно розташованих по ходу пари ступеней, що насаджені на одному валу. Переходи відділені один від одного діафрагмами, в які вбудовані сопла.

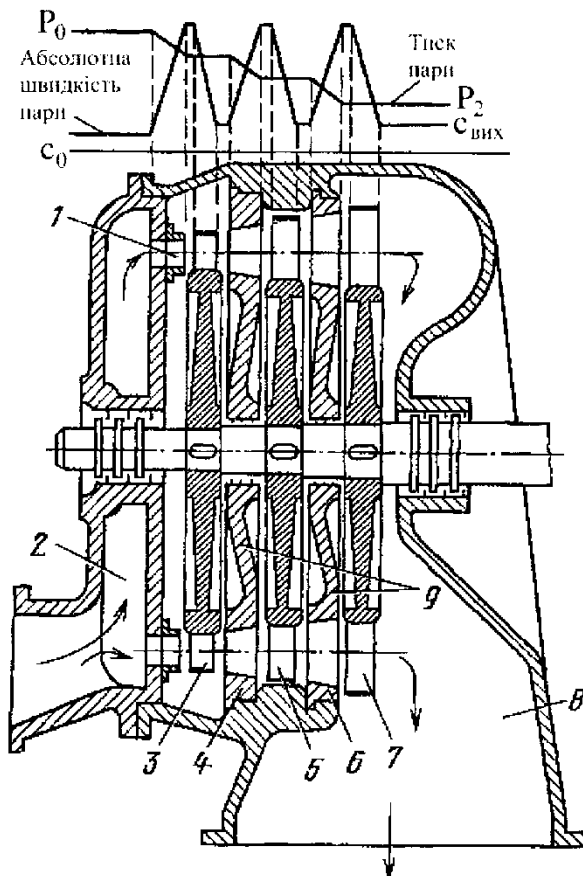


Рис. 4.11 Схема активної турбіни з трьома ступенями тиску:

1 – сопло, 2 – вхідний патрубок, 3 – робоча лопатка I ступені, 4 – сопло, 5 – робоча лопатка II ступені; 6 – сопло; 7 – робоча лопатка III ступені, 8 – вихлопний патрубок, 9 – діафрагми.

У таких турбінах тиск падає при проході пари через сопла і залишається постійним на робочих лопатках. Абсолютна швидкість пари в ступені, що називається ступенем тиску, то зростає – в соплах, то знижується – на робочих лопатках. Так як обсяг пари у міру його розширення збільшується, то геометричні розміри проточної частини по ходу пари зростають. Якщо загальний теплоперепад ( $h_0 - h_{\text{вих}}$ ) розподілити порівну між  $z$  ступенями тиску, то швидкість витікання пари із сопел кожної ступені, м/с,  $c_1 = \sqrt{2}(h_0 - h_{\text{вих}})/z$ .

Звідси випливає, що застосуванням ступенів тиску можна досягти помірних значень  $c_1$ , забезпечивши високий ККД.

## Газові турбіни

*Загальні відомості.* Газові турбіни, як і парові, були розроблені в кінці XIX століття.

Ще в 1500 році у кресленнях Леонардо да Вінчі зустрічається пристрій «димова парасоля». Гаряче повітря від вогню, піднімаючись через ряд лопаток, з'єднаних між собою, рухало нескладний пристрій.

В 1719 році англієць Джон Банбер отримав патент на першу справжню газову турбіну. Його винахід складався з елементів, наявних у сучасних газових турбінах.

В 1872 році Франц Штольц розробив перший справжній газотурбінний двигун.

З того часу і по сьогодні відбувається удосконалення газових турбін, підвищення їх потужності, коефіцієнта корисної дії та розширення сфери застосування.

*Газова турбіна* (фр. *Turbine* від лат. *Turbo* – вихор, обертання) – це тепловий двигун безперервної дії, на лопатках якого енергія стисненого і нагрітого газу перетворюється в механічну роботу на валу.

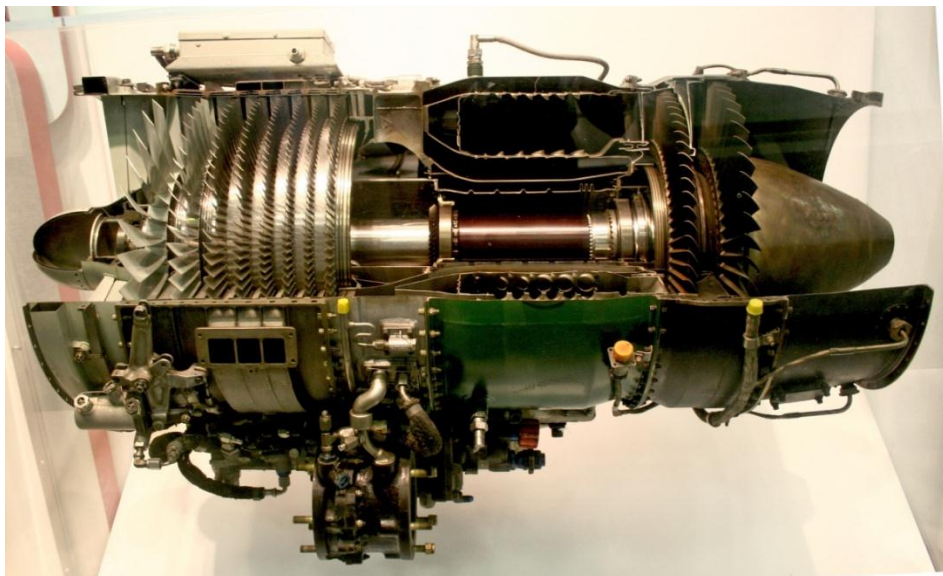


Рис. 4.12 Газова турбіна

Типова осьова газова турбіна в розрізі показана на рисунку 4.12. Вона є турбореактивною. Газотурбінні установки (ГТУ) складаються з трьох основних елементів: газової турбіни, повітряного компресора та камери згоряння. Крім них до складу газотурбінної установки можуть входити повітроохолоджувач, регенератор, маслоохолоджувач та інші допоміжні пристрої. Потік повітря при роботі проходить зліва направо через багатоступінчастий компресор (зліва), в камеру згоряння (по центру), на двоступеневу турбіну (справа).

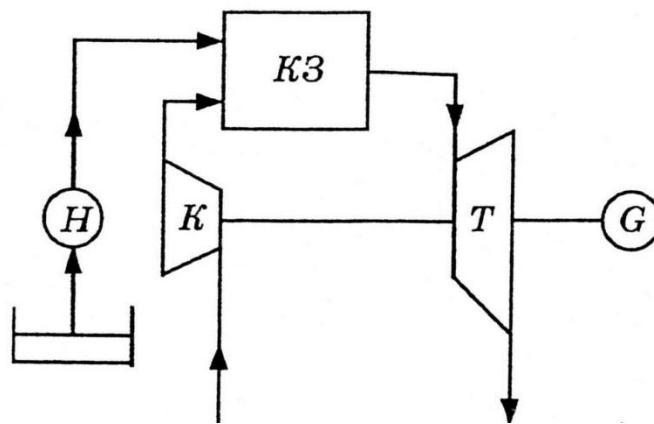


Рис. 4.13 Схема ГТУ: *КЗ* – камера згоряння; *К* – компресор; *Н* – насос; *Т* – газова турбіна; *Г* – електричний генератор

Принцип дії найпростішої газотурбінної установки можна з'ясувати користуючись схемою ГТУ (Рис. 4.13): повітря з атмосфери засмоктується компресором, що підвищує його тиск; далі воно подається до камери згоряння, куди за допомогою паливного насоса крізь форсунку впорскується паливо, де відбувається його горіння; продукти згоряння палива потрапляють до газової турбіни, в якій вони розширюються, здійснюють корисну роботу і потім викидаються в атмосферу. Більша частина потужності, що розвивається газовою турбіною, витрачається на привод компресора, а решта її передається споживачеві корисної потужності.

Газотурбінні установки використовуються: в енергетиці – для приводу електрогенераторів, хімічній та нафтопереробній промисловості – для приводу компресорів; на газоперекачувальних станціях магістральних

газопроводів – для приводу нагнітачів природного газу; на транспорті – як головні та форсажні двигуни.

Газотурбінні установки можуть застосовуватися і для потреб теплофікації. В цьому випадку гарячі гази після газової турбіни направляються у підігрівник води і віддають свою теплоту воді, а нагріта вода подається в мережу опалення або гарячого водопостачання. Зменшення температури відпрацьованих газів дає значне підвищення теплового коефіцієнту корисної дії всієї установки.

Принцип перетворення енергії в газотурбінному ступені: на соплових лопатках відбувається перетворення потенціальної енергії в кінетичну, а на робочих лопатках – кінетичної енергії в механічну. Процес розширення газу на соплових та робочих лопатках проходить із втратами енергії, а на виході із ступеня відбуваються втрати з вихідною швидкістю.

Разом з тим у ступені газової турбіни є додаткові витрати, що зумовлені застосуванням охолодження. Насамперед, це термодинамічні втрати, які відбуваються внаслідок того, що в процесі охолодження лопаток відводиться теплота від газу, який проходить у міжлопаткових каналах. При цьому знижується ентальпія газу і зменшується наявний теплоперепад, що призводить до втрати корисної роботи. Термодинамічні втрати зазвичай дорівнюють 0,2..0,3%.

Слід враховувати також затрати енергії на стискання повітря в компресорі. Вони зменшують корисну потужність газотурбінних установок. Це зменшення тим більше, чим більша втрата охолоджувального повітря і чим вищий тиск у місці відбирання його з компресора. Ці втрати знижують коефіцієнт корисної дії газотурбінної установки на 0,5..1,5%.

Досить великі втрати відбуваються внаслідок змішування повітря з потоком газу, коли він виходить у проточну частину турбіни. При змішуванні енергія основного потоку витрачається на вирівнювання поля швидкостей, тисків і густини газу та охолоджувального повітря. Ці втрати зростають із збільшенням різниці між значеннями перелічених параметрів повітря і газу, а

також із збільшенням відносної витрати охолоджувального повітря й кута відхилення його руху від напрямку потоку газу.

Слід також врахувати додаткові втрати, зумовлені зміною геометричних характеристик профілів охолоджувальних лопаток порівняно з охолоджувальними. Крім того, в охолоджувальних лопатках збільшуються втрати від нестационарності потоку. Це зумовлено випусканням охолоджувального повітря крізь щілини у вихідних кінцях лопаток, яке істотно змінює характер нерівномірності поля швидкостей і тисків потоку в ближньому об'ємі за решіткою лопаток. В цілому зростає крокова нерівномірність потоку і, отже, втрати від нестационарності потоку в турбінному ступені.

*Елементи газотурбінної установки та їх охолодження.* Одним з основних елементів газотурбінної установки є газова турбіна. До її складу входять корпус з розрізними сегментами і сопловими та робочими лопатками. Газові турбіни в загальному випадку можуть бути одноступінчастими та багатоступінчастими. Одноступінчасті газові турбіни прості за конструкцією, але мають меншу економічність порівняно з багатоступінчастими, тому в практиці турбінобудування найбільш поширеними є три- та чотириступінчасті газові турбіни.

На Рис. 4.14 зображено поздовжній розріз установки ГТ – 35/44 – 770, котра використовується в складі ПГУ-220. Установка виготовлена за схемою одновального агрегату з виносною камерою згоряння, розташованою перед турбіною. Атмосферне повітря надходить через фільтр до вхідного патрубка 3 14-ступінчастого компресора. Ротор компресора 6 барабанного типу зварено з трьох частин. Його встановлено на опорні підшипники 2. Він має кінцеве лабіринтне ущільнення 9. Корпус компресора 8 зварно-литий. Робочі та направляючі лопатки 7 компресора виготовлені з нержавіючої сталі. Направляючі лопатки першого порядку 4 виконані поворотними.

Турбіна чотириступінчаста з осьовим виходом газів. Вхідна частина корпусу турбіни двостінна: зовнішня силова стінка 14 та внутрішня

тонкостінна вставка 13. Простір між стінками заповнено теплоізоляцією. Сопловий апарат 15 набірний. Газ підводиться до турбіни через патрубок 12 знизу.

Ротор 17 турбіни складається з валу, відкованого спільно з диском останньої ступені, та трьох насаджених на нього дисків.

Вали компресора 6 та турбіни 17 з'єднані муфтою 11, поряд з якою розміщено упорний підшипник 10. Турбіна має валоповоротний пристрій 1.

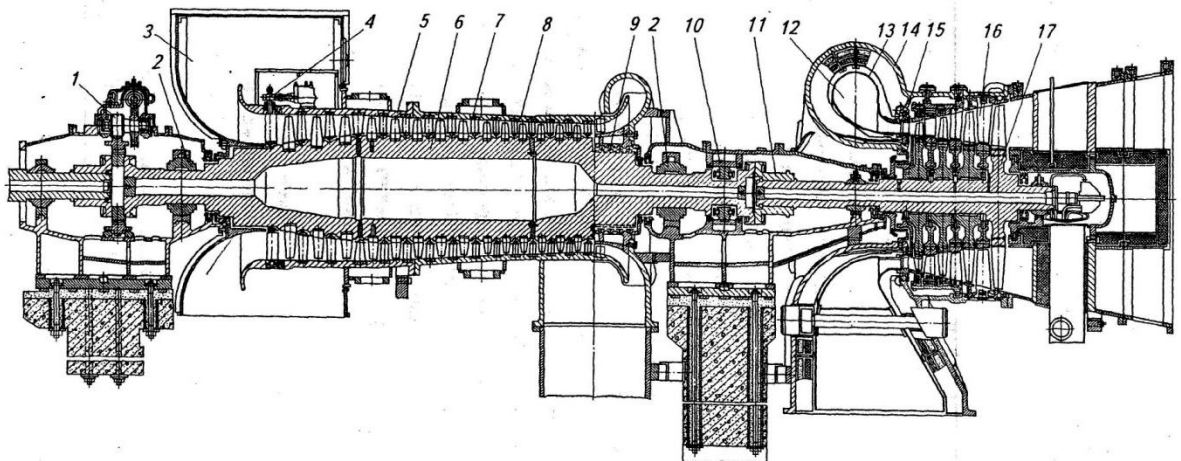


Рис. 4.14 Поздовжній розріз ГТ – 35/44 – 770

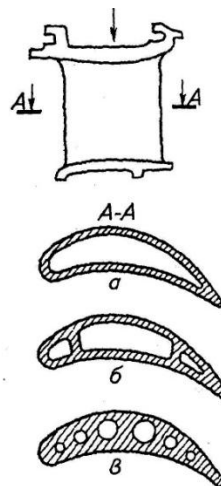


Рис. 4.15 Охолоджувальні лопатки каналного типу: *а* – одно каналні; *б* – триканальні; *в* – багатоканальні.

Ряд газотурбінних установок експлуатується зараз у торговельному й військово-морському флоті, в основному на легких і сторожових



швидкохідних суднах, де особливе значення має компактність і мала маса двигуна.

Газотурбінний автомобіль поки ще перебуває в стадії дослідження експериментальних зразків. Кращі експериментальні двигуни по економічності досягли рівня сучасних бензинових автомобільних двигунів при меншій масі.

Сучасна тенденція в розвитку ГТУ полягає в підвищенні початкової температури й тиску робочих газів при простих схемних рішеннях.

Застосування жаростійких матеріалів і спеціального охолодження нагрітих деталей дозволило підняти температуру робочих газів для ГТУ різного призначення до 1250-1500 °С. Подальший прогрес у цій галузі пов'язаний з удосконаленням систем охолодження й у першу чергу способів охолодження робочих лопаток газових турбін, а також з розробкою нових жароміцних матеріалів.

*Цикл простої газотурбінної установки.* Розглянемо цикл простої газотурбінної установки, основними елементами якої є компресор, камера згоряння КЗ і турбіна Г. Для спрощення аналізу циклу приймемо, що фізичні властивості повітря, що проходить через компресор, і газів, що проходять через турбіну, залишаються незмінними; відповідно до цього теплоємність повітря й газу, а також інші показники будемо вважати постійними.

Такий підхід принципово не вплине на висновки. Відзначимо умовність зображення всього циклу ГТУ на одній діаграмі, яка полягає в тім, що діаграма строго побудована для однієї незмінної речовини, у той час як протягом циклу вона змінюється (Рис. 4.16).

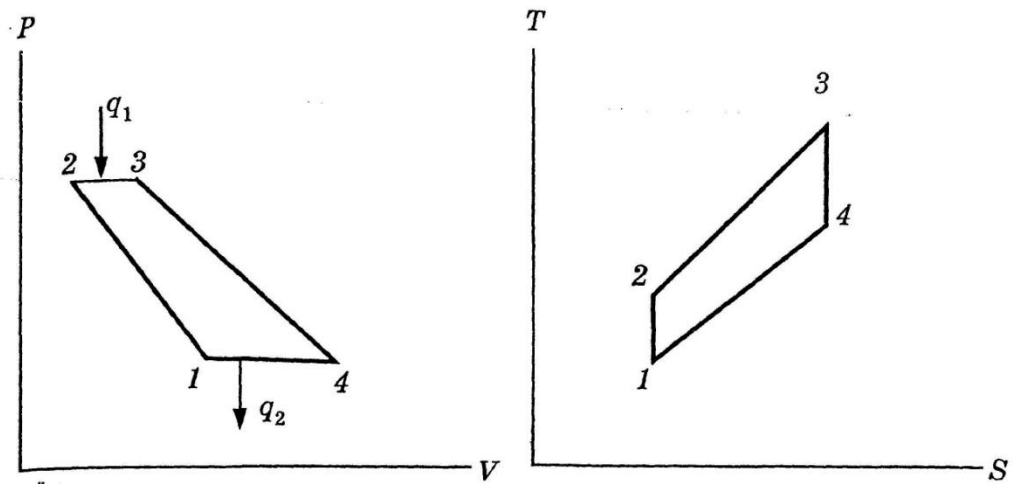


Рис. 4.14 Цикл ГТУ: 1 – 2 – *адіабатичний процес стиснення*

На ділянці 1-2 цикл відповідає повітрю, на лінії 2-3 продуктам згоряння, на лінії 3-4 йде підведення теплоти в результаті реакції горіння палива.

Лінія 4-1 – умовне замикання циклу. Насправді, у точці 4 діаграми продукти згоряння викидаються в атмосферу, а в точці 1 інша речовина – повітря – забирається з атмосфери компресором. Умовність зображення циклу не перешкоджає правильно проводити кількісне визначення характеристик різних процесів, приймаючи для кожної ділянки циклу властиві даній речовині значення теплоємності. Значення оптимального відношення тисків може бути знайдене аналітично.

Однак при проектуванні ГТУ завжди є необхідність у побудові графіка залежності при заданому відношенні температур з метою визначення економічно доцільного відношення тисків. Другою важливою характеристикою циклу служить коефіцієнт корисної дії, обумовлений як відношення корисної роботи ГТУ до всієї роботи турбіни.

У теплових одиницях робота стиснення в компресорі і робота розширення в турбіні може бути виражена так:

$$L_K = C_P(T_2 - T_1) \text{ кДж},$$

$$L_T = C_P(T_3 - T_4) \text{ кДж}.$$

Тоді термічний к.к.д. ідеального циклу газотурбінної установки

$$\eta_t = \frac{L_T - L_K}{Q_1} = \frac{C_P(T_3 - T_4) - C_P(T_2 - T_1)}{C_P(T_3 - T_2)}.$$

Поскільки  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ , то позначивши

$\frac{p_2}{p_1} = \lambda$  і  $\frac{\kappa-1}{\kappa} = m$  отримаємо:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\lambda^m}.$$

Таким чином, термічний к.к.д. ідеального циклу залежить тільки від ступеня підвищення тиску в компресорі та показника адіабати і зовсім не залежить від температури циклу.

*Паливо і камери горіння.* В газотурбінних установках переважно використовується рідке паливо. В стаціонарних установках використовуються важкі сорти палива (типу дизельного), в авіаційних газотурбінних двигунах спалюється гас високого очищення. Однак багато ГТУ працюють на газоподібному паливі, поскільки воно має значну теплотворну здатність. Так природний газ при нормальних умовах має теплотворну здатність до 38 000 кДж/м<sup>3</sup>, газогенераторний – 5 900 кДж/м<sup>3</sup>, промисловий – 4 000 кДж/м<sup>3</sup>. Тверде паливо (кам'яне вугілля, торф) використовується рідко.

В камері горіння створені умови (високий тиск і швидкість руху повітря) для ефективного горіння палива. Продукти горіння з високою початковою температурою змішуються з великою кількістю повітря з таким розрахунком, щоб температура робочого газу була достатньою для нормальної роботи лопаток турбіни.

При використанні рідкого палива застосовують окиснювачі – зкrapлений кисень, азотну кислоту, перекись водню тощо.

Зберігається рідке паливо в спеціальних балонах в стисненому вигляді. Наприклад, на підводних човнах енергокомпоненти зберігаються в еластичних емкостях зовні корпусу човна, що створює додатковий тиск

упорскування палива в камеру горіння. Постійний тиск подачі підтримується редуційним клапаном.

Для горіння палива використовують різні системи: піротехнічні (порох, електрична іскра тощо); хімічні (самоzapальні рідини).

В реактивних двигунах, які працюють на твердому паливі використовують спеціальний балістичний порошок і різні суміші (вуглець, водень). В якості окислювача використовують зкrapлений кисень.

В електроракетних двигунах використовують рідке паливо, яке складається із заряджених частинок, що дозволяє розганяти їх за допомогою електростатичного чи магнітного поля.

*Турбобудівельні матеріали.* За своїми механічними і хімічними властивостями матеріали, що використовуються в турбобудуванні, повинні відповідати умовам роботи установки – високий тиск, температура; великі швидкості обертання; корозостійкість; хороша оброблюваність різанням і тиском тощо.

Особливо високі вимоги висуваються до матеріалів, з яких виготовляються диски і лопатки турбін, ротори, газопроводи, впускні і випускні патрубки для горючого газу та елементи камери горіння палива. Особлива увага приділяється їх жаростійкості. Найбільш жаростійкими матеріалами є кобальтові сплави. Аустенітні жаростійкі сталі у складі мають значну кількість хрому і нікелю. Крім того, до них часто додають молібден, вольфрам, ніобій, титан. Однак вони мають високу вартість. Більш економічними є феритні леговані сталі.

При виборі матеріалів деталей турбін треба враховувати вид і якість палива, щоб запобігти газовій корозії.

Для виготовлення камер горіння вибирають метал особливо високої жаростійкості, здатний протистояти перепаду температур. Частіше всього їх виготовляють з аустенітних сталей з підвищеним вмістом хрому.

В дуже важких умовах працюють лопатки турбін. Вони піддаються складним механічним і термічним впливам, а також вібраціям. Зазвичай їх виготовляють з високолегованих сталей і спеціальних сплавів.

Останнім часом багато деталей турбін виготовляють з металокерамічних матеріалів, отриманих методом порошкової металургії.

*ГТУ нового покоління.* Газові турбіни нового покоління мають високий коефіцієнт корисної дії, характеризуються експлуатаційною надійністю, будуються у всьому світі і забезпечені розвиненою системою сервісного обслуговування. Вони застосовуються в широкому діапазоні потужностей, використовуються в режимі очікування *для покриття пікових навантажень*, а також при постійному навантаженні. У діапазоні потужностей від 60 до 120 МВт близько 60% газових турбін покривають *пікові навантаження*, а більше як 85% надпотужних газових турбін (180 МВт і більше) використовуються для вироблення електроенергії в базовому режимі. Для сучасних енергогазотурбінних установок вартість одного кіловата встановленої потужності становить 400-700 дол., для парогазових – до 1000 дол. Водночас для пилувугільних паротурбінних електростанцій (основних ТЕС) його вартість вже перевищила 1200 дол.

До 2006 року *світове виробництво промислових газових турбін* характеризувалося деякою нестабільністю. Зростання виробництва в 1996-м змінилося спадом у 1997-му і зростанням у 1998-2000 роках. З 2006 року розпочинається швидке зростання світового ринку енергетичного газотурбобудування, що зумовлено виведенням на ринок газових турбін нового покоління. Прогноз на десятирічний період (2006-2015 років) виглядає сприятливим і передбачає швидке зростання виробництва промислових газотурбін різної потужності.

Загальна кількість газових турбін, які вже побудовані й будуть побудовані у світі в 2006-2015 роках, перевищить 12 тис. одиниць. Найбільше – 1337 виготовлено в 2011 році, проте в 2015-му виробництво турбін знизиться до 1206 одиниць. Це пояснюється очікуваним

надходженням на ринок нових енерготехнологій – паливних елементів, ядерних енергетичних установок нового покоління, більш активнішим використанням промислових і побутових відходів для виробництва енергії, а також істотним розширенням використання вітрової та сонячної енергії.

Щорічні світові витрати на виробництво промислових газових турбін із 2006 по 2015 рік перевищать 143 млрд. дол.(у докризових цінах 2008 року), причому в 2015-му вони більш ніж удвічі перевищать рівень 2006 року. Найбільшими будуть витрати на виробництво газових турбін потужністю 180 МВт і більше, що становить майже половину світових інвестицій у промислове газотурбобудування (43,6%, або понад 62 млрд. дол.).

Другими за обсягами інвестицій (21,8%, або 31,2млрд. дол.) будуть газові турбіни великої потужності (125-180 МВт), а третіми – газові турбіни середньої потужності – від 60 до 125 МВт (9,3%, або 13,25 млрд. дол.). Останні широко використовуватимуться у світі *для покриття пікових навантажень*. Усього провідні світові енергомашинобудівні компанії збудують більше як 720 газових турбін середньої потужності, зокрема компанія General Electric – 386 од., Alstom – 199 од. і Rolls - Royce – 63 од.

Попри дефіцит природних енергоносіїв, приблизно 75% газових турбін потужністю більше 15 МВт використовуватимуть як паливо природний газ. Швидке зростання світових цін на газ і труднощі його доставки в деякі райони світу навіть у зрідженому стані сприятимуть підвищенню ролі вугілля як джерела енергії. Тому швидкий розвиток енергетичного газотурбобудування супроводжуватиметься розробкою і впровадженням нових технологій отримання синтетичного газу з вугілля і інших природних енергоносіїв.

*Україна виробляє газотурбінні установки простого циклу, які можуть застосовуватися для покриття дефіциту електроенергії в денний час і згладжування навантаження на теплову енергетику. До них належать серійні промислові газові турбіни потужністю до 25 МВт, газова турбіна ГТЕ-60 потужністю 60 МВт (ДП НВКГ "Зоря-Машпроект"), а також газова*

турбіна російсько-українського виробництва UGT-110000 потужністю 114 МВт. Ці турбіни не поступаються західним аналогам по економічності, більш того, установка UGT-110000 за ваговими характеристиками перевершує закордонні газові турбіни: при масі близько 60 тон її питома вагова характеристика становить тільки 0,52 кг на кіловат установленної потужності.

У зв'язку із широким використанням газу як палива *економічність газових турбін* набуває особливої важливості. Цей показник важливий для зниження витрати природного газу на власні потреби і зменшення викидів в атмосферу діоксиду вуглецю (при спалюванні 1 кг природного газу утворюється 1,8 кг CO<sub>2</sub>), а також шкідливих оксидів азоту та вуглецю (NO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub>). Досягнення високої економічності газотурбінних установок пов'язане, передусім із величиною температури продуктів згоряння після камери згоряння. Проте за сучасного рівня розвитку матеріалознавства подальше підвищення температури продуктів згоряння викликає серйозні труднощі.

Тому в останні роки інтенсивно розвивають газотурбінні установки, які працюють за складним термодинамічним циклом. До таких циклів належать регенеративний цикл (теплообмінник-регенератор на виході газової турбіни), цикли з проміжним охолодженням повітря в процесі стискування або з підігрівом продуктів згоряння в процесі розширення, подача пари в проточну частину газової турбіни (технологія STIG), подача пари та утилізація води в конденсаторі на виході (технологія «Водолій», розроблена в Україні), бінарний повітряний цикл. Використання складних термодинамічних циклів дає можливість підвищити потужність і к.п.д. промислових газотурбінних установок без значного збільшення температури продуктів згоряння і за рахунок цього застосовувати перевірені практикою конструкційні матеріали та газотурбінні технології. Освоєння складних циклів пов'язане з ускладненням конструкції, збільшенням вартості виробництва, призводить до додаткових складнощів при експлуатації і технічному обслуговуванні.

Одним із видів складного термодинамічного циклу є комбінований парогазовий цикл, у якому висока температура продуктів згоряння на виході з газової турбіни (450 – 580°C) використовується для генерації пари в котлі-утилізаторі, куди подається паливо, і його подальшого використання в паровій турбіні. Теоретичні основи парогазового циклу були розроблені російським академіком С. Христіановичем в 50-х роках ХХ ст., але промислово освоїли технологію в США та Німеччині. Коефіцієнт корисної дії сучасних парогазових установок в широкому діапазоні потужностей становить 40-50%, а в діапазоні 400-530 МВт сягає 57-60%. Такий високий позитивний ефект зумовлений утилізацією теплоти вихлопних газів за газовою турбіною у котлі-утилізаторі, збільшенням витрати робочого тіла через силову турбіну і підвищенням працездатності робочого тіла. Крім високої економічності, парогазова установка відповідає жорстким екологічним вимогам за рівнем викидів оксидів азоту і вуглецю, які майже вдвічі менші, ніж при використанні піловугільних технологій.

Україна має власні розробки в сфері парогазових установок середньої і великої потужності, які можуть бути використані для покриття пікових навантажень. Серійна парогазова установка виробництва ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» потужністю 70 МВт (к.к.д. 48,5%) і російсько-українська ПГ-162 потужністю 162 МВт (к.к.д. 50%) не поступаються за економічністю зарубіжним аналогам. Більш потужна російсько-українська ПГУ-325 (325 МВт) з к.к.д. 52%, що експлуатується в Росії, не набагато програє зарубіжним газовим турбінам компаній Siemens AG і General Electric, к.к.д. яких для такого діапазону потужності становить 55-57%. Що ж до газотурбінних установок на основі технологій STIG і «Водолій», то одинична потужність серійних установок не перевищує 40 МВт, і з цієї причини використовувати їх для покриття пікових навантажень поки що складно.

Установки ПГУ-162 і ПГУ-325 створювалися в кооперації з російськими газотурбінними компаніями. У майбутньому до серійного виробництва в Україні парогазових установок середньої та великої



потужності видається цілком реальним: до 80% устаткування таких ПГУ (газова і парова турбіна, електрогенератор, паровий котел-утилізатор та ін.) може виробитися в Україні.

Попри високу економічність, парогазова технологія поки що не одержала широкого розвитку в Україні, а її використання обмежується малими потужностями, які не розв'язують проблеми згладжування графіка добового навантаження. На ВАТ «Сумське НВО ім. М.Фрунзе» кілька років тому була введена в експлуатацію ПГУ потужністю близько 20 МВт, що виробляє електроенергію для власних потреб підприємства. З газовою турбіною потужністю 16 МВт була встановлена парова турбіна проектною потужністю 6 МВт. Однак проблеми, пов'язані з роботою парового котла, не дозволили досягти проектної потужності парової турбіни, тому ПГУ не була запущена в серійне виробництво. Дещо раніше були розроблені, проекти ПГЕС-240 (240 МВт) в м. Ізмаїл Одеської області та ПГУ-360 (360 МВт) в Одесі.

Дуже перспективним для України є використання ПГУ в металургійному комплексі, де власні потреби в електроенергії становлять до 2000 МВт, причому частина цієї потужності використовується в денний час. За даними ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», утилізація теплоти доменного газу при використанні парогазових установок ПГУ-150 потужністю 150 МВт дасть змогу не тільки підвищити к.к.д. утилізації з 10-12% (паротурбінний блок) до 40-45%, а й виробити в масштабах України до 2,0 ГВт годин електроенергії, які можуть бути спрямовані на власні потреби металургії. Це допоможе істотно знизити навантаження на теплову енергетику.

Алчевський меткомбінат нещодавно розпочав будівництво трьох парогазових установок на доменному газі потужністю 150 МВт кожна фірми Mitsubishi (вартість будівництва – близько 480 млн. дол.). Проте розрахунки, виконані в ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», показують, що більш привабливим з економічної точки зору є проект створення української ПГУ-150 на основі

газотурбінної установки UGT-110000, який може бути реалізований впродовж двох-трьох років.

Ще одним важливим напрямом використання ПГУ-150 є *нафтопереробний комплекс України*. При освоєнні технології глибокої переробки нафти утилізація відходів нафтопереробних заводів України дає можливість виробити майже 1,5 ГВт годин електроенергії, які можуть бути спрямовані на згладжування графіка денного споживання електроенергії.

Наведений аналіз показує, що енергетичні газові турбіни середньої та великої потужності можуть послужити альтернативою для покриття дефіциту електроенергії в Україні в денний час і згладжування добового графіка навантаження. Зниження навантаження на застарілу українську теплоенергетику в денний час і її експлуатація за умов, що наближені до постійного навантаження протягом доби, дасть змогу подовжити ресурс багатьох ТЕС країни.

Для вирішення цієї проблеми сьогодні в Україні є всі передумови. Розробляються і виробляються конкурентні на світовому ринку газові турбіни простого циклу і парогазові установки малої і середньої потужності.

За відповідної організації українська енергомашинобудівна промисловість може виготовляти до 80% елементів парогазових установок великої та надвеликої потужності. Хороші перспективи має створення установок, які працюють на низькокалорійних газах – доменному газі та відходах глибокої переробки нафти. Важливого значення для розвитку газотурбобудування набуває розробка промислових газифікаторів вугілля з українських родовищ, що дасть змогу скоротити споживання природного газу.

Газотурбобудування є наукоємною галуззю промисловості. Попри задовільний стан енергетичного газотурбобудування в Україні, для подальшої підтримки його на відповідному рівні та створення нового покоління газових турбін і парогазових установок на їхній основі потрібна

Національна науково-технічна програма в галузі енергетичного газотурбобудування.

### **4.3 Поршневі теплові двигуни внутрішнього згорання**

#### ***Поршневі бензинові двигуни внутрішнього згорання***

*Загальні відомості.* Перший в світі двигун внутрішнього згорання, який працював на легкому рідкому паливі з карбюратором і електричним запаленням, побудував капітан російського флоту І.С. Костевич в 1879 році. З того часу принципів змін він не зазнав, проте відбулось значне його вдосконалення.

В поршневих двигунах внутрішнього згорання (д.в.з.) паливо спалюється в циліндрі. Отримана теплота перетворюється в механічну роботу руху поршня і колінчастого валу.

Їх класифікують за такими ознаками:

за способом здійснення робочого процесу; за призначенням; за видом палива, яке використовується; за розташуванням робочих циліндрів; за числом циліндрів; за способом розпилення рідкого палива; за числом робочих камер; за робочим процесом.

Розглянута класифікація двигунів за основними і найбільш характерними їх ознаками може бути продовжена, наприклад за швидкохідністю, способом запуску і т.д.

За способом здійснення робочого процесу (циклами) двигуни поділяються на чотиритактні і двотактні. В чотиритактних двигунах повний цикл здійснюється за чотири ходи поршня, тобто за два оберти колінчастого вала, а в двотактних – за два ходи поршня, тобто за один оберт колінчастого вала.

За призначенням двигуни можуть бути: стаціонарні, автотракторні, тепловозні, авіаційні, судові і т.д.

За видом палива двигуни поділяються на: бензинові, соляріві, газові.

За розташуванням робочих циліндрів на: вертикальні, горизонтальні, з нахиленими циліндрами, тандем-машини і т.д.

За способом розпилення рідкого палива на: пневматичного, механічного або безпосереднього розпилення. В бензинових двигунах донедавна сумішоутворення відбувалось за допомогою карбюратора (зовнішнє сумішоутворення). Останнім часом застосовуються різні схеми сумішоутворення, які будуть розглянуті далі.

Запалення суміші може бути: за допомогою електричної іскри; стиснутого повітря, нагрітого до температури, що перевищує температуру займання палива; упорскування розпиленого палива в циліндр двигуна на розжарений калоризатор.

В бензинових двигунах переважно використовується перший спосіб.

### ***Принцип роботи поршневих бензинових двигунів***

Поршневі бензинові двигуни за способом здійснення робочого процесу можуть бути чотиритактні та двотактні. Однак двотактні використовуються рідко, бо мають малу потужність і не економічні.

В чотиритактних двигунах робочий цикл здійснюється за чотири такти.

*Перший такт.* Поршень рухається від верхньої мертвої точки (ВМТ) до нижньої мертвої точки (НМТ). При цьому впускний клапан відкритий. Відбувається заповнення циліндра сумішшю парів бензину з повітрям, яка утворюється зовні.

*Другий такт.* Поршень рухається від НМТ до ВМТ; впускний і випускний клапани закриті; відбувається стиснення суміші. При підході поршня до ВМТ між електродами спеціальної свічки виникає іскра і робоча суміш вибухоподібно згорає. В результаті в циліндрі різко зростає тиск.

*Третій такт.* Під дією тиску газу поршень рухається від ВМТ до НМТ. Відбувається робочий хід. При цьому робота газів, що передається на колінчастий вал двигуна достатня не тільки для здійснення трьох додаткових тактів, а й для виконання зовнішньої роботи, приводу робочої машини.

*Четвертий такт.* Поршень рухається від НМТ до ВМТ. Випускний клапан відкритий. Відбувається виштовхування поршнем відпрацьованих газів. В момент приходу поршня до ВМТ цикл завершується.

В результаті теплової і механічної інерційності процесів виникає потреба в корегуванні відкриття і закриття клапанів двигуна. Величина випередження і запізнення відкриття і закриття клапанів віднесена до кута повороту кривошипа, називається фазами газорозподілу. Оптимальне значення фаз газорозподілу для різних двигунів переважно встановлюється досвідним шляхом.

Графічне зображення робочого процесу двигуна внутрішнього згоряння називається індикаторною діаграмою.

### ***Сумішоутворення в поршневих двигунах в.з.***

Підготовка суміші палива з повітрям в необхідних пропорціях називається *сумішоутворенням*.

Розрізняють двигуни із *зовнішнім* і *внутрішнім* сумішоутворенням.

До ДВЗ із зовнішнім сумішоутворенням відносяться карбюраторні і деякі газові двигуни. В двигунах, які працюють на бензині донедавна суміш готувалась у спеціальних пристроях – *карбюраторах*.

Принципова схема найпростішого карбюратора зображена на Рис. 4.17.

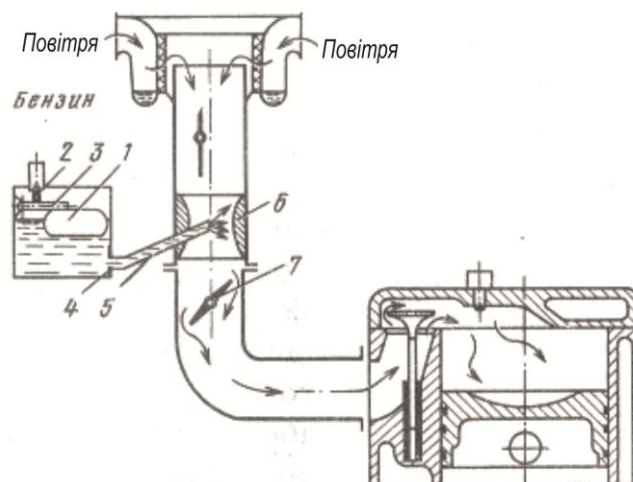


Рис. 4.17 Принципова схема найпростішого карбюратора

Карбюратор складається із поплавкової і сумішоутворюючої камер. В поплавковій камері розміщений латунний поплавок 1, закріплений шарнірно на осі 3, і голковий клапан 2, завдяки якому підтримується постійний рівень бензину. В змішувальній камері розташований дифузор 6, жиклер 4 з розпилувачем 5 і дросельна заслінка 7. Жиклер має калібрований отвір, розрахований на пропускання певної кількості палива.

Коли поршень рухається вниз і впускний клапан відкритий, у циліндр засмоктується повітря, швидкість якого в дифузори досягає 50-150 м/с. У звуженій частині дифузора, де розташований розпилувач, створюється розрідження, яке спричиняє засмоктування бензину з поплавкової камери. Бензин у потоці повітря розпилюється, випаровується і змішується з ним – утворюється горюча суміш. Якість горючої суміші залежить від співвідношення бензину і повітря. Горюча суміш може бути нормальною (15 кг повітря на 1 кг бензину), бідною (більше 15 кг/кг) і багатою (менше 13 кг/кг).

Кількість і якість горючої суміші, а значить, потужність і число обертів двигуна, регулюється дросельною заслінкою та іншими спеціальними пристроями у складних карбюраторах.

Проте карбюраторна система має багато суттєвих недоліків: значна непродуктивна витрата бензину, інерційність зміни складу суміші, нерівномірність заповнення циліндрів у багатоциліндрових двигунах тощо. Тому на сучасних автомобілях карбюраторна система забезпечення паливною сумішшю замінена на інжекторну (injection – упорскування).

Система центрального упорскування (моноупорскування) відноситься до систем упорскування палива бензинових двигунів. Робота системи ґрунтується на упорскуванні палива однією форсункою, розташованою на впускному колекторі двигуна.

Відомими конструкціями системи центрального упорскування є системи Mono - Jetronic і Opel - Multec. Система упорскування Mono - Jetronic розроблена фірмою Bosch в 1975 році. Система встановлювалася на

автомобілі марок Volkswagen, Audi.

### ***Облаштування системи упорскування Mono - Jetronic***

Система Mono – Jetronic має наступні пристрої:

- регулятор тиску;
- центральна форсунка упорскування;
- дросельна заслінка з механічним приводом;
- електросервопривод дросельної заслінки;
- електронний блок управління;
- вхідні датчики.

### ***Схема системи центрального упорскування Mono – Jetronic.***

Регулятор тиску підтримує постійний робочий тиск в системі упорскування (0,1 МПа). Окрім цього, за допомогою регулятора в системі після виключення двигуна зберігається залишковий тиск, що перешкоджає утворенню повітряних пробок і полегшує пуск двигуна.

Центральна форсунка упорскування забезпечує імпульсне упорскування палива. Форсунка є електромагнітним клапаном. Управління клапаном здійснюється електричним сигналом, що поступає від електронного блоку управління. До конструкції форсунки входить:

- електромагнітна котушка(соленоїд);
- замочний клапан;
- поворотна пружина;
- розпилювальне сопло.

Дросельна заслінка призначена для регулювання об'єму повітря, що поступає. Дросельна заслінка має два приводи: механічний і електричний. Механічний привод здійснюється від педалі газу. Електросервопривід дросельної заслінки служить для стабілізації обертів холостого ходу за рахунок примусового відкриття дросельної заслінки.

Електронний блок управління здійснює управління центральною

форсункою упорскування (електромагнітним клапаном) і електросервоприводом дросельної заслінки. Блок управління включає мікропроцесор і блок пам'яті. У блоці пам'яті поміщена інформація про еталонну характеристику упорскування (співвідношення компонентів паливно-повітряної маси на усіх режимах роботи двигуна).

Вхідні датчики фіксують поточний стан роботи двигуна. У системі використовуються наступні датчики:

- датчик моменту упорскування;
- датчик положення дросельної заслінки;
- датчик температури повітря;
- датчик температури охолоджувальної рідини;
- датчик оборотів двигуна;
- вимикач сервоприводу;
- датчик концентрації кисню.

За показами датчиків температури повітря і положення дросельної заслінки розраховується необхідний об'єм повітря в системі упорскування.

Маса всмоктуваного повітря, відповідно з густиною, знаходиться в прямій залежності від температури. Чим холодніше повітря, тим воно густіше, а значить має більшу масу. Датчик температури повітря розташований перед центральною форсункою упорскування.

Дросельна заслінка влаштована так, що кожному її положенню відповідає певна кількість повітря, що пропускається. Цей параметр фіксує датчик положення дросельної заслінки, потенціометр. Датчик положення дросельної заслінки (дроссель).

У разі відмови датчиків температури повітря і положення дросельної заслінки їх робота дублюється сигналами датчика обертів і датчика температури охолоджувальної рідини (температури двигуна). Упорскування палива здійснюється від сигналів датчика моменту упорскування, які подаються одночасно з сигналами на займання паливно-повітряної суміші.



Вимикач сервоприводу забезпечує роботу системи в режимі холостого ходу двигуна. Замкнуте положення вимикача свідчить про режим холостого ходу, при цьому включається електросервопривід.

Датчик концентрації кисню (кисневий датчик) призначений для підтримки оптимального співвідношення компонентів паливно-повітряної суміші.

Датчик встановлюється у випускній системі:

- у випускному колекторі;
- на автомобілях з каталітичним нейтралізатором - перед нейтралізатором.

### **Принцип роботи системи упорскування Mono Jetronic**

При роботі двигуна сигнали від датчиків поступають в електронний блок управління. По сукупності сигналів і інформації про еталонні характеристики упорскування блок управління обчислює початок і тривалість відкриття центральної форсунки.

Відповідно до розрахункових даних подається сигнал на електромагнітну котушку форсунки. Замочний клапан відкривається. Бензин через сопло під тиском розпилюється у впускному колекторі і змішується з повітрям. Утворена паливно-повітряна суміш подається в камери згоряння двигуна.

У системі передбачена автоматична стабілізація обертів. На основі сигналу вимикача сервоприводу електродвигун відкриває дросельну заслінку на певний кут, чим досягається стійка робота в режимі холостого ходу. Конструкція і принцип роботи системи упорскування Opel - Multec аналогічні системі Mono - Jetronic.

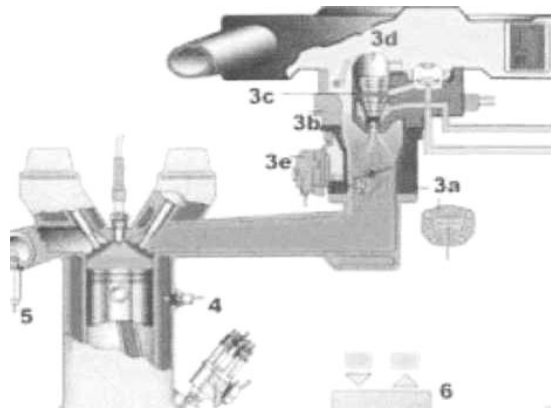


Рис. 4.18 Схема системи центрального упорскування Mono - Jetronic  
 1 - паливний насос; 2 - фільтр паливний; 3 - центральна форсунка упорскування; а - потенціометр дросельної заслінки, б - регулятор тиску, с - форсунка, d - датчик температури повітря, е - електродвигун приводу дросельної заслінки; 4 - датчик температури охолоджувальної рідини; 5 - кисневий датчик (лямбда-зонд); 6 - електронний блок управління.

### **Система розподіленого упорскування**

Система розподіленого упорскування (багатоточкова система упорскування) відноситься до систем упорскування палива бензинових двигунів. Робота системи ґрунтується на упорскуванні палива в кожний циліндр окремою форсункою.

За принципом дії системи розподіленого упорскування палива розділяються на системи безперервного та імпульсного упорскування.

Залежно від виду управління розрізняють системи розподіленого упорскування з механічним і електронним управлінням.

Відомими конструкціями системи розподіленого упорскування палива є:

- система упорскування К – Jetronic;
- система упорскування KE – Jetronic;
- система упорскування L - Jetronic.

Основним виробником систем упорскування є фірма Bosch.

Система розподіленого упорскування К-Jetronic є механічною системою безперервного упорскування палива.

Система розподіленого упорскування KE-Jetronic є механічною

системою безперервного упорскування палива з електронним управлінням.

Система розподіленого упорскування L-Jetronic є системою імпульсного упорскування з електронним управлінням.

Дросельна заслінка призначена для регулювання об'єму повітря, що поступає. Заслінка має механічний привід від педалі газу. Витратомір повітря забезпечує вимір об'єму повітря за рахунок пропорційного переміщення напірного диска.

Напірний диск сполучений з плунжером дозатора-розподільника за допомогою важелів. При відкритті дросельної заслінки у впускний колектор поступає більший об'єм повітря, яке переміщає напірний диск витратоміру. Напірний диск кріпиться на важелі.

На осі важеля закріпленій інший важіль з роликком і регулювальним гвинтом. Ролик упирається в нижній кінець плунжера дозатора-розподільника. Дозатор-розподільник призначений для розподілу палива по форсунках циліндрів на усіх режимах роботи двигуна. Розподіл палива здійснюється за рахунок переміщення плунжера. Знизу на плунжер впливає важіль напірного диска, зверху регулятор тиску.

Регулятор тиску живлення підтримує постійний за величиною тиск палива в системі.

Регулятор тиску, що керує, створює підпірний тиск на верхньому кінці плунжера, за рахунок чого досягається збагачення чи збіднення паливноповітряної суміші. Це необхідно при певних режимах роботи двигуна, в т.ч. при холодному пуску, прогріванні на холостому ходу, а також при максимальному навантаженні.

Форсунки упорскування забезпечують безперервне упорскування палива під тиском.

Для забезпечення запуску двигуна при температурі нижче 10°C в системі K - Jetronic застосовується пускова форсунка і клапан додаткового повітря. Пускова форсунка здійснює при запуску і прогріванні двигуна упорскування у впускний колектор додаткової кількості палива. Робота

пускової форсунки здійснюється під управлінням термореле.

Термореле встановлюється у блоці циліндрів двигуна, де відстежує температуру охолоджувальної рідини. При запуску двигуна термореле включає пускову форсунку. Коли охолоджувальна рідина досягає певної температури пускова форсунка відключається.

Клапан додаткового повітря забезпечує додаткову порцію повітря при запуску двигуна в обхід дросельної заслінки. У початковому положенні клапан відкритий. По мірі прогрівання двигуна клапан закривається (переміщається біметалічна пластина з діафрагмою клапана).

Холостий хід двигуна регулюється двома гвинтами:

- кількості суміші, що встановлює частоту обертання колінчастого валу двигуна на холостому ходу;
- якості суміші, що визначає вміст чадного газу у відпрацьованих газах.

Регулювання холостого ходу початково робиться заводом-виготівником.

### ***Принцип дії системи K – Jetronic***

При натисненні педалі газу відкривається дросельна заслінка. Повітря, що проходить через неї, переміщає напірний диск витратоміру повітря. Рух диска через важелі передається на плунжер дозатора-розподільника. Паливна система подає бензин до дозатора-розподільника, від якого плунжер нагнітає паливо до форсунок упорскування. Форсунки безперервно упорскують паливо у впускний колектор двигуна. Там воно змішується з повітрям і утворюється паливно-повітряна суміш. При відкритті впускних клапанів паливно-повітряна суміш поступає в камери згоряння двигуна. Кількість палива того, що поступає до форсунок визначається положенням дросельної заслінки. Чим більше відкрита дросельна заслінка, тим більше повітря проходить через впускний колектор і тим більше палива подається до форсунок. Залежно від режимів роботи двигуна об'єм палива, що упорскує,

регулюється тиском.

*Система розподіленого упорскування KE - Jetronic* є механічною системою безперервного упорскування палива з електронним управлінням якісним складом паливно-повітряної суміші.

Конструктивно система KE - Jetronic побудована на основі системи K - Jetronic. Для реалізації електронного управління упорскуванням в систему додатково включені наступні конструктивні елементи:

- електрогідравлічний регулятор тиску;
- електронний блок управління;
- мембранний регулятор тиску;
- витратомір повітря з датчиком потенціометра;
- вхідні датчики.

#### ***Схема системи упорскування KE- Jetronic***

Електрогідравлічний регулятор тиску призначений для забезпечення якісного складу паливно-повітряної суміші. У системі KE - Jetronic електрогідравлічний регулятор тиску встановлюється замість регулятора тиску. Регулятор тиску є електрокерованим клапаном, який регулює і величину тиску.

Електронний блок управління перетворює електричні сигнали вхідних датчиків в дію, яка керує такими наступними виконавчими пристроями:

- електрогідравлічний регулятор тиску;
- пускова форсунка;
- клапан додаткового повітря;
- клапан системи уловлювання парів бензину.

Мембранний регулятор тиску служить для підтримки необхідного робочого тиску в дозаторі-розподільнику. Він встановлюється в поворотній магістралі системи.

Витратомір повітря забезпечує кількісне регулювання складу паливно-

повітряної суміші. У приводі витратоміру встановлений датчик потенціометра, який фіксує величину повороту напірного диска. Переміщення потенціометра на певний кут сприймається електронним блоком управління як зміну навантаження двигуна. Витратомір з датчиком потенціометра розширює сферу застосування мембранного регулятора тиску.

Вхідні датчики фіксують поточний стан роботи двигуна. На різних типах двигунів може встановлюватися від 4 до 11 вхідних датчиків. Наприклад на автомобілі Audi - 80 встановлювалися датчики:

- датчик температури охолоджувальної рідини;
- датчик положення дросельної заслінки;
- датчик навантаження двигуна (потенціометр витратоміру);
- датчик частоти обертання колінчастого валу двигуна;
- датчик висоти над рівнем моря;
- датчик початку відліку;
- датчик концентрації кисню;
- датчик включення автоматичної коробки передач;
- датчик режиму холостого ходу;
- датчик включення кондиціонера.

### ***Принцип дії системи E- Jetronic***

При запуску холодного двигуна для швидкого прогрівання і стійкої роботи система забезпечує утворення збагаченої паливно-повітряної суміші. На підставі сигналу датчика температури охолоджувальної рідини електронний блок управління закриває клапан електрогідравлічного регулятора тиску. Підпірний тиск в нижніх порожнинах диференціальних клапанів дозатора-розподільника зменшується. Верхні порожнини диференціальних клапанів збільшуються і до форсунок упорскування поступає більше палива. Суміш стає збагаченою.

При постійній частоті обертання колінчастого валу двигуна електрогідравлічний регулятор тиску не працює (біметалічна пластина з

клапаном знаходиться в середньому положенні). Зв'язок "витратомір повітря - плунжер дозатора-розподільника" забезпечує утворення стехіометричної паливно-повітряної суміші.

При різкому відкритті дросельної заслінки відбувається збагачення паливно - повітряної суміші.

При гальмуванні двигуном, навпаки, утворюється збіднена паливно-повітряна суміш. По команді електронного блоку управління клапан електрогідравлічного регулятора відкривається, підірний тиск в нижніх камерах диференціальних клапанів збільшується, об'єм верхніх камер диференціальних клапанів зменшується, відповідно подання палива до форсунок зменшується, суміш збіднюється.

При температурі нижче 10°C спрацьовує пускова форсунка і клапана додаткового повітря.

Подальша робота двигуна здійснюється по сукупності сигналів вхідних датчиків.

### ***Система розподіленого упорскування L-Jetronic***

Система розподіленого упорскування L-Jetronic є системою імпульсного упорскування з електронним управлінням кількісним і якісним складом паливно-повітряної суміші. Для забезпечення імпульсного упорскування палива в системі застосовані форсунки з електромагнітним управлінням. Порівняно з системами K – Jetronic і KE - Jetronic, імпульсне упорскування, реалізоване в системі L-Jetronic, забезпечує паливну економічність, зниження токсичності відпрацьованих газів, і поліпшення динамічних характеристик автомобіля.

Система упорскування L-Jetronic має наступні пристрої:

- розподільна магістраль;
- форсунки упорскування;
- регулятор тиску палива;
- електронний блок управління;

- витратомір повітря з датчиком потенціометра;
- пускова форсунка;
- клапан додаткового повітря;
- вхідні датчики.

### ***Схема системи упорскування L-Jetronic***

Розподільна магістраль призначена для розподілу палива по форсунках упорскування.

Витратомір повітря забезпечує кількісне регулювання паливно-повітряної суміші. Об'єм повітря, що поступає в систему, відстежується датчиком потенціометра витратоміру. Відповідно до об'єму повітря робиться упорскування певної кількості палива.

Для полегшення пуску холодного двигуна і швидкого його прогрівання в системі використовуються пускова форсунка і клапан додаткового повітря. Форсунка і клапан управляються електронним блоком. Пускова форсунка упорскує додаткову порцію палива. Робота форсунки забезпечується термореле і датчиком температури охолоджувальної рідини. Клапан додаткового повітря забезпечує при запуску додаткову порцію повітря. Він встановлюється паралельно до дросельної заслінки.

У системі передбачено механічне регулювання кількості і якості паливно-повітряної суміші на холостому ходу за рахунок відповідних гвинтів. Гвинт якості встановлюється в обвідному каналі витратоміру повітря.

Вхідні датчики фіксують параметри роботи двигуна і перетворюють їх в електричні сигнали.

У системі L-Jetronic встановлюються наступні датчики:

- датчик температури повітря;
- потенціометр витратоміру повітря;
- датчик положення дросельної заслінки;
- датчик висоти над рівнем моря;



- датчик-розподільник запалення;
- датчик температури охолоджувальної рідини;
- термореле.

Різновидами системи L-Jetronic виявляють системи LE-Jetronic, LH-Jetronic, які мають окремі конструктивні відмінності.

### ***Принцип дії системи L-Jetronic***

Паливна система забезпечує подання бензину до розподільної магістралі, від якої воно поступає до форсунок упорскування. Вхідні датчики фіксують температуру, тиск і об'єм повітря, що поступає, температуру, частоту обертання і навантаження двигуна. Сигнали від датчиків поступають в електронний блок управління.

Електронний блок управління визначає необхідну кількість палива для роботи двигуна і подає імпульс певної величини.

### ***Система безпосереднього упорскування***

Система безпосереднього упорскування палива є найсучаснішою системою упорскування палива бензинових двигунів. Робота системи ґрунтується :на упорскуванні палива безпосередньо в камеру згоряння двигуна.

Уперше система безпосереднього упорскування була застосована на двигуні GDI(Gasoline Direct Injection - безпосереднє упорскування бензину), що встановлюється на автомобілі компанії Mitsubishi.

Застосування системи безпосереднього упорскування дозволяє досягти до15% економії палива, а також скорочення викиду шкідливих речовин з газами.

Конструкція системи безпосереднього упорскування палива розглядається на прикладі системи, що встановлюється на двигуни FSI (Fuel Stratified Injection - пошарове упорскування палива). Система є подальшим розвитком об'єднаної системи упорскування і запалення Motronic.

Система безпосереднього упорскування має контур високого тиску

паливної системи двигуна FSU.

Запобіжний клапан захищає елементи системи упорскування від граничних тисків, що виникають при температурному розширенні палива. Клапан встановлюється на паливній рампі.

Датчик високого тиску призначений для виміру тиску в паливній рампі. Відповідно до сигналів датчика блок управління двигуном може змінювати тиск в паливній рампі.

Форсунка упорскування забезпечує утворення певного виду паливно-повітряної суміші.

У двигуні FSI застосовуються наступні види сумішоутворення:

- пошарове сумішоутворення;
- стехіометричне гомогенне;
- гомогенне сумішоутворювання.

Пошарове сумішоутворення використовується при роботі двигуна на малих та середніх обертах і навантаженнях. Стехометричне (інша назва - легкоспалахуване) , гомогенне (інша назва - однорідне) сумішоутворення застосовується при високих обертах двигуна і великих навантаженнях.

Блок управління двигуном в сукупності з вхідними датчиками утворюють систему управління двигуном.

Система управління двигуном, окрім системи упорскування, забезпечує управління:

- паливною системою;
- впускною системою;
- системою запалення;
- випускною системою.

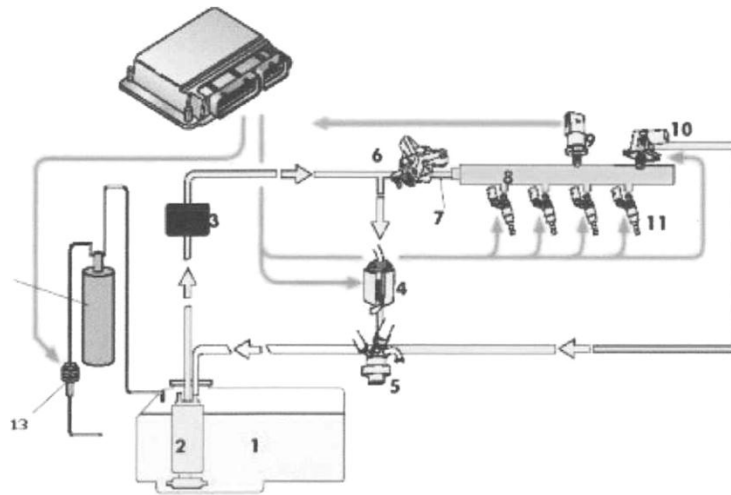


Рис. 4.19 Схема системи , уприскування Motronic MED7  
 1- паливний бак; 2 - паливний насос ; 3 - паливний фільтр; 4 - перепускний клапан ; 5 - регулятор тиску палива; 6 - паливний насос високого тиску; 7 - трубопровід високого тиску; 8 - розподільний трубопровід; 9 - датчик високого тиску; 10 - запобіжний клапан ; 11 - форсунки уприскування; 12 - адсорбер; 13 – електромагнітний замочний клапан продування адсорбера.

Інжектор – це середній варіант між форсункою і карбюратором де акцент зроблений на процеси горіння усередині циліндрів того виду палива, яке залите у бак. Але, щоб забезпечити ефективне горіння палива, важливим є саме додаткове устаткування, яке підтримує, і забезпечує горіння (точність уприскування і дозування у дизелів, і точність дозування і займання у бензинових двигунах) залежно від необхідної потужності, виду палива, швидкості фронту полум'я, змінних навантажень і взагалі, загальній економічності. Тобто, співвідношення отриманої потужності з видом і кількістю споживаного для цього палива. Причому, саме горіння регулюється динамічно, тобто, гнучко змінюються з часом, залежно від локальних сигналів датчиків і центральних «вказівок» бортового комп'ютера.

Працездатність. і надійність інжекторних двигунів, безпосередньо залежать від роботи систем управління додаткового устаткування, а паливо і складність будови двигуна є другорядною. Ознака хорошої роботи інжектора одночасне досягнення необхідної потужності, прийомистості, плавності ходу, нечутливості до змінних навантажень і швидкості, високої економічності. При будь-якому збої в інжекторних двигунах, конструкцією

передбачено автоматичне перемикання системи в аварійний режим, призначений для того, щоб гарантовано і безпечно доїхати до найближчого місця ремонту. Тут виключається ремонт в дорозі.

### **Техніко-економічні показники ДВЗ.**

Індикаторну потужність знаходять за формулою:

$$N_i = \frac{Z}{\tau} L_i; n_o,$$

де  $n_o$  – частота обертання валу, об/с;

$Z$  - число циліндрів;

$\tau$  – коефіцієнт тактності (для чотирьохтактного двигуна  $\tau = 2$ , для двохтактного  $\tau = 1$ )

$L_i$  – індикаторна робота, яка виконується в одному циліндрі за один цикл, Дж;

$$L_i = P_i V_n,$$

де  $P_i$  – середній індикаторний тиск, який є умовно-постійним, що діє на поршень на протязі одного ходу поршня;

$V_n$  – робочий об'єм циліндра.

Індикаторний ККД визначається за формулою:

$$\eta_i = \frac{N_i}{Q} = \frac{N_i}{B Q_i},$$

де  $B$  – секундна витрата палива, кг/с;

$Q_i$  – теплота згорання палива, Дж/кг.

Індикаторний ККД у карбюраторних двигунів  $\eta_i = 0,25 - 0,40$ ;

у дизельних  $\eta_i = 0,40 - 0,53$ .

Ефективна потужність (на вагу двигуна) завжди менша за індикаторну, бо частина потужності витрачається на тертя в механізмах двигуна та привод додаткових механізмів.

Втрати потужності оцінюються механічним ККД і становлять 8-30% від індикаторної.

Ефективний ККД у карбюраторних двигунів  $\eta_e = 0,42$ .

### **Токсичність вихлопних газів ДВЗ.**

Двигуни внутрішнього згоряння в даний час є основними забруднювачами навколишнього середовища.

Основна маса вихлопних газів від автомобілів викидається там, де велике скупчення людей (містах). Переважна більшість цих газів розташовується на рівні середнього росту людини. У вихлопних газах ДВЗ містяться твердий вуглець (сажа), який є адсорбентом токсичних, в тому числі канцерогенних речовин, оксиди азоту NO, вуглеводні СпНт, оксид вуглецю СО та альдегіди, а при роботі на етилованому бензині – дуже токсичних з'єднань свинцю.

Вміст вуглецю вказаних з'єднань у вихлопних газах залежить від типу двигуна, його стану і регулювання, режиму роботи та типу палива.

Наприклад, вміст NO у вихлопних газах дизельних і карбюраторних двигунів практично однаковий (до  $2,5 \text{ г/м}^3$ ), в той же час викид СО в карбюраторних двигунах (до  $14 \text{ г/м}^3$ ) в 4 рази вищий, а СН (до  $1,4 \text{ г/м}^3$ ) в два рази нижче, ніж в дизелях.

Сажа, вуглеводні, оксид вуглецю і альдегіди утворюються в наслідок неповного згоряння палива, що пов'язано з недостатньою кількістю кисню в робочій суміші, або з поганим сумішоутворенням чи спрацьованістю поршневої групи двигуна. Перше особливо характерне для карбюраторних двигунів при роботі на багатій суміші. Тому в даний час переважно використовують інжекторне сумішоутворення. Дизелі завжди працюють із значним надлишком повітря, тому у них викид СО не великий, проте у відпрацьованих газах дизелів багато вуглеводнів; особливо сажі (чим пояснюється димність вихлопних газів).

## *Дизельні двигуни внутрішнього згорання та їх теплова характеристика*

*Загальні відомості.* Дизельний двигун – поршневий двигун внутрішнього згорання, що працює за принципом займання розпорошеного палива від зіткнення з розігрітим стисненим повітрям. Дизельні двигуни працюють на дизельному паливі (у просторіччі - "солярка"). Слід відрізнити дизельний двигун від компресійного. У компресійному двигуні стискається готова тепло-повітряна суміш.

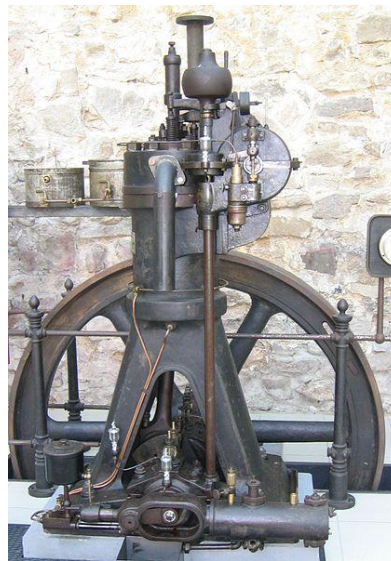


Рис. 4.20 Стационарный одноцилиндровый дизельный двигатель, Германия, Аугсбург, 1906



Рис. 4.21 Патент, виданий Рудольфу Дизелю на його винахід

В 1890 Рудольф Дизель розвинув теорію "економічного термічного двигуна", який, завдяки сильному стисненню в циліндрах, значно покращує

свою ефективність. Він отримав патент на свій двигун 23 лютого 1893 (Рис. 4.21). Перший функціонуючий зразок, названий "Дизель-мотором", був побудований Дизелем до початку 1897, і 28 січня того ж року він був успішно випробуваний.

Цікаво, що в написаній ним книзі в якості ідеального палива пропонувався кам'яновугільний пил. Експерименти ж показали неможливість використання вугільного пилу як паливо - перш за все через високі абразивні властивості як самого пилу, так і золи, що утворюється при згорянні палива; також спостерігалися великі проблеми з подачею пилу в циліндри. Зате була відкрита дорога до використання в якості палива важких нафтових фракцій. Хоча Дизель і був першим, хто запатентував двигун із запалюванням від стиснення, інженер по імені Екройд Стюарт раніше висловлював схожі ідеї. Він запропонував двигун, в якому повітря всмоктувалось в циліндр, стискувалось, а потім нагнітавалось (наприкінці такту стиснення) в ємність, у яку упорскувалось паливо. Для запуску двигуна ємність нагрівалася лампою зовні, і після запуску самостійна робота підтримувалася без підведення тепла зовні.

Екройд Стюарт не розглядав переваги роботи від високого ступеня стиснення, він просто експериментував з можливостями виключення з двигуна свічок запалювання, тобто він не звернув увагу на найбільшу перевагу - паливну ефективність.

У 1898 році на Путіловському заводі в Петербурзі інженером Густавом Трінклером був побудований перший у світі "Безкомпресорний нафтовий двигун високого тиску", тобто дизельний двигун у його сучасному вигляді з форкамерою, який назвали "Трінклер-мотором". При зіставленні двигунів будови "Дизель-мотора" і "Трінклер-мотора" російська конструкція, що з'явилася на півтора року пізніше німецької і випробувана на рік пізніше, виявилася набагато досконалішою і перспективнішою. "Трінклер-мотори" не мали повітряного компресора, а підведення тепла в них було більш поступовим і розтягнутим у часі в порівнянні з двигуном Дизеля. Російська

конструкція виявилася не тільки надійнішою і перспективнішою німецької, а й кращою.

У 1898 р. Еммануель Нобель придбав ліцензію на двигун внутрішнього згоряння Рудольфа Дизеля. Двигун пристосували для роботи на нафті, а не на гасі. З 1899 р. механічний завод "Людвіг Нобель" в Петербурзі розгорнув масове виробництво дизелів. У 1900 р на Всесвітній виставці в Парижі двигун Дизеля одержав Гран-прі, чому сприяла звістка, що завод Нобеля в Петербурзі налагодив випуск двигунів, що працювали на сирій нафті. Цей двигун отримав в Європі назву "російський дизель".

В даний час використовується термін "двигун Дизеля", "дизельний двигун" або просто "дизель", оскільки теорія Рудольфа Дизеля стала основою для створення сучасних двигунів із запалюванням від стиснення. Надалі близько 20-30 років такі двигуни широко застосовувалися в стаціонарних механізмах і силових установках морських суден, однак існуючі тоді системи упрощування палива не дозволяли застосовувати дизелі у високошвидкісних агрегатах. Невелика швидкість обертання, значна вага повітряного компресора, необхідного для роботи системи упорскування палива зробили неможливим застосування перших дизелів на автотранспорті.

В 20-і роках ХХ століття німецький інженер Роберт Бош удосконалив вбудований паливний насос високого тиску, пристрій, який широко застосовується і в наш час. Використання гідравлічної системи для нагнітання і упрощування палива дозволило відмовитися від окремого повітряного компресора і зробило можливим подальше збільшення швидкості обертання. Затребуваний в такому вигляді високообертовий дизель став користуватися все більшою популярністю як силовий агрегат для допоміжного та громадського транспорту, однак доводи на користь двигунів з електричним запалюванням (традиційний принцип роботи, легкість і невелика ціна виробництва) дозволяли їм користуватися великим попитом для установки на пасажирських і невеликих вантажних автомобілях, В 50 - 60-і роки минулого століття дизель встановлюється у великих кількостях на



вантажних автомобілях і автофургонах, а в 70-ті роки, після різкого зростання цін на паливо, на нього звертають серйозну увагу світові виробники недорогих маленьких пасажирських автомобілів.

У подальші роки відбувається зростання популярності дизельних двигунів для легкових і вантажних автомобілів, не тільки через економічність і довговічність дизеля, але також через меншу токсичність викидів в атмосферу. Всі провідні європейські виробники автомобілів в даний час пропонують як мінімум по одній моделі з дизельним двигуном.

Дизельні двигуни застосовуються також на залізниці. Локомотиви, які використовують дизельний двигун - тепловози - є основним видом локомотивів на неелектрифікованих ділянках, конкурують з електровозами за рахунок автономності, перевозять до 40% вантажів і пасажирів в Україні і виконують 98 % маневрової роботи. Існують також одиночні автотриси, дрезини, та мотовози, які використовуються на електрифікованих та неелектрофікованих ділянках для обслуговування та ремонту залізниці та об'єктів інфраструктури. Іноді автотриси та невеликі дизель-потяги називають рельсовими автобусами.

### ***Принцип роботи чотирьохтактного дизельного двигуна***

1-й такт. Впуск. Клапан впуску відкривається, повітря поступає в циліндр і клапан одразу закривається.

2-й такт. Стискання. Поршень, рухаючись до ВМТ (верхньої мертвої точки) стискає повітря в 16 (в тихохідних)-20(в швидкохідних) разів, після чого в гарячому середовищі розпилюється паливо через форсунку.

3-й такт. Робочий хід. Горіння, розширення. Після розпилення палива в гарячому повітрі воно згорає, рухаючи поршень вниз. (Підпалення солярки відбувається після того, як поршень майже досяг верхньої мертвої точки за рахунок високої температури стиснутого повітря).

4-й такт. Випуск. Поршень рухається вниз, клапан випуску відкривається, відбувається випуск и продувка.

Далі повторюються всі 4 такти.

В залежності від конструкції камери згоряння, існує декілька типів дизельних двигунів:

Дизель с нерозділеною камерою ("дизель с безпосереднім упорскуванням"): камера згоряння виконана в поршні, а паливо упорскується в надпоршневий простір. Головна перевага - мінімальна витрата палива. Недолік - підвищений шум, особливо на обертах холостого ходу. Зараз ведуться інтенсивні роботи по усуненню вказаного недоліку. Наприклад, в системі Common Rail для зниження жорсткості роботи використовується (частіше багатостадійний) попереднє упорскування.

Дизель з роздільною камерою: паливо подається в додаткову камеру. В більшості дизелів така камера (вона називається вихровою або форкамерою) пов'язана з циліндром спеціальним каналом так, щоб при стисканні повітря, потрапляючи в камеру, інтенсивно закручувалось. Це сприяє хорошему перемішуванню палива, яке упорскується за повітрям і самозайманню суміші. Така схема вважалась оптимальною і широко використовувалась. Однак, в наслідок гіршої економічності, останні два десятиліття йде активне витіснення таких дизелів двигунами з безпосереднім упорскуванням палива і з системами подачі палива Common Rail.

### ***Принцип роботи двохтактного дизельного двигуна***

Крім вищеописаного чотирьохтактного циклу, можливе використання двохтактного циклу. Поршень йде вниз, відкриваючи впускне и випускне вікна. Повітря поступає в циліндр і в цей же час виходять відпрацьовані гази. Коли поршень йде вверх всі вікна закриваються. Відбувається стиснення – це перший такт. Через форсунки розпилюється паливо і воно загоряється. Відбувається такт розширення – поршень йде вниз і знову відкривається всі вікна и т. д.

Для здійснення продувки в нижній частині циліндра зроблені продувочні вікна. Коли поршень знаходиться внизу, вікна відкриті. Коли поршень піднімається, він перекриває вікна.

Вікна можуть використовуватися і для випуску відпрацьованих газів, і для впуску свіжого повітря; така продувка називається щільовою. Існує також клапанно-щільова продувка, коли відпрацьовані гази випускаються через клапан в головці циліндра, а вікна використовуються тільки для впуску свіжого повітря. Є також двигуни, де в кожному циліндрі знаходяться два зустрічно рухомі поршні; кожний поршень керує своїми вікнами – один впускними, другий випускними (така система використовувалась на тепловозах ТЕЗ и ТЕ10, танкових двигунах 4ТПД, 5ТД(Ф) (Т-64), 6ТД (Т-80УД), 6ТД-2 (Т-84), в авіації – на бомбардировщиках Юнкерс).

Оскільки в двотактному циклі робочі ходи відбуваються вдвічі частіше, то можна б очікувати двократного підвищення потужності у порівнянні з чотиритактним циклом. На практиці це не вдається реалізувати, і двотактний дизель потужніше такого ж по об'єму чотиритактного максимум в 1,6-1,7 рази.

В наш час двотактні дизелі широко використовуються тільки на великих морських суднах з безпосереднім (безредукторним) приводом гребного гвинта. При неможливості підвищення частоти обертання двотактний цикл виявляється вигідним; такі тихохідні дизелі мають потужність до 100 000 к.с.

У зв'язку з тим, що організувати продувку вихрової камери (або передкамери) при двотактному циклі складно, двотактні дизелі будують тільки з нероздільними камерами згоряння.

## Варіанти конструкції

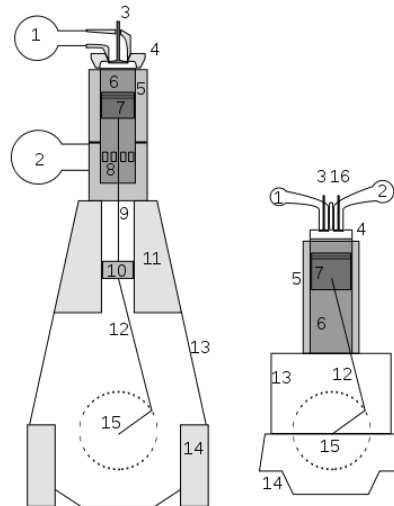


Рис. 4.22 Крейцкопфний (зліва) и тронковий (справа) двигуни.  
Номером 10 позначений крейцкопф.

Двигуни можуть бути тронковими (коли шатун безпосередньо приєднується до поршня) і крейцкопфними (коли верхня частина шатуна приєднується к крейцкопфу – спеціальної ковзаючої конструкції, яка з'єднується з поршнем штоком). Крейцкопфні двигуни дозволяють знизити знос циліндра и поршня, оскільки вони вільні від бокових зусиль; проте тронкові двигуни набагато менші за розміром и вагою. В наш час крейцкопфні двигуни використовуються тільки на великих морських суднах.

Крейцкопфні двигуни можуть бути подвійної дії, коли робочі порожнини влаштовуються з обох сторін поршня або 2 поршня рухаються назустріч. Через складність конструкції двигуни подвійної дії майже не використовують.

## *Реверсивні двигуни*



Рис. 4.23 Цех судових дизелів заводу "Даймлер-Бенц" в Штутгарті

Більшість ДВЗ розраховані на обертання тільки в одну сторону; якщо потрібно отримати на виході обертання в різні сторони, то використовують передачу заднього ходу в коробці зміни передач або окремий реверс-редуктор. Електрична передача також дозволяє змінювати напрямок обертання на виході.

Однак на судах с жорстким з'єднанням двигуна с гребним гвинтом доводиться застосовувати реверсивні двигуни, щоб мати можливість рухатися заднім ходом. Для цього слід змінити фази відкриття клапанів і упорскування палива. Зазвичай розподільчі вали забезпечуються подвійною кількістю кулачків; при зупиненому двигуні спеціальний пристрій піднімає штовхачі клапанів, що дає можливість перемістити розподільчі вали в нове положення. Зустрічаються також конструкції з реверсивним приводом розподільного вала - тут при зміні напрямку обертання колінчастого вала зберігається напрямок обертання розподільного вала. Двохтактні двигуни з контурною продувкою, коли газорозподіл здійснюється поршнем, не мають

потреби в спеціальних реверсивних пристроях (однак вони все ж потребують коректировки моменту упорскування палива).

Реверсивні двигуни також використовувались на ранніх тепловозах з жорстким з'єднанням вала двигуна з колесами.

### ***Переваги та недоліки дизельних і бензинових двигунів***

Бензиновий двигун є досить неефективним але здатний перетворювати лише 20-30 % енергії палива в корисну роботу. Стандартний дизельний двигун має коефіцієнт корисної роботи 30-40 %, дизелі з турбонадувом и проміжним охолодженням вище 50 % (наприклад, MAN S80ME-C7 витрачає тільки 155 г на кВт/год, досягаючи ефективності 54,4 %). Дизельний двигун завдяки використанню упорскування високого тиску не вимогливий до летучості палива, що дозволяє використовувати в ньому низькосортні важкі масла.

Дизельний двигун не може розвивати високі оберти – суміш не встигає догорати в циліндрах. Це призводить до зниження граничної потужності двигуна на 1 л об'єму, а значить, і до зниження граничної потужності на 1 кг маси двигуна. Це послужило причиною малого розповсюдження дизелів в авіації (тільки деякі бомбардувальники Юнкерс, а також радянський важкий бомбардувальники Пе-8 и Ер-2, облаштовані авіаційними дизелями АЧ-30 и АЧ-40 конструкції А. Д. Чаромского и Т. М. Мелькумова). На максимальній експлуатаційній потужності суміш в дизелі не догоряє, що спричиняє інтенсивний викид золи.

Дизельний двигун не має дросельної заслонки (сучасні дизелі їх вже мають, поскільки виникає необхідність взаємодії з системою EGR, процесом керує електроніка/програмістика), регулювання потужності здійснюється кількістю упорскуваного палива, так як дизель (справний) завжди працює на збіднілих сумішах (несправний - чадить). Це призводить до відсутності зниження тиску в циліндрах на низьких обертах. Тому дизель дає високий обертовий момент при низьких обертах, що робить автомобіль с дизельним

двигуном більш "керованим" в русі, ніж такий же автомобіль с бензиновим двигуном. З цієї причини в наш час більшість вантажних автомобілів оснащуються дизельними двигунами. Це є перевагою також і в двигунах морських суден, так як високий обертовий момент при низьких обертах робить більш легким ефективне використання потужності двигуна, а більш високий теоретичний ККД дає більш високу паливну ефективність.

У порівнянні з бензиновими двигунами, в вихлопних газах дизельного двигуна, як правило, менше окису вуглецю (СО), але зараз, у зв'язку з застосуванням каталітичних конвертерів на бензинових двигунах, ця перевага не так помітна. Основні токсичні гази, які наявні в вихлопі в значних кількостях – це вуглеводні (НС або СН) , оксиди (окисли) азоту (NO x) та сажа (або її похідні) в формі чорного диму. Вони можуть призвести до астми та раку легень. Більш за все забруднюють атмосферу дизелі вантажівок та автобусів, які часто являються старими і не відрегульованими.

Другим важливим аспектом, який стосується безпеки, є те, що дизельне паливо нелетуче (тобто легко не випаровується) і, таким чином, вірогідність пожежі у дизельних двигунах набагато менше, тим більше, що в них не використовується система запалення. Разом з високою паливною економічністю це стало причиною широкого використання дизелів на танках, оскільки в буденній мирній експлуатації зменшується ризик виникнення пожежі в моторному відділі через протікання палива. Менша пожежонебезпечність дизельного двигуна в бойових умовах є міфом, оскільки при пробитті броні снаряд або його осколки мають температуру, яка значно перевищує температуру спалаху парів дизельного палива і так само здатні досить легко підпалити витікаюче горюче. Детонація суміші парів дизельного палива з повітрям в пробитому паливному баку по своїм наслідкам порівняна з вибухом боєкомплекту, наприклад, у танках Т-34 вона призводила до розриву зварних швів і вибиванню верхньої лобової деталі бронекорпуса. З іншої сторони, дизельний двигун в танкобудуванні поступається карбюраторному в плані граничної потужності , а в ряді

випадків (висока потужність при малому об'ємі моторного відділу) більш виграшним може бути використання саме карбюраторного силового агрегата (хоча це характерно для надто легких бойових одиниць).

Звичайно, існують і недоліки, серед яких – характерний стук дизельного двигуна при його роботі та маслянистість палива. Однак, вони стають помітні в основному власниками автомобілів з дизельними двигунами, а для сторонньої людини практично непомітні.

Явними вадами дизельних двигунів є необхідність використання стартера великої потужності, помутніння та застигання (запарафінування) літнього дизельного палива при низьких температурах, складність і вища ціна в ремонті паливної апаратури, так як насоси високого тиску є пристроями, виготовленими з високою точністю. Також дизель-мотори вкрай чутливі до забруднення палива механічними частинками і водою. Такі забруднення дуже швидко виводять паливну апаратуру з ладу. Ремонт дизель-моторів, як правило, значно дорожче ремонту бензинових моторів аналогічного класу. Літрова потужність дизельних моторів також, як правило, поступається аналогічним показникам бензинових моторів, хоча дизель-мотори мають більш рівний і високий крутний момент. Екологічні показники дизельних двигунів значно поступалися до останнього часу двигунам бензиновим. На класичних дизелях з механічно керованим упрощуванням можлива установка тільки окисних нейтралізаторів відпрацьованих газів, що працюють при температурі відпрацьованих газів понад 300 °С, що окислюють тільки СО і СН до нешкідливих для людини вуглекислого газу (СО<sub>2</sub>) і води. Також нейтралізатори виходять з ладу внаслідок враження їх сполуками сірки (кількість з'єднань сірки у відпрацьованих газах безпосередньо залежить від кількості сірки в дизельному паливі) і відкладенням на поверхні каталізатора частинок сажі. Ситуація почала змінюватися лише в останні роки у зв'язку з впровадженням дизелів так званої системи Common rail. У даному типі дизелів упрощування палива здійснюється електронно-керованими форсунками. Подачу керуючого



електричного імпульсу здійснює електронний блок управління, який одержує сигнали від набору датчиків. Датчики ж відстежують різні параметри двигуна, що впливають на тривалість і момент подачі паливного імпульсу. Так що, за складністю сучасний дизель-мотор нічим не поступається бензиновому, а по ряду параметрів і значно його переверщує. Так, наприклад, якщо тиск палива в форсунках звичайного дизеля з механічним уприскуванням складає від 100 до 400 бар, то в новітніх системах "Common-rail" він перебуває в діапазоні від 1000 до 2500 бар, що тягне за собою чималі проблеми. Також каталітична система сучасних транспортних дизелів значно складніше бензинових моторів, так як каталізатор повинен "вміти" працювати в умовах нестабільного складу вихлопних газів, а в деяких випадках потрібне введення так званого "фільтр сажі" (DPF - фільтр твердих частинок). "Фільтр сажі" представляє собою подібний звичайному каталітичному нейтралізатору пристрій, що встановлюється між вихлопним колектором дизеля і каталізатором в потоці вихлопних газів. У фільтрі сажі розвивається висока температура, при якій частинки сажі здатні окислитися залишковим киснем, що містяться у вихлопних газах. Однак частина сажі не завжди окислюється, і залишається в "фільтр сажі", тому програма блоку управління періодично переводить двигун в режим "очищення фільтр сажі" шляхом так званої "постінжекції", тобто уприскування додаткової кількості палива в циліндри в кінці фази згоряння з метою підняття температури газів, і, відповідно, очищення фільтру шляхом спалювання накопиченої сажі.

Стандартною в конструкціях транспортних дизель-моторів стала наявність турбонагнітача, а в останні роки - і так званого "інтеркулера" – тобто пристрою, що охолоджує повітря після стиснення турбонагнітачем – щоб після охолодження отримати велику масу повітря (кисню) в камері згоряння при колишній пропускну здатності колекторів, а нагнітач дозволяє підняти питомі потужнісні характеристики масових дизель-моторів, тому що дозволяє пропустити за робочий цикл більшу кількість повітря через циліндри.

У своїй основі конструкція дизельного двигуна подібна до конструкції бензинового двигуна (Отто). Однак, аналогічні деталі у дизеля зазвичай важче і більш стійкі до високих тисків стиснення, які мають місце у дизеля, зокрема, хон на поверхні дзеркала циліндра більш грубий, але твердість стінок блоку циліндрів вище. Головки поршнів, також, спеціально розроблені під особливості згоряння в дизельних двигунах і часто (але не завжди) розраховані на підвищену ступінь стискування. Крім того, головки поршнів (верхні площини) в дизельному двигуні знаходяться вище (як правило) верхньої площини блоку циліндрів, коли поршень знаходиться у верхній точці свого ходу. У багатьох випадках головки поршнів містять у собі камеру згоряння ("пряме упорскування").

### ***Сфери застосування***

Дизельні двигуни застосовуються для приводу стаціонарних силових установок, на рейкових (тепловози, дизелевози) і безрейкових (автомобілі, автобуси, вантажівки) транспортних засобах, самохідних машинах і механізмах (трактори, асфальтові котки, скрепери і т. д.), а також у суднобудуванні як головних, так і допоміжних двигунів.

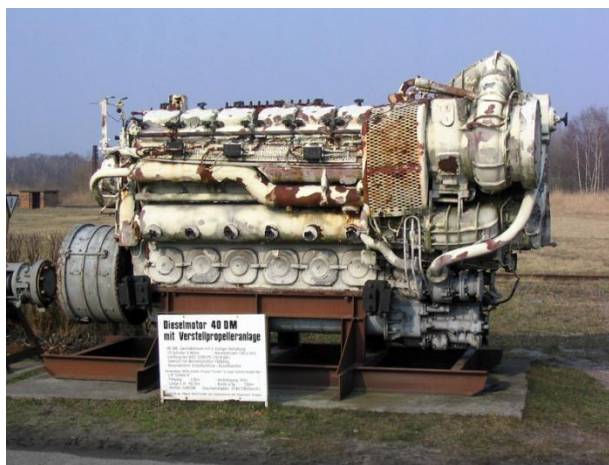


Рис. 4.24 Дизельний двигун з турбонаддувом

Сучасні дизельні двигуни з системою турбонаддува набагато ефективніші своїх попередників, а іноді і перевершують своїх бензинових атмосферних (без турбонаддува) двигунів такого ж об'єму. Про це говорить

дизельний прототип Audi R10, який виграв 24-х годинну гонку в Ле-Мані, і нові двигуни BMW, які не поступаються за потужністю атмосферним (без турбонадува) бензиновим і при цьому мають величезний крутний момент.

Правильно відрегульовані дизель лише трохи "голосніше" бензинового, що помітно лише на холостих обертах. У робочих режимах різниці практично немає. Голосно працюючий двигун свідчить про неправильну експлуатацію і можливі несправності. Насправді старі дизелі з механічним упорскуванням дійсно відрізняються досить жорсткою роботою. Тільки з появою акумуляторних паливних систем високого тиску ("Common-rail") у дизельних двигунів вдалося значно знизити шум, насамперед за рахунок розділення одного імпульсу упорскування на кілька (типово - від 2-х до 5-ти імпульсів).

Незважаючи на те, що питома теплота згоряння дизельного палива (42,7 МДж / кг) менше, ніж у бензину (44-47 МДж / кг), основна економічність обумовлена більш високим ККД дизельного двигуна. У середньому сучасний дизель витрачає палива до 30% менше. Термін служби дизельного двигуна дійсно набагато більше бензинового і може досягати 400-600 тисяч кілометрів. Запчастини для дизельних двигунів також дещо дорожче, як і вартість ремонту. Незважаючи на всі перераховані вище причини, витрати на експлуатацію дизельного двигуна при правильній експлуатації будуть меншими, ніж у бензинового.

При правильній експлуатації і підготовки до зими проблем з двигуном не виникне. Наприклад дизельний двигун VW-Audi 1,9 TDI (77 кВт/105 к.с.) оснащений системою швидкого запуску: нагрів свічок розжарювання до 1000 градусів здійснюється за 2 с. Система дозволяє заводити двигун в будь-яких кліматичних умовах без передпускового розігріву.

Дизельний двигун не можна переобладнати під використання в якості палива більш дешевого газу.

Першими прикладами роботи дизельних двигунів на більш дешевому паливі – газі порадували ще в 2005 році італійські тюнінгові фірми, які

використовували як паливо метан. В даний час успішно зарекомендували себе варіанти застосування газодизеля на пропані, а також – кардинальні рішення з переобладнання дизеля в газовий двигун, який має перевагу перед аналогічним мотором, переобладнаним з бензинового, за рахунок спочатку більш високого ступеня стиснення.

Найбільший, потужний дизельний двигун судновий, 14 циліндровий – Wrtsil-Sulzer RTA96-C, створений фінською компанією Wrtsil в 2002 році, для установки на великі морські контейнеровози і танкери, є найбільшим дизелем у світі. Його технічна характеристика: конфігурація - 14 циліндрів в ряд; робочий об'єм - 25 480 літрів; діаметр циліндра - 960 мм; хід поршня - 2500 мм; середній ефективний тиск - 1,96 МПа (19,2 кгс / см<sup>2</sup> потужність - 108 920 к.с. при 102 об / хв. (Віддача з літра 4,3 к.с.); крутний момент - 7571221 Н м; витрата палива - 13724 літрів на годину; суха маса - 2300 тонн; габарити - довжина 27 метрів, висота 13 метрів.

Найбільший дизельний двигун для вантажного автомобіля Caterpillar 3524B призначений, для установки на кар'єрний самоскид Caterpillar 797B, створений в 1998 році. Складається з двох суміщених двигунів Caterpillar 3512B HD. Конфігурація - два послідовно з'єднаних V-подібним 12 циліндрових мотори (24 циліндри). Робочий об'єм - 117,1 літрів. Діаметр циліндра - 170 мм. Хід поршня - 215 мм. Потужність - 3550 к.с. при 1750 об / хв. (Віддача з літра - 30,3 к.с.). Крутний момент - більше 16 000 Нм.

Найбільший, потужний серійний дизельний двигун для серійного легкового автомобіля Audi 6.0 V12 TDI з 2008 року встановлюється на автомобіль Audi Q7. Конфігурація - 12 циліндрів розміщених V-образно, кут розвалу 60 градусів. Робочий об'єм - 5934 куб. см. Діаметр циліндра - 83 мм. Хід поршня - 91,4 мм. Ступінь стиснення – 16. Потужність - 500 к.с. при 3750 об/хв. (Віддача з літра - 84,3 к.с.). Крутний момент - 1000 Нм в діапазоні 1750-3250 об / хв.

**Тепловий розрахунок двигуна.** Для виконання теплового розрахунку використовувалася програма на ЕОМ. Рідке моторне паливо нафтового походження характеризується наступним елементарним складом (за масою)

$$C + H + O = 1 \text{ кг}$$

де: C, H, O - вміст відповідно вуглецю, водню і кисню в 1 кг палива.

При виконанні розрахунків робочого циклу двигуна крім елементарного складу палива слід задати питому нижчу теплоту згоряння  $Q_n$  і середню молярну масу  $m_t$  палива.

$$C = 0.855 \text{ кг}, H = 0,145 \text{ кг}, Q_n = 115 \text{ г. / Моль}, m_t = 44000 \text{ кДж / кг}$$

Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  визначає склад горючої суміші. Його значення залежить від типу сумішоутворення, умов займання і згоряння палива, а також від режиму роботи двигуна. Коефіцієнт надлишку повітря впливає на кількість виділеної теплоти та склад продуктів згоряння.

Ступінь підігріву заряду  $D_T$  – зміна його температури при русі по впускному тракту і всередині циліндра. Значення підігріву заряду  $D_T$  залежить від конструкції і установки на двигуні впускного трубопроводу, організації його підігріву і швидкісного режиму двигуна. Підвищення  $D_T$  покращує процес випаровування палива, але при цьому знижується щільність заряду, що негативно впливає на наповнення циліндрів і потужність двигуна.

#### **4.4 Електричні станції**

*Загальні відомості.* Електричною станцією називають енергетичну установку, що слугує для перетворення природної енергії в електричну. Найбільш поширені теплові електричні станції (ТЕС), що використовують теплову енергію, яка виділяється при згорянні органічного палива (твердого, рідкого та газоподібного).

На теплових електростанціях електроенергія виробляється генератором, який приводиться в рух від теплового двигуна, частіше за все

парові, рідше газові турбіни. Менш розповсюджені (в основному у віддалених районах) дизельні електростанції.

Коефіцієнт корисної дії в сучасних ТЕС з паровими турбінами досягає 40%, з газовими – не перевищує 34%. На ТЕС з паротурбінним приводом можливе використання будь-якого виду палива; газотурбінні станції поки використовують тільки рідкі та газоподібні палива. Але парова турбіна не настільки маневрена, як газова. Справа в тому, що тиск пари, яка подається до турбіни високий (до 23,5 МПа) і корпус турбіни для забезпечення міцності дуже масивний. Це не дозволяє швидко і рівномірно прогріти парову турбіну при запуску. Газові турбіни працюють при тиску робочого тіла не більше 1 МПа, їх корпус тонший, нагрів здійснюється швидше. Тому газотурбінні агрегати на ТЕС розглядають в перспективі, як пікові – для забезпечення вироблення електроенергії при короткочасному збільшенні в її потребі – для зняття піків електричного навантаження.

З'явившись в 50-ті роки минулого століття атомні електростанції (АЕС) також мають паротурбінний привод електрогенератора. Вони відрізняються від традиційних ТЕС лише типом котла (парогенератора).

За видом отриманої енергії парові турбіни ТЕС на органічному паливі поділяються на:

- конденсаційні електричні станції (КЕС);
- теплоелектроцентралі (ТЕЦ).

На КЕС встановлені турбогенератори конденсаційного типу, вони виробляють тільки електроенергію. ТЕЦ відпускають послуги користувачам електричної та теплової енергії з паром або гарячою водою. Оскільки ТЕЦ пов'язана з підприємством або жилим районом трубопроводами, то звичайно вона розташовується безпосередньо на підприємствах, в жилих масивах або близьких від них.

КЕС пов'язані з споживачами тільки лініями електропередач, тому вони можуть знаходитись на віддаленні від споживача, наприклад, поблизу місць видобутку палива.

Великі КЕС, що забезпечують електроенергією промислові райони, називають ДРЕС (державні районні електростанції). Потужність КЕС складає до 2/3 всієї електричної потужності ТЕС нашої країни. Це – великі станції. Комплекс котел – турбіна – електрогенератор великих ТЕС, які працюють практично автономно, називають енергоблоком.

### Теплові електростанції

*Принципова схема теплової електростанції* представлена на рисунку 4.25. Варто зазначити, що в її конструкції може бути передбачено кілька контурів – теплоносій від тепловиділяючого реактора може не йти відразу на турбіну, а віддати своє тепло в теплообміннику теплоносію наступного контуру, яке вже може надходити на турбіну, а може далі передавати свою енергію до наступного контуру. Також у будові електростанції передбачена система охолодження відпрацьованого теплоносія, щоб довести температуру теплоносія до необхідного для повторного циклу. Якщо поблизу від електростанції є населений пункт, то тепло відпрацьованого теплоносія використовують для нагріву води, для опалення будинків або гарячого водопостачання, а якщо ні, то зайве тепло відпрацьованого теплоносія просто скидається в атмосферу в градирнях (які представляють з себе широкі конусоподібні труби). Конденсатором відпрацьованої пари на неатомних електростанціях найчастіше служать саме градирні.

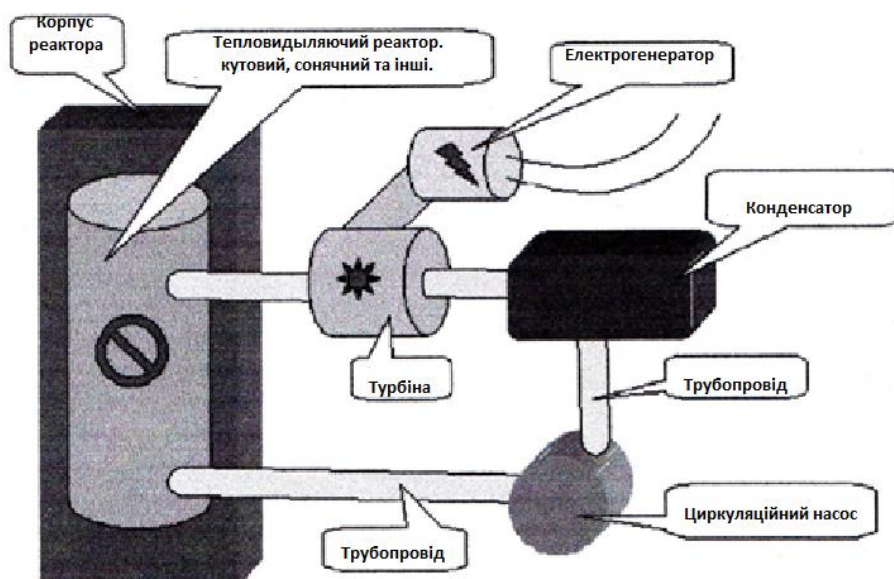


Рис. 4.25 Схема теплової електростанції

### ***Типи теплових електростанцій на органічному паливі***

Теплові електростанції характеризуються великою різноманітністю і їх можна класифікувати за різними ознаками.

За призначенням електростанції поділяються на районні та промислові.

***Районні електростанції*** – це самостійні електростанції загального користування, які обслуговують всі види споживачів району (промислові підприємства, транспорт, населення і т.д.). Районні конденсаційні електростанції, що виробляють в основному електроенергію, часто зберігають за собою історичну назву – ГРЕС (державні районні електростанції). Районні електростанції, що виробляють електричну і теплову енергію (у вигляді пари або гарячої води), називаються теплоелектроцентралями (ТЕЦ). Як правило, ГРЕС і районні ТЕЦ мають потужність більше 1 млн. кВт.

***Промислові електростанції*** – це електростанції, що обслуговують тепловою та електричною енергією конкретні виробничі підприємства або їх комплекс, наприклад завод з виробництва хімічної продукції. Промислові електростанції входять до складу тих промислових підприємств, які вони обслуговують. Їх потужність визначається потребами промислових підприємств у тепловій та електричній енергії і, як правило, вони істотно менше районних ТЕС. Часто промислові електростанції працюють на загальну електричну мережу, але не підпорядковуються диспетчеру енергосистеми.

За видом використовуваного палива теплові електростанції поділяються на електростанції, що працюють на органічному і ядерному паливі. За конденсаційними електростанціями, що працюють на органічному паливі, в ті часи, коли ще не було атомних електростанцій (АЕС), історично склалася назва теплових (ТЕС – тепла електрична станція). Саме в такому сенсі нижче буде використовуватись цей термін, хоча і ТЕЦ, і АЕС, і газотурбінні електростанції (ГТЕС), і парогазові електростанції (ПГЕС) також



є тепловими електростанціями, що працюють на принципі перетворення теплової енергії в електричну.

В якості органічного палива для ТЕС використовують газоподібне, рідке і тверде паливо. Більшість ТЕС особливо в Європі в якості основного палива споживають природний газ, а в якості резервного – мазут, використовуючи останній, зважаючи на високу вартість, тільки в крайніх випадках. Такі ТЕС називають газомазутними. У багатьох регіонах основним паливом є енергетичне вугілля – низькокалорійне вугілля або відходи видобутку висококалорійного кам'яного вугілля (антрацитовий штиб – АШ). Оскільки перед спалюванням таке вугілля розмелюють в спеціальних млинах до пилоподібного стану, то такі ТЕС називають пилувугільними.

За типом теплосилових установок, що використовуються на ТЕС для перетворення теплової енергії в механічну енергію обертання роторів турбоагрегатів, розрізняють газотурбінні і парогазові електростанції.

Основою паротурбінних електростанцій є установки (ПТУ), які для перетворення теплової енергії в механічну використовують саму складну, найпотужнішу і надзвичайно досконалу енергетичну машину – парову турбіну. ПТУ – основний елемент ТЕС, ТЕЦ і АЕС.

Газотурбінні теплові електростанції (ГТЭС) оснащуються газотурбінними установками (ГТУ), що працюють на газоподібному або, в крайньому випадку, рідкому (дизельному) паливі. Оскільки температура газів на ГТУ досить висока, то їх можна використовувати для відпуску теплової енергії зовнішньому споживачу. Такі електростанції називають ГТУ-ТЕЦ.

Традиційна сучасна газотурбінна установка (ГТУ) – це сукупність повітряного компресора, камери згоряння і газової турбіни, а також допоміжних систем, що забезпечують її роботу. Сукупність ГТУ та електричного генератора називають газотурбінним агрегатом.

Парогазові теплові електростанції комплектуються парогазовими установками (ПГУ), що представляють комбінацію ГТУ і ПТУ, що дозволяє

забезпечити високу економічність. ПГУ-ТЕС можуть виконуватися конденсаційними (ПГУ-КЕС) і з відпуском теплової енергії (ПГУ-ТЕЦ).

Блокові ТЕС складаються з окремих, як правило, однотипних енергетичних установок – енергоблоків. В енергоблоці кожен котел подає пару тільки для своєї турбіни, з якої він повертається після конденсації тільки в свій котел. За блоковою схемою будують всі потужні ДРЕС і ТЕЦ, які мають так званій проміжний перегрів пари. Робота котлів і турбін на ТЕС з поперечними зв'язками забезпечується по іншому: всі котли ТЕС подають пару в один загальний паропровід (колектор) і від нього живляться всі парові турбіни ТЕС. За такою схемою будуються КЕР без проміжного перегріву і майже всі ТЕЦ на докритичних початкових параметрах пари.

За рівнем початкового тиску розрізняють ТЕС докритичного, надкритичного і супернадкритичного тиску. Критичний тиск – це 22,1 МПа (225,6 ат.)

### **Теплові електростанції в Україні**

Розміщення теплових електростанцій залежить переважно від наявності паливно-енергетичних ресурсів і споживачів електроенергії. Нині майже третина електроенергії виробляється у районах споживання і понад 2/3 у районах її виробництва. Поки що місце для будівництва ДРЕС вибирають, враховуючи зручність транспортування палива й електроенергії та екологічну обстановку.

Найпоширеніші в Україні теплові електростанції, які за характером обслуговування споживачів є районними (ДРЕС). Вони виробляють майже 2/3 усієї електричної енергії в державі. За останні 30 років потужність цих станцій зросла у 5 разів. Частка вугілля в структурі палива, яке використовують ТЕС, велика. Перевагою ТЕС є відносно вільне розміщення, вдвоє менший обсяг капіталовкладень у них порівняно з ГЕС. Найбільшими ДРЕС в Україні є Вуглегірська, Старобешівська, Курахівська, Слов'янська, Криворізька, Придніпровська, Бурштинська, Запорізька, Ладизинська, Трипільська та ін. Дедалі більшого значення набувають

теплоелектроцентралі, споруджені поблизу споживача, оскільки радіус транспортування від них тепла невеликий (10-12 км.), а коефіцієнт корисного використання тепла становить майже 70%, тоді як на ТЕС – тільки 30-35%. Теплоелектроцентралі обігрівують понад 25 міст України. Найбільші з них – Київська ТЕЦ-5, Дарницька (Київ), Київська ТЕЦ-6, Харківська ТЕЦ-5, Одеська, Калуська, Краматорська.

Головна тенденція розвитку електроенергетики України – об'єднання електростанцій в енергосистеми, які здійснюють виробництво, транспортування і розподіл електроенергії між споживачами. Це зумовлено потребою ритмічного забезпечення споживачів електроенергією, для виробництва і споживання якої характерні не тільки сезонні, а й добові коливання.

Енергосистеми дають змогу маневрувати у виробництві електроенергії як у часі, так і в просторі. Відхилення пікових навантажень в окремих ланках енергосистем уможлиблює в разі потреби перекидання електроенергії в зустрічних напрямках із заходу на схід і з півночі на південь. У процесі транспортування електроенергії на значну відстань її втрати неминучі, вони збільшуються із зростанням відстаней, проте можуть зменшуватися при підвищенні напруги передачі. Тому будівництво високовольтних ліній є досить актуальним.

Останнім часом в енергосистемі України сталися значні зміни. Створено об'єднану енергетичну систему України (ОЕС). 4 державні акціонерні енергогенеруючі компанії (ДАЕК), до яких увійшли всі ТЕС потужністю, понад 500 МВт кожна (“Донбасенерго”, “Дніпроенерго”, “Центроенерго”, “Західенерго”) і дві Гідроенеруючі компанії (“Дніпрогідроенерго”, “Дністрогідроенерго”). Діють 24 обласні енергопостачальні компанії та дві міські (Київська, Севастопольська. Всі 5 АЕС входять в об'єднання “Енергоатом”. Об'єднана енергосистема України пов'язана з енергосистемами сусідніх з нею держав.

Теплові електростанції здійснюють значний вплив на навколишнє середовище.

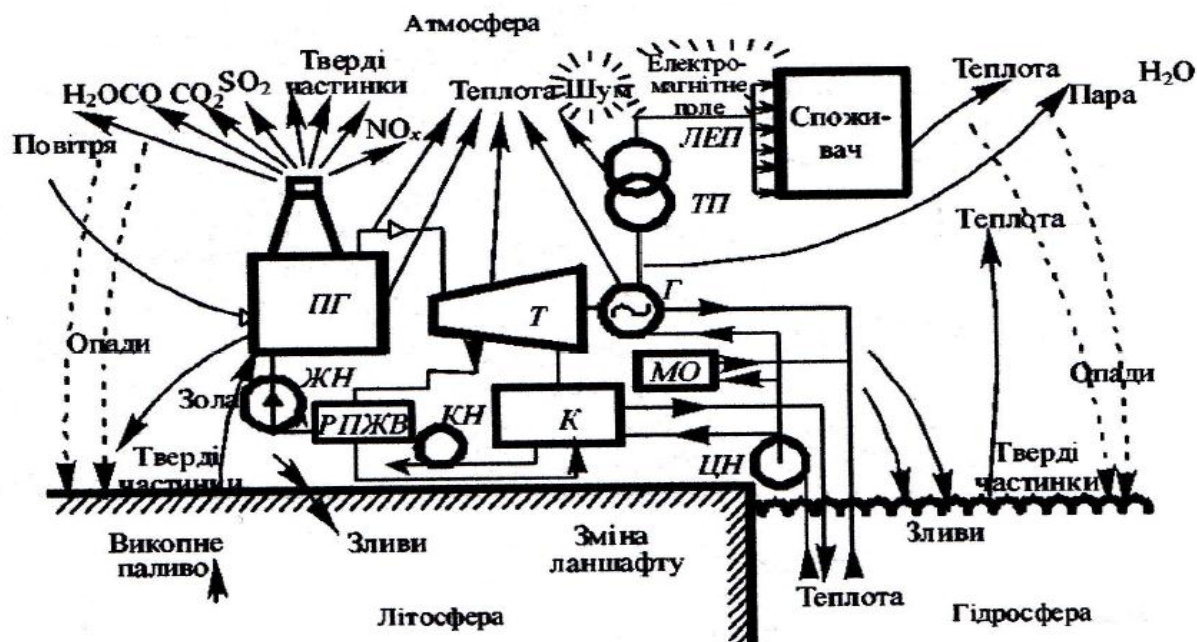


Рис. 4.26 – Схема взаємодії ТЕС з навколишнім середовищем:

ПГ – парогенератор; Т – турбіна; К – конденсатор; ЖН, КН, ЦН – відповідно живильні, конденсатні і циркуляційні насоси; РПЖВ – регенеративний підігрів живильної води; Г – генератор електричного струму; МО – масоохолоджувач; ТП – трансформаторна підстанція; ЛЕП – лінії електропередач.

### Атомні електростанції

*Загальні відомості.* Атомна електростанція (АЕС) – електростанція, в якій атомна енергія перетворюється в електричну. Генератором енергії на АЕС є атомний реактор. Тепло, яке виділяється в реакторі в результаті ланцюгової реакції ділення ядер деяких важких елементів, потім так само, як і на звичайних теплових електростанціях (ТЕС), перетворюється в електроенергію. На відміну від теплоелектростанцій, що працюють на органічному паливі, АЕС працює на ядерному пальному (в основному  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ).

20 грудня 1951 року ядерний реактор вперше в історії людства виробив придатну для використання кількість електроенергії – в нинішній Національній Лабораторії INEEL департаменту енергії США. Реактор

виробив достатню потужність, щоб запалити простий ланцюжок з чотирьох лампочок 100-Ват.

Того ж дня експериментальний реактор-брідер EBR-1, підвищив потужність до 100 кіловат, що було достатньо для живлення його електроустаткування. Перша експериментальна мета EBR-1 полягала в розробці і перевірці концепції реактора-брідера. 4 червня 1953 року Комісія з Атомної Енергії США оголосила, що реактор EBR-1 став першим реактором у світі, що продемонстрував брідинг плутонію з урану.

У 1962 році він став першим у світі реактором з плутонієвою активною зоною, який виробив електроенергію. Протягом всього наступного року, він був джерелом цінних даних з брідингу в реакторі з плутонієвим паливом і допомагав вченим краще зрозуміти поведінку плутонію в реакторі.

Перша в світі АЕС дослідно-промислового призначення потужністю 5 МВт була пущена в СРСР 27 червня 1954 р. в Обнінську. До цього енергія атомного ядра використовувалась переважно у військових цілях. Пуск першої АЕС ознаменував відкриття нового напрямку в енергетиці, що отримав визнання на 1-ій Міжнародній науково-технічній конференції з світового використання атомної енергії (серпень 1955, Женева).

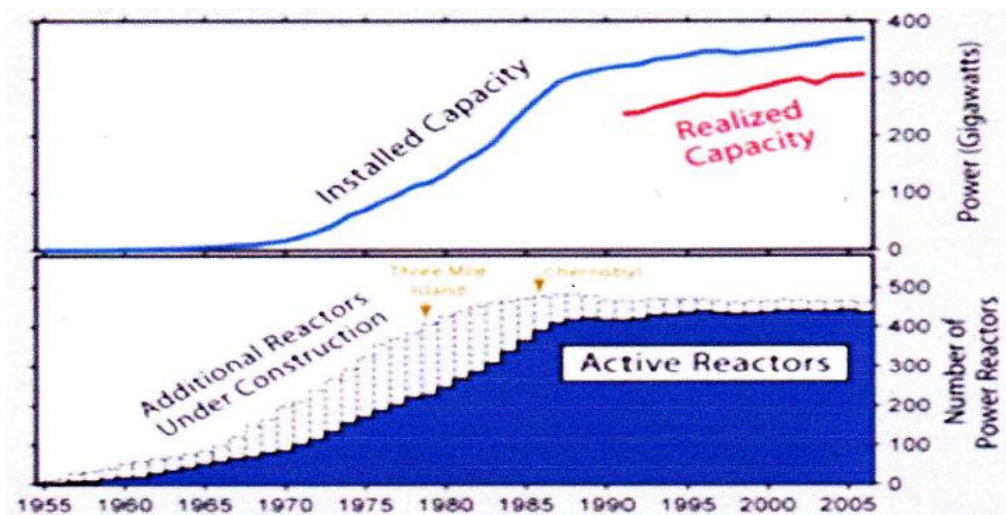


Рис. 4.27. Історія розвитку світової ядерної енергетики по роках:  
\*Верхній графік – кількість енергії (Гігават), що виробляється АЕС, \*  
Нижній – кількість АЕС, що діють.

В Україні діють 4 атомних електростанції з 15 енергоблоками, одна з яких, Запорізька АЕС з 6 енергоблоками загальною потужністю в 6000 МВт є найпотужнішою в Європі. У 2009 році відсоток ядерної енергетики склав 48% від усього виробництва електроенергії в Україні. Загальна потужність АЕС склала 13 835 МВт.

Чорнобильська атомна електростанція (ЧАЕС) – у м. Прип'ять (Київська обл.); на ній у квітні 1986 року сталась одна з найбільших в історії людства техногенна катастрофа (Чорнобильська аварія), внаслідок чого тривали і тривають досі значні трудомісні і капіталомісні аварійні роботи, заходи з реабілітації постраждалих територій (т.зв. Чорнобильська зона) і населення, яке на них проживало і проживає. Аварія на ЧАЕС спонукала людство переглянути райдужні перспективи зростання частки “мирного атому” у загальному видобутку електроенергії у світі; у більшості АЕС світу були прийняті додаткові заходи і системи захисту і безпеки, а в самій Україні до 22 жовтня 1993 року діяв мораторій на будівництво нових АЕС.

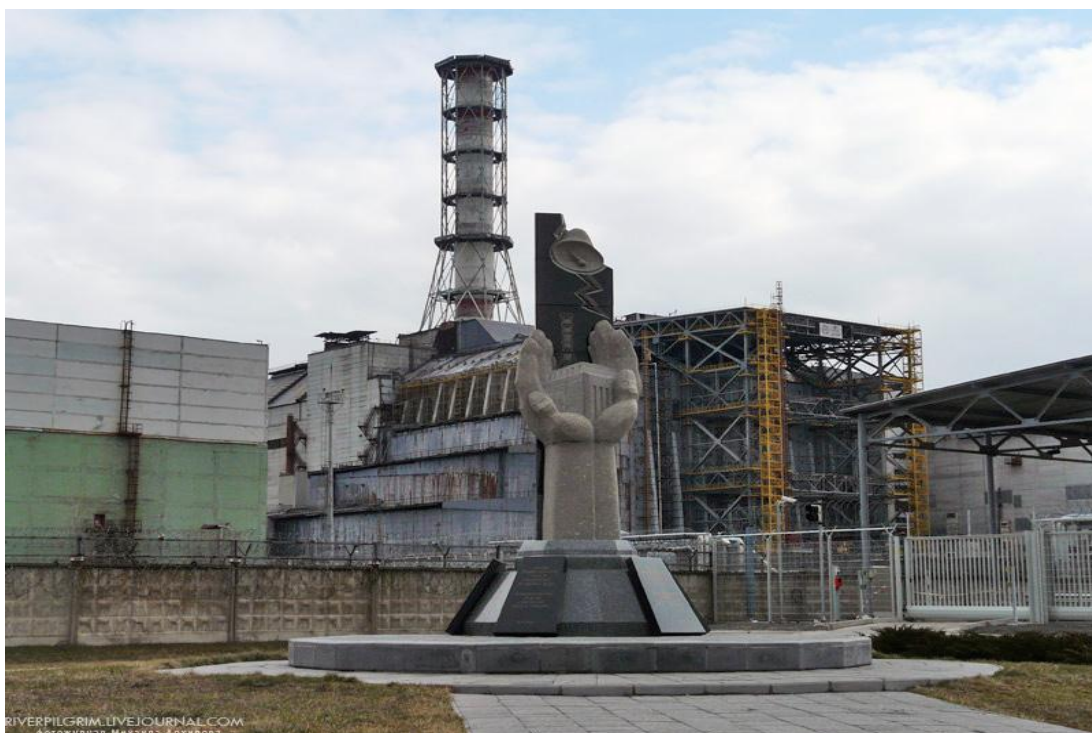


Рис. 4.28 Чорнобильська атомна електростанція



Понад 20 років ЧАЕС лишалась діючою АЕС, а її закриття стало однією з вимог до України з боку ЄС, а також передумовою для вступу України до СОТ.

Південноукраїнська АЕС – атомна електростанція, розташована в степовій зоні на лівому березі річки Південний Буг, при Ташлицькому водосховищі, неподалік (на схід) від міста Південноукраїнське, що в Миколаївській області. Збудована у 1975-1982 роках.

Щорічне вироблення електроенергії на АЕС перевищує 17 млрд кіловат-годин, що перевищує 10% загальнодержавного виробництва електроенергії і близько 20% її виробництва атомними електростанціями України. Південноукраїнська АЕС обсягом генеруючої енергії забезпечує умови для життя і роботи регіону з населенням понад 5 мільйонів людей. Потужності АЕС достатньо, щоб задовольнити потреби в електроенергії населення, промисловості та сільського господарства Миколаївської, Одеської, Херсонської областей.



Рис. 4.29 Південноукраїнська атомна електростанція.

Хмельницька АЕС (ХАЕС) – розташована на території Хмельницької області в місті Нетішин. На електростанції працює 2 ядерних реактори ВВЕР-

1000 (підключені у 1987 і 2004 роках відповідно) загальною потужністю 2000 МВт. Основне призначення станції – покриття дефіциту електричних потужностей в Західному регіоні України.

За проектом АЕС повинна була мати 4 енергоблоки. У 1981 році почато будівництво. В кінці 1987 року введений перший енергоблок. Підготовлені майданчики для ще трьох блоків. Другий енергоблок почали будувати в 1983 році, пуск планувався в кінці 1991.

У 1990 році Верховна Рада України оголосила мораторій на будівництво нових АЕС, під час дії якого на Хмельницькій станції були змонтовані основні технологічні вузли і підготовлений персонал для роботи на другому блоці. Реакторні установки нових блоків Х-2/Р-4 належать до серії енергетичних реакторів (ВВЕР-1000), аналогічні встановлені на 60% ядерних реакторів в усьому світі. Радіоактивні викиди в атмосферу на них суворо контролюються.

Споруду Хмельницького-2 відновили в 1993 році, проте через недостатнє фінансування будівельні роботи йшли повільно, з середини 2002 року вони були значно прискорені. У липні 2004 року відбувся фізичний, а 8 серпня – енергетичний пуск 2-го енергоблоку ХАЕС. 7 вересня 2005 року Державна приймальна комісія підписала акт про введення другого блоку ХАЕС в промислову експлуатацію.

За 2007 рік Хмельницькою АЕС вперше вироблено 14 785,3 млн кВт. У 2007 році експерти місії OSART/МАГАТЕ, що на запрошення Уряду України провели перевірку стану дотримання безпеки і культури виробництва, дали високу оцінку Хмельницькій АЕС.

У вересні 2012 року Верховна Рада України ухвалила закон України «Про розміщення, проектування та будівництво енергоблоків № 3 і 4 Хмельницької атомної електростанції », який передбачає схвалення будівництва 3-го та 4-го енергоблоків АЕС.





Рис. 4.30 Хмельницька атомна електростанція.

Рівненська АЕС (РАЕС) – перша в Україні атомна електростанція з енергетичним водо-водяним реактором типу ВВЕР-440 (В-213), розташована біля міста Кузнецовськ, Володимирецький район.

Рівненська АЕС розташована на західному Поліссі, біля річки Стир. Відлік своєї історії станція веде з 1971 року, коли почалося проектування Західно-Української АЕС, яку пізніше перейменували в Рівненську АЕС.

Будівництво станції почалося в 1973 році. Два перших енергоблоки з реакторами ВВЕР-440 уведені в експлуатацію в 1980-1981 роках, а 3-й енергоблок – мільйонник – в 1986 році.

На початку 1989 року на Рівненській АЕС працювала комісія МАГАТЕ. До її складу входили провідні спеціалісти Японії, США, Канади, Франції, Німеччини, Фінляндії й інших країн світу. Закордонні експерти й спостерігачі високо оцінили рівень безпеки станції. Європейський Союз обрав Рівненську станцію базовою для виконання ряду міжнародних проектів.

Будівництво 4-го енергоблоку РАЕС розпочалося в 1984 році, а в 1991 році передбачалося введення його в експлуатацію. Однак саме тоді роботи призупинили внаслідок мораторію Верховної Ради на спорудження ядерних об'єктів на території України.

Будівництво відновилося в 1993 році після скасування мораторію. 10 жовтня 2004 року 4-й енергоблок Рівненської АЕС був уведений в експлуатацію. Реакторна установка нового блоку Рівненської АЕС належить до сучасної серії (ВВЕР-1000).

Протягом останніх років РАЕС виробляє близько 11-12 млрд кВт, яка становить 16% виробництва на атомних електростанціях.



Рис. 4.31 Рівненська атомна електростанція, Кузнецовськ.

На працюючих українських АЕС встановлено 15 енергоблоків потужністю 13888 МВт, які виробляють 40≈50% від загального обсягу електроенергії в Україні. У 2010 році частка АЕС у виробленні електроенергії по Україні склала 47,4%.

***Фізичні процеси роботи атомних електростанцій.*** Процеси, що відбуваються в ядерному реакторі, можна описати, як безупинний поділ ядер. При цьому маса цілого ядра до поділу більша за масу осколків, що вийшли. Різниця становить приблизно 0,1% маси ядра, що розділилося. Зрозуміло, до повного перетворення маси в енергію ще дуже далеко, але навіть така зміна маси палива в реакторі дозволяє отримувати гігантську кількість енергії. Зміна маси палива за рік безупинної роботи в реакторі РБМК-1000 становить

приблизно 0,3г, але енергія, що виділяється при цьому, така ж, як при спалюванні 3 000 000 тон вугілля.

Генератором на АЕС є атомний реактор. Тепло, яке виділяється в реакторі в результаті ланцюгової реакції ділення ядер деяких важливих елементів, потім так само, як і на звичайних теплових електростанціях (ТЕС), перетворюється в електроенергію.

Природною речовиною, що використовується в атомній енергетиці є уран, який добувають з уранових руд. Природний уран складається з 3 ізотопів:

- уран-238 (99,282%);
- уран-235 (0,712%);
- уран-234 (0,006%).

В атомних реакторах, крім природного урану, з успіхом можуть бути використані штучні елементи – плутоній-239 та уран-233, які не зустрічаються в природі, але можуть бути вироблені з урану-238 і торію-232. Під час поділу ядер плутонію-239 і урану-233 вивільняється велика кількість енергії і виділяється 2-3 нейтрони. Отже, плутоній-239 і уран-233 також придатні для здійснення ланцюгової реакції, тобто для добування атомної енергії.

Нейтрони, що виділяються під час реакції поділяються на швидкі, зі швидкістю  $(10:15) \times 10^6$  м/с, і повільні, або теплові, зі швидкістю руху  $2,2 \times 10^5$  м/с.

Найпридатнішим ізотопом урану є уран-235, бо він ділиться від взаємодії, як зі швидкими, так і повільними нейтронами. Проте імовірність захоплення ядром урану-235 швидкого нейтрону дуже мала, тому, що нейтрон перебуває біля ядра дуже недовго і не встигає з ним провзаємодіяти. Уран-235 інтенсивно вбирає нейтрони з малими енергіями. Чим повільніший нейтрон, тим довше він перебуватиме поблизу ядра, і тим імовірніше його захоплення.

Головною перешкодою до розвитку ланцюгової реакції в природному

урані є інтенсивне захоплення нейтронів ізотопом урану-238 без його ділення. Проте, це захоплення можна зменшити, якщо додати в уран речовину, що сама мало вбирає нейтрони, але, в якій нейтрони, сповільнюючись, швидко втрачають свою енергію і перетворюються в теплові. Речовини, що застосовуються для цього називають *сповільнювачами*.

Хорошими сповільнювачами є речовини з малою атомною вагою, наприклад графіт, берилій, важка і звичайна вода. Із застосуванням сповільнювача імовірність ділення ядер урану-235 дуже збільшується, а нейтронів ураном 238 зменшується. В таких умовах для ланцюгової реакції на теплових нейтронах можна застосувати природний уран.

Ланцюгову реакцію ділення ядер урану можна відрегулювати так, щоб кожної секунди ділилася лише певна кількість ядер, яка відповідатиме певній кількості виділеної теплоти. Змінюючи кількість поділів ядер урану за одиницю часу, можна тим самим змінювати кількість теплоти, а отже, і потужність.

Установку, в якій здійснюється спонтанний регульований процес розщеплення атомних ядер і перетворення вивільненої при цьому атомної енергії в теплову, називають реактором. У реакторі частина нейтронів поглинається ураном і матеріалами активної зони. Компенсація втрат нейтронів можлива лише за умови, що розщеплення кожного ядра буде супроводжуватись утворенням двох і більше нейтронів.

Реакцією розщеплення звичайно керують за допомогою стержнів з кадмію або бористої сталі, які інтенсивно поглинають теплові нейтрони. Якщо їх опустити в активну зону, вони поглинають нейтрони, і тим самим зменшують кількість розщеплювальних ядер. Змінюючи положення стержнів, можна відповідно регулювати процес в реакторі.

Атомні реактори бувають *гетерогенні* - з прошаровим розміщенням урану й сповільнювача і *гомогенні* - з однорідною сумішшю урану і сповільнювача. Для відбирання теплоти застосовують такі теплоносії: воду,

під тиском, гази (азот, вуглекислоту, гелій, повітря), метали (натрій), органічні речовини. У гомогенній суміші природного урану із сповільнювачем уран-238 поглинає багато нейтронів. Щоб запобігти цьому й уповільнити рух швидких нейтронів в активну зону реактора вводять сповільнювачі, які майже не поглинають нейтронів. Стикаючись з ядрами сповільнювачів нейтрони передають їм частину своєї енергії, і після кількох співударянь уповільнюються до енергії теплової рівноваги з навколишнім середовищем. Якщо за сповільнювач взяти графіт, то нейтрони повинні прийняти близько 110 співударянь, щоб набути теплової швидкості.

В зв'язку з цим у гомогенній суміші природного урану з графітом багато нейтронів поглинаються ураном-238 і ланцюговий процес практично не здійснюється, тому в реакторах слід застосовувати гетерогенну суміш урану з графітом.

Якщо застосувати як сповільнювач важку воду, то вже після 18-20 співударянь нейтрони набувають теплового стану. У зв'язку з цим імовірність поглинання нейтронів ураном-238 зменшується і стає можливим ланцюговий процес розщеплення і однорідної суміші природного урану і важкої води.

Гомогенний реактор - це котел, в якому уранові солі розчинені у важкій воді. Із зовні котла встановлюють відбивач нейтронів. Вода, що нагрівається в активній зоні реактора може одночасно бути і теплоносієм, температура якого регулюється кадмієвими стержнями. Застосування збагаченого урану (з більшим вмістом урану-235) у гомогенних реакторах дає змогу використовувати звичайну воду як сповільнювач.

Гетерогенний реактор складається з графітового блоку, в якому закладено уранові стержні захисного шару із свинцю і бетону, теплообмінника, який заповнено теплоносієм, і насоса. Процес розщеплення ядер у реакторі регулюються стержнями автоматично. Для цього передбачено устаткування, яке складається з іонізаційної камери та електроприводу. При значному виділенні нейтронів керовані стержні

переміщуються в активну зону реактора, поглинають надлишкові нейтрони і тим самим зменшують температуру теплоносія.

Гомогенний реактор складається з котла, що заповнений важкою водою, в якій розчинена сіль. Процесом розщеплення керують за допомогою кадмієвих стержнів.

Атомний реактор може працювати тільки тоді, коли його активна зона заповнена певною кількістю розчиненої речовини. Мінімальна її кількість, необхідна для здійснення ланцюгової реакції розщеплення ядер називається *критичною масою*.

Величина критичної маси залежить від енергії нейтронів і форми маси урану, яка в тій чи іншій мірі сприяє розсіянню нейтронів. Критична маса значно зменшується, якщо застосовують якісні відбивачі нейтронів, які повертають їх знову в масу, а також, коли концентрація ізотопу урану-235 більша.

Нагрітий реактор характеризується меншою реактивністю, що в основному пояснюється зменшенням густини атомного палива та сповільнювача. В суміші збільшується середня відстань між ядрами і, завдяки цьому, зменшується їх імовірність розщеплення. У процесі роботи відхилення потужності реактора від середнього значення характеризується пульсуючою кривою, яка при усталеному стані відхиляється на 0,1 %.

Добуту теплову енергію, за допомогою теплоносія виводять до місця її використання. Нагрітий теплоносій можна безпосередньо використовувати в тепловому двигуні (наприклад, газ у газовій турбіні). У такому разі тепла схема енергетичної установки називається *одноконтурною*.

Оскільки теплоносій після атомного реактора може бути радіоактивним і небезпечним для обслуговуючого персоналу всі агрегати (парогенератор, пара і газопроводи, турбіни) повинні працювати в закритих приміщеннях, а їх робота контролюватись і регулюватись дистанційно, за допомогою автоматичної апаратури.

У більшості АЕС застосовують *двоконтурні* теплові схеми. Нагріту воду



або метал, найчастіше натрій, застосовують як теплоносії для вироблення водяної пари парогенератора. Після парогенератора у парі немає радіоактивних елементів, тому парові турбіни, до яких подається пара другого контуру можуть обслуговуватись безпосередньо.

Оскільки в першому контурі відбувається ядерна реакція з вивільненням великої кількості нейтронів, то для їх повернення в активну зону все обладнання встановлюють в спеціальному металевому корпусі з відбивачами нейтронів. Крім того передбачаються захисні водяні об'єми, залізобетонні стінки тощо.

### ***Принципові схеми атомних електростанцій***

*Реактори, що охолоджуються водою.* В деяких АЕС теплоносієм є вода. В активну зону реактора завантажують 550 кг урану-238, збагаченого ураном-235. Для регулювання роботи реактора (зокрема для компенсування зайвої активності) застосовують стержні з карбиду бору, які розміщують рівномірно між урановими стержнями. Коли їх опускають активність реактора зменшується, а може і зовсім припинитись. Теплова потужність реактора дорівнює 30000 кВт, параметри робочої пари  $12,5 \times 10^5$  Па і  $260^\circ\text{C}$ , електрична потужність паротурбогенератора становить 5000 кВт. Охолоджувальна вода першого контуру для відбирання теплоти з реактора подається під тиском  $10^7$  Па і нагрівається до температури  $270-280^\circ\text{C}$ . (Рис. 4.32)

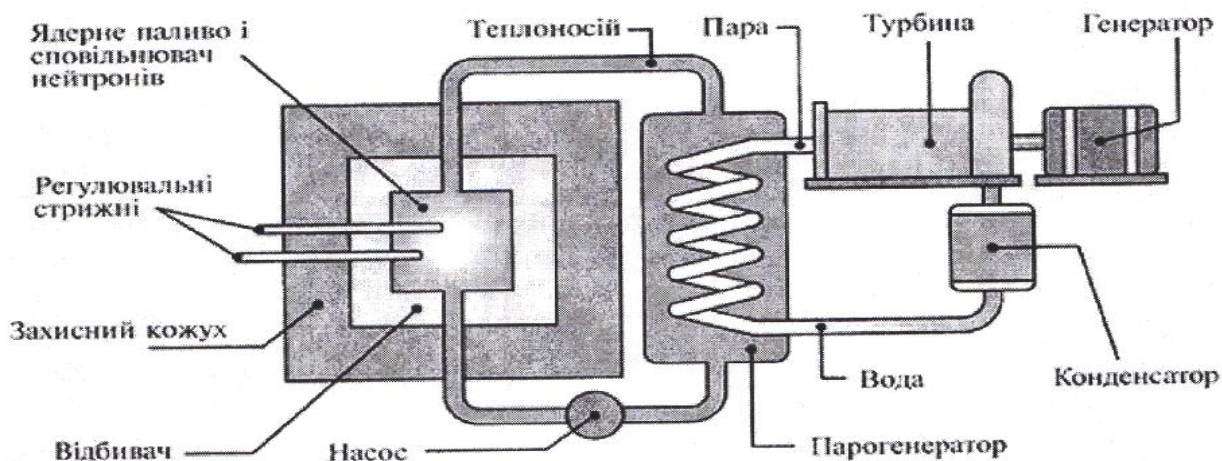


Рис. 4.32 Схема ядерного реактора

Від пароутворювача другого контуру (підігрівник, випарник, перегрівник пари) охолоджувальна вода з температурою близько  $190^{\circ}\text{C}$  знову подається в реактор. Для забезпечення тиску води в першому контурі використовується живильний насос і компенсатор-вирівнювач тиску, тиск у якому вирівнюється газовим балоном. Другий контур має дві конденсаторні установки для конденсації пари після турбіни і пусковий конденсатор.

*Реактори з киплячою водою.* Досконаліші від водяних. У них вода в активній зоні доходить до кипіння і утворена пара подається в турбіну. В реакторах з киплячою водою значно менше витрачається води. Установка значно спрощується (за рахунок пароутворювачів) і зменшується необхідна потужність насосів. Проте в цих типах реакторів підвищується радіоактивність пари, що змушує забезпечувати більш надійну герметизацію теплових елементів і, взагалі, накладає певні обмеження на їх роботу та експлуатацію. Оригінальне вирішення цієї проблеми знайдено на встановлених реакторах, наприклад Білоярської АЕС.

В реакторах даної АЕС є дві групи каналів - випарні і перегрівні. Від першої групи каналів теплота відводиться киплячою водою під тиском  $155 \times 10^5$  Па і в парнику пароутворювача передається воді другого контуру. Одержана у випарнику під тиском  $10^7$  Па подається до другої групи каналів, де вона перегрівається до  $510^{\circ}\text{C}$  і, нарешті, йде до турбіни.

Насичена пара другого контуру, перегріваючись в активній зоні реактора, стає мало радіоактивною. Термічний ККД установок з реакторами киплячого типу вищий, ніж у реакторів водо-водяного типу. Всі описані вище реактори працюють на теплових нейтронах. Принциповою відмінністю реакторів на швидких нейтронах є те, що вихідною сировиною для них може служити ізотоп уран-238, якого в природі у 140 разів більше, ніж ізотопу уран-235. При застосуванні швидких нейтронів знайдено нові техніко-економічні рішення, так в м. Шевченко встановлено реактор на швидких нейтронах, тепловою потужністю 1000 МВт. Реактор трьохконтурний, теплоносіями для першого і другого контурів є натрій, а третього вода і пара. Рух теплоносія контуру розподілено на три потоки, кожний потік включає



два теплообмінники і циркуляційний насос. Теплота від проміжного теплообмінника до пароутворювачів також передається трьома потоками, на кожний потік припадає одна третина повної потужності. В цих реакторах відбувається відтворення палива (одержання з урану-238 плутонію 239), яке добре взаємодіє з тепловими нейтронами. Якщо коефіцієнт відтворення  $K=1,5$ , то на кожний 1 кг урану-235 одержимо 1,5 кг плутонію.

*Теплова схема двоконтурної електростанції.* Теплові схеми атомних електростанцій залежать від типу реактора, виду теплоносія, складу устаткування і можуть бути одно-, дво- та триконтурними. В одноконтурних схемах пара виробляється безпосередньо в реакторі. Отримана паро - водяна суміш (паровмістом до 15 %) подається в барабан-сепаратор, звідки від сепарована насичена пара надходить у парову турбіну. Пара, що відпрацювала в турбіні, конденсується. Конденсат циркуляційним насосом подається в реактор.

Одноконтурна схема найбільш проста в конструктивному відношенні і досить економічна. Однак робоче тіло на виході з реактора стає радіоактивним, що висуває підвищені вимоги до біологічного захисту й утруднює проведення контролю і ремонту устаткування. У двоконтурних схемах (Рис. 4.33) існують два самостійних контури. Контур теплоносія - перший; контур робочого тіла - другий. Спільне устаткування обох контурів - парогенератор. Нагрітий у реакторі теплоносієм надходить у парогенератор, де віддає свою теплоту робочому тілу, а потім за допомогою головного циркуляційного насоса повертається в реактор. У першому контурі знаходиться компенсатор, що регулює підтримку тиску в контурі при зміні температури на рівні значно вищому, ніж у другому. Отримана у парогенераторі пара подається в турбіну, де здійснює роботу. Потім конденсується, і конденсат живильним насосом подається в парогенератор. Наявність парогенератора ускладнює установку і зменшує її економічність, але перешкоджає появі радіоактивності в другому контурі.

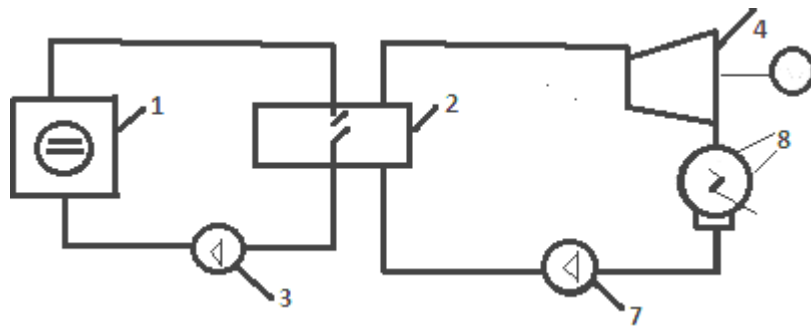


Рис. 4.33 Теплова схема простої двоконтурної атомної електростанції: 1 - ядерний реактор, 2 - теплообмінник - парогенератор, 3 - головний циркуляційний насос, 5 - електрогенератор, 6 - конденсатор, 7 - живильний насос.

У триконтурній схемі теплоносіями першого контуру служать рідкі метали, наприклад, натрій. Радіоактивний натрій першого контуру з реактора направляється в теплообмінник, де віддає теплоту натрію проміжного контуру, і циркуляційним насосом повертається в реактор. Тиск натрію в проміжному контурі вище, ніж у першому, для запобігання витоків радіоактивного натрію. Натрій проміжного контуру віддає теплоту в парогенераторі робочому тілу (воді) третього контуру. Утворена в парогенераторі пара надходить у турбіну, виконує роботу, конденсується і живильним насосом подається в парогенератор. Триконтурна схема вимагає великих витрат, але забезпечує безпечну експлуатацію реактора.

### Магнітогідродинамічний генератор (МГД - генератор)

*Загальні відомості.* Магнітогідродинамічний генератор – енергетична установка в якій енергія робочого тіла (рідке або газоподібне електропровідне середовище), що рухається в магнітному полі перетворюється в електричну енергію.

В МГД – генераторі виникає пряме перетворення механічної енергії рухомого середовища в електричну. Рух таких середовищ описується магнітною гідродинамікою, що й дало назву приладу.

Перший МГД - генератор був побудований в 1950х роках завдяки розвитку теорії магнітної гідродинаміки та фізики плазми і високих температур. В перших магнітогідродинамічних генераторах в якості робочого тіла використовували електропровідні рідини, зараз застосовують

плазму в якій носіями зарядів є вільні електрони і позитивні іони, що відхиляються в магнітному полі, від траєкторії по якій газ рухався при відсутності магнітного поля. В такому генераторі може спостерігатись додаткове електричне поле, що називається полем Холла, яке можна пояснити зміщенням заряджених частинок між електронами в сильному магнітному полі в площині перпендикулярній магнітному полю.

### ***Будова, класифікація та принцип роботи.***

МГД – генератор складається з каналу, по якому рухається робоче тіло (плазма), системи магнітів і електродів, які відводять отриману енергію. В якості магнітів можуть використовувати електромагніт чи постійний магніт.

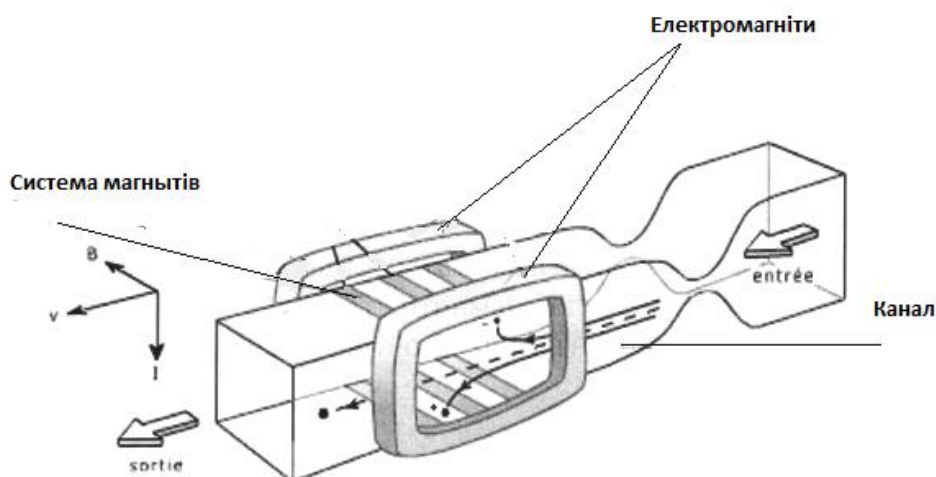


Рис. 4.34 Схема МГД – генератора.

МГД – генератори працюють з високою початковою температурою і не мають рухомих частин.

В магнітогідродинамічному генераторі використовується низькочастотна плазма ( $T \sim 3000 \text{ K}$ ), що рухається з великою швидкістю ( $v \sim 1000 \text{ м/с}$ ) в поперек магнітного поля, яке утворюється над провідними магнітними системами.

За конструкцією МГД – генератори розрізняють за конфігурацією і розмірами каналів . Найбільш поширенішими і простими є лінійні канали прямокутного перетину, що розширюються по шляху плазми.

В дискових МГД – генераторах канал утворюється стінками, що розташовуються по радіусу, на які опираються верхній і нижні диски. В коаксіальних( вихрових) МГД – генераторах плазма подається тангенціально в порожнину між двома циліндричними електродами. Якщо зазор між електродами невеликий, то при тій же довжині взаємодія плазми з магнітним полем збільшується. Коаксіальний МГД – генератор за своїми параметрами близький до лінійного.

Зовнішній вигляд лінійного МГД – генератора установки У – 25 потужністю 25 МВт показаний на малюнку. В цьому генераторі електроди виготовлені з кераміки  $ZrO_2$  з різними добавками, а ізолятори із оксиду магнію.

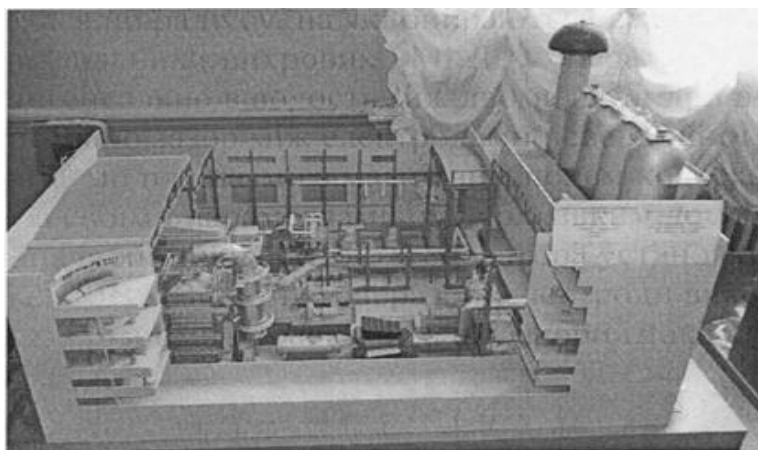


Рис. 4.35 Зовнішній вигляд МГД – генератора У-25

Електроди виготовляють з міді і високотемпературних сплавів на основі нікелю, хрому і вольфраму, а також порошкових матеріалів на основі хромітів. В якості матеріалу для ізоляції часто застосовують окис алюмінію.

Лінійні МГД - генератори виконують як з суцільними електродами, так і з секційними електродами, які складаються з декількох ізольованих між собою електродів. Питома потужність будь-якого магнітогідродинамічного генератора пропорційна квадрату швидкості плазми і квадрату індукції

магнітного поля в каналі генератора. Для створення магнітного поля в каналі МГД - генератора використовують спеціальні магнітні системи, які повинні при мінімальних значеннях енергії, розмірах і масі, забезпечити необхідні значення величини і конфігурації магнітного поля. Цю проблему вирішують завдяки надпровідним магнітним системам. Найкращими є трекова (Рис. 4.36), сідлоподібне (Рис. 4.37) і соленоїдальна (Рис. 4.38) обмотки магнітних систем. Соленоїдальна найбільш зручна для дискових МГД - генераторів і інших генераторів малої потужності. Для генераторів великої потужності найбільш підходить сідлоподібна обмотка, оскільки вона має найменші розміри і найбільшу індукцію магнітного поля.

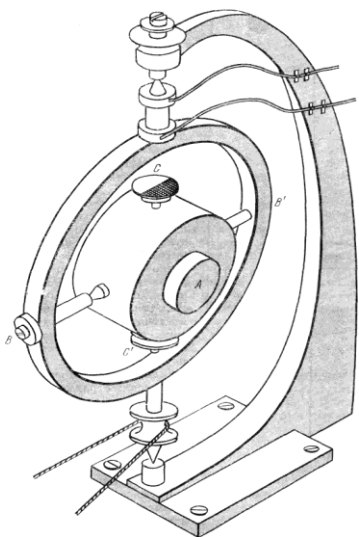


Рис. 4.36

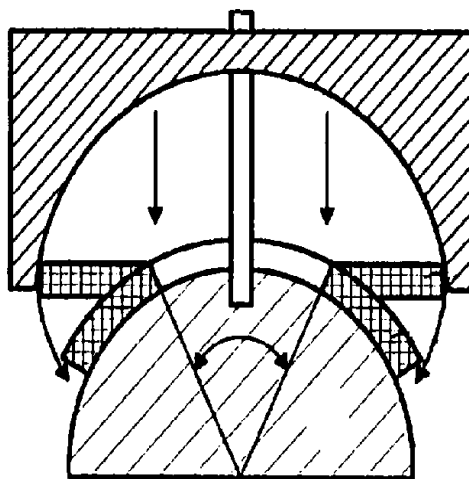


Рис. 4.37

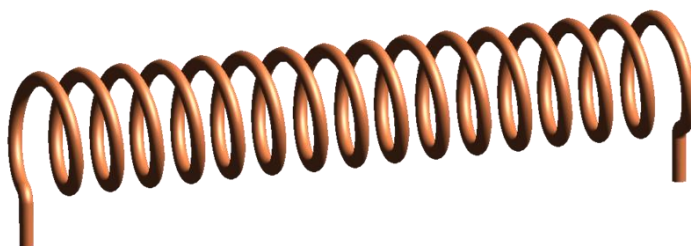


Рис. 4.38

*За типом робочого циклу МГД – генератори бувають:*

1. МГД – генератори з відкритим циклом. В даному випадку продукт згоряння є робочим тілом, а використані гази після видалення з них присадок лужних металів, викидають в атмосферу.

2. МГД – генератори з замкнутим циклом. В даному випадку тепла енергія, отримана при згорянні палива, передається в теплообміннику робочому тілу, яке потім пройде через МГД – генератор і повернеться через компресор, замикаючи цикл.

3. Термодинамічний цикл МГД – генератори без регенерації. Складається з процесів (Мал.12.) із стиснення газу в компресорі; нагріву газу в камері згоряння (процес утворення плазми); розширення плазми в каналі і охолодження газу в теплообміннику.

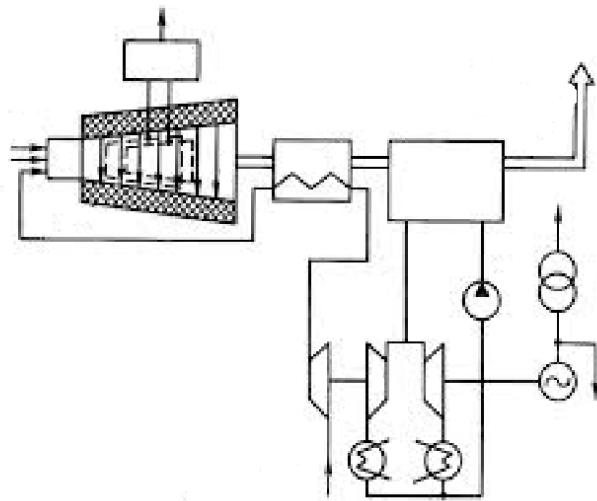


Рис. 4.39 Схема МГД – генератора без регенерації.

За типом відводу електроенергії, МГД - генератори поділяються на:

1. Кондукційні - в робочому тілі, що проходить через поперечне магнітне поле, виникає струм який через електроди (вмонтовані в бокові стінки каналу), замикається на зовнішнє коло. В залежності від зміни магнітного поля чи швидкості руху робочого тіла такий генератор може генерувати постійний чи пульсуючий струм.

2. Індукційні - в індукційних МГД - генераторах електроди відсутні. В такій установці генерується змінний струм. Вони потребують створення біжучого вздовж каналу магнітного поля.

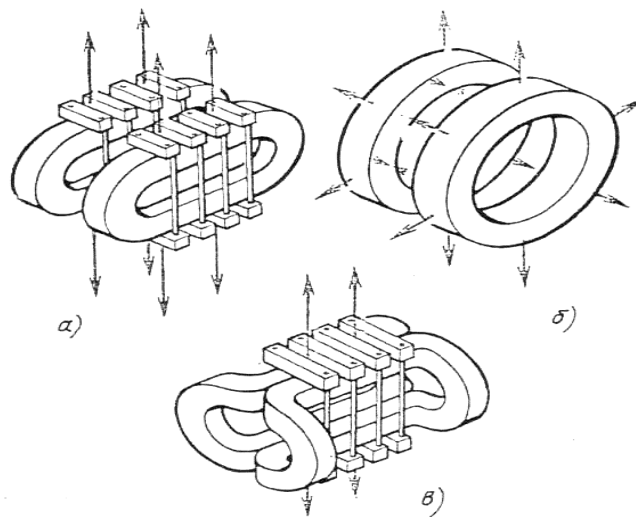


Рис. 4.40 Різні типи обмоток магнітів МГД – генератора  
*а) еліптична, б) колова, в) сідлоподібна*

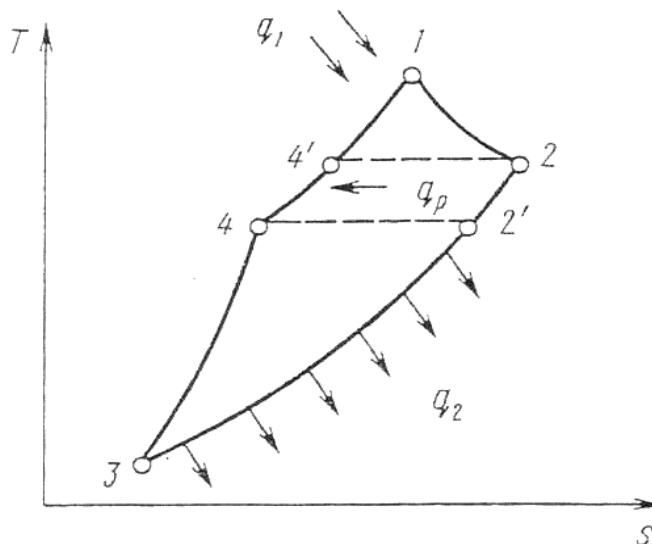


Рис. 4.41 Реальний цикл МГД – генератора з регенерацією.

### Термодинамічні реактори. Перспективи застосування.

На сьогоднішній день жодного термоядерного електрогенератора не існує, хоча інтенсивні експерименти тривають. Природні термоядерні реакції відбуваються на сонці. Ядра атомів водню наближуються один до одного до взаємодії синтезу, утворюючи атом гелію з виділенням значної енергії, як різниці їх мас.

Реакція синтезу полягає у наступному: беруться два або більше атомних ядра та із застосуванням деякої сили зближуються настільки, що сили що діють на таких відстанях переважають сили електромагнітного

відштовхування між однаково зарядженими ядрами, внаслідок чого формується нове ядро. Воно матиме дещо меншу масу.

З ряду причин, енергія синтезу розглядається багатьма дослідниками в якості «природного» джерела енергії у довготривалій перспективі. Прихильники комерційного використання термоядерних реакторів для виробництва електроенергії наводять наступні аргументи на їх користь:

- практично невичерпні запаси пального (водень);
- пальне можна видобувати із морської води будь-де на узбережжі в світі, що робить неможливим монополізацію пального однією чи групою країн;
- неможливість некерованої реакції синтезу;
- відсутність продуктів згоряння;
- відсутні матеріали, що можуть бути використанні для виробництва ядерної зброї, таким чином виключається випадки саботажу та тероризму;.
- в порівнянні з ядерними реакторами, незначна кількість радіоактивних відходів із коротшим періодом напіврозпаду.

Оцінюють, що наперсток наповнений дейтерієм продукує енергію еквівалентну 20 тонам вугілля. Озеро середнього розміру в змозі забезпечити країну енергією на сотні років. Однак слід зауважити, що існуючі дослідницькі реактори спроектовано для досягнення відносно простої дейтерій-тритієвої (D-T) реакції, яка потребує використання рідкоземельного металу літію для виробництва тритію, тоді як заяви про невичерпність енергії стосуються використання дейтерій-дейтерієвої (D-D) реакції у другому поколінні реакторів.

Реакція синтезу не спричиняє атмосферне забруднення, що є головним внеском у глобальне потепління. Це є значною перевагою, оскільки використання горючих копалин для виробництва електроенергії приводить



до того, що, наприклад у США виробляється 29 кг CO<sub>2</sub>(один із основних газів що сприяють глобальному потеплінню) на жителя США в день.

Реакція синтезу також продукує суттєво меншу кількість радіоактивного забруднення ніж реакція ядерного поділу, що використовується у існуючих атомних електростанціях. Слід, однак, зауважити, що у незаперечній формі це стосується продуктів самої реакції: єдиний побічний продукт D-T реакції це нейтральний гелій, а D-D реакція продукує незначну кількість слабо – радіоактивного тритію, період напіврозпаду котрого складає всього 12 років. Стосовно загальної кількості радіоактивних відходів, багато залежить від типу реакції.

Рівноважну реакцію було продемонстровано на JET (Joint European Torus) у Великобританії в 1997 році.

- **палаюча плазма** (Burning Plasma): проміжний етап, на котрому реакція повинна підтримуватись головним чином альфа-частинками, що продукуються в процесі реакції, а не зовнішнім підігрівом.  $Q \approx 5$ . Досі не досягнута.
- **запалення** (Ignition): стабільна реакція, що підтримує сама себе. Повинна відбуватись при великих значеннях  $Q$ . Досі не досягнута.

Наступним кроком в дослідженнях повинен стати ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), Міжнародний Термоядерний Експериментальний Реактор. На цьому реакторі планується провести дослідження поведінки високотемпературної плазми (палаюча плазма із  $Q \sim 30$ ) та випробувати конструктивні матеріали для промислового реактору. Остаточною фазою досліджень стане DEMO: прототип промислового реактору, на котрому буде досягнуто запалення, та продемонстровано практичну придатність нових матеріалів. Найоптимістичніші прогнози завершення фази DEMO: 30років. Враховуючи орієнтовний час на побудову та введення в експлуатацію промислового реактору, нас відділяє -40 років від промислового використання термоядерної енергії.

*Конструкція електростанції.* Термоядерні реактори переважно класифікуються відповідно до типу «утримання» (confinement) гарячої плазми. Більшість досліджень стосуються магнітного утримання плазми, в такій конструкції потужні магніти утримують гарячу плазму в центрі камери, не даючи їй руйнувати камеру (температура плазми  $\sim 100'000'000$  K). Серед різноманітних типів реакторів із магнітним утриманням, Токамак продемонстрував найкращі результати із часу своєї появи. Інший актуальний тип утримання плазми – це в інерційному реакторі, найбільш інтенсивні дослідження по якому ведуть американські науковці. В ньому крихітні кульки пального («пелети») вистрілюються в центр камери, та «обстрілюються» потужним лазером. Оскільки камера є порівняно не великою, щільність енергії, що нагріває стінки камери, є недостатньою для їх руйнування. Існує також ряд менш поширених методів утримання плазми, наприклад, самостягуючий розряд, де струм, що проходить через плазму, генерує власне магнітне поле, або електростатичне утримання, де іонізована плазма утримується силою електростатичного відштовхування, як у реакторі Фарнворта-Хірша.

Різні типи реакторів мають свої переваги та недоліки. Токамаки є найкраще дослідженим типом реактора. Він є найближчим до практичного використання. Реактор із інерційним утриманням продукує плазму із найкращими характеристиками, працює на найбільш придатному паливі, і потребує доступних конструкційних матеріалів. Особливістю як D-T, такі D-D реакцій є інтенсивне нейтронне випромінювання, котре здатне активувати конструкційні матеріали, роблячи радіоактивним сам реактор.

## **4.5 Компресорні установки**

*Класифікація компресорних машин.* Машини, які використовуються для стиснення і переміщення рідин і газів, називаються *компресорами*. В дію

компресори приводяться електродвигунами, двигунами внутрішнього згоряння або турбінами.

Однією з основних характеристик компресорів є ступінь підвищення тиску газу, тобто відношення кінцевого тиску газу на виході з машини до початкового тиску на вході в неї. В компресорах, які працюють з примусовим охолодженням газу, ступінь підвищення тиску  $\lambda \geq 3,5$ . Крім того, використовуються такі показники: продуктивність  $V_K$ ; потужність  $N_K$ , яка витрачається на привод компресора, коефіцієнт корисної дії  $\eta_K$  і об'ємний коефіцієнт або коефіцієнт подачі  $\eta_{Kv}$ .

Класифікуються компресори за наступними ознаками: за видом робочого тіла, за умовами надання робочому тілу додаткової енергії; за принципом дії.

**За видом робочого тіла** компресори розрізняються:

- а) компресори (або насоси), в яких робочим тілом є не стискувана рідина;
- б) компресори, в яких робочим тілом є стискувані рідини (гази, пара).

В цю групу входить:

- вентилятори, у яких ступінь підвищення тиску робочого тіла  $\lambda \leq 1,5$ , а подача змінюється в дуже широких межах – від не великої до  $1 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/год.;
- нагнітачі (газоповітровувки), у яких  $1,15 < \lambda < 3,5$ , а подача  $5 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/год.;
- компресори, у яких  $\lambda > 1,15$ , при наявності охолодження робочого тіла в процесі стискання, а продуктивність до  $1 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/год..

**За умовами надання робочому тілу додаткової енергії:**

- а) компресори, які працюють за витіснювальним принципом наприклад, робоче тіло засмоктується в циліндр і в ньому під дією поршня стискається до певного тиску і витісняється в газогін;

б) компресори, які працюють за динамічним принципом, тобто в яких робоче тіло стискується під дією лопатей, дисків та інших пристроїв, які швидко обертаються. При цьому велика швидкість газу в дифузорах, куди витісняється газ, перетворюється в тиск (турбокомпресори);

в) компресори, які працюють за струменевим принципом. В них частинкам робочого тіла надається додаткова швидкість за рахунок змішування їх основного потоку з потоком розігнаної рідини, в наслідок чого результуюча швидкість зростає. При проходженні через дифузор швидкість знижується, а тиск робочого тіла зростає (струменевий насос). За таким принципом працюють інжектори, ежектори і елеватори.

*За принципом дії компресори розрізняють:*

Поршневі із зворотно-поступальним рухом поршнів, ротаційні пластинчасті, відцентрові лопатеві, осьові лопатеві, гвинтові, мембранні і струменеві.

### ***Процеси стиснення в ідеальному компресорі.***

*Компресором* називається пристрій, призначений для стиснення і переміщення газів.

Принцип дії поршневого компресора такий (Рис. 4.42): при русі поршня зліва на право тиск в циліндрі становиться меншим за тиск  $p_1$ , відкривається всмоктуючий клапан. Циліндр наповнюється газом. Всмоктування зображене на індикаторній діаграмі лінією 4-1. При зворотньому русі поршня всмоктуючий клапан закривається, і газ стискується по лінії 1-2. Тиск в циліндрі збільшується до тих пір, поки не стане більшим за  $p_2$ . Нагнітальний клапан відкривається, і газ виштовхується поршнем в мережу (лінія 2-3). Потім нагнітальний клапан закривається, і всі процеси повторюються.

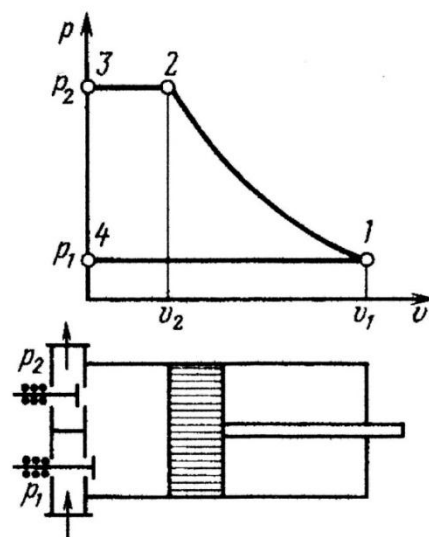


Рис. 4.42 Індикаторна діаграма ідеального поршневого компресора

Індикаторну діаграму не слід змішувати з  $p, V$  – діаграмою, яка будується для постійної кількості речовини. У індикаторній діаграмі лінії всмоктування 4-1 і нагнітання 2-3 не відображають термодинамічні процеси, оскільки стан робочого тіла в них залишається постійним – міняється лише його кількість.

На стиснення і переміщення 1 кг газу витрачається робота ( $l_{mex}$ ), яку виробляє двигун, що обертає вал компресора. Позначимо її через  $l_k$  ( $l_k = l_{mex}$ ). Із (1) витікає, що

$$l_k = \int_{p_1}^{p_2} V dp \quad (1)$$

На індикаторній діаграмі  $l_k$  показано площею 4-3-2-1.

Технічна робота, що витрачається в компресорі, залежить від характеру процесу стискання. На Рис. 4.43 зображені ізотермічний ( $n=1$ ), адіабатний ( $n=k$ ) і політропний процеси стиснення. Стиснення по ізотермі дає найменшу площу, тобто відбувається з найменшою витратою роботи, отже, використання ізотермічного стиснення в компресорі є енергетично найбільш вигідним.

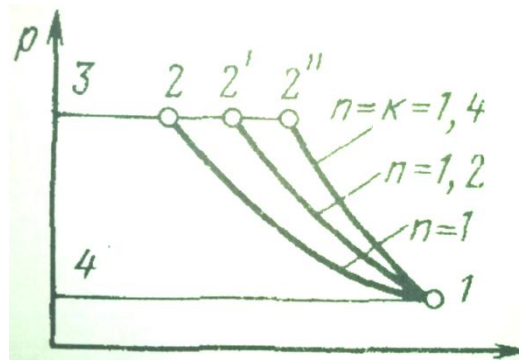


Рис. 4.43 Порівняння роботи адиабатного, ізотермічного і політропного стиснення

Щоб наблизити процес стиснення до ізотермічного, необхідно відводити від стискуваного в компресорі газу теплоту. Це досягається шляхом охолодження зовнішньої поверхні циліндра водою, що подається в сорочку, яке утворюється порожнистими стінками циліндра. Проте практично стиснення газу здійснюється по політропі з показником  $n=1,18 \div 1,2$ , оскільки досягти значення  $n=1$  не вдається.

Робота, що витрачається на привод ідеального компресора, всі процесі в якому рівноважні, обчислюється за співвідношенням (1).

Вважаючи газ ідеальним, з рівняння політропи (2)

$$p_2/p_1 = (V_1/V_2)^n; \quad T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{n-1};$$

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(n-1)/n}, \quad (2)$$

отримуємо  $V=(p_2/p_1)^{1/n}V_1$  і

$$l_k = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{p_1}{p}\right)^{1/n} V_1 dp = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (3)$$

Якщо позначити витрату газу в компресорі через  $m$ , кг/с, то теоретична потужність приводу компресора визначиться з рівняння

$$N_0 = m \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} - 1 \right]. \quad (4)$$

Ідеальний газ – це газ в якому молекули можна вважати матеріальними точками, а силами притягання й відштовхування між молекулами можна знехтувати. У природі такого газу не існує, але близькими за властивостями до ідеального газу є реальні розріджені гази, тиск в яких не перевищує 200 атмосфер і які перебувають при не дуже низькій температурі, оскільки за таких умов відстань між молекулами набагато перевищує їх розміри.

### ***Процеси стиснення в реальних поршневих компресорах***

Реальний поршневий компресор розраховується і виготовляється так, щоб при його роботі обов'язково залишався шкідливий простір в циліндрі. Це необхідно для запобігання удару поршня об головку циліндра у верхній мертвій точці. Об'єм шкідливого простору складається з об'єму невеликої частини циліндра, що знаходиться між головкою і поршнем у Вмт та об'ємів двох каналів, які з'єднують порожнину циліндра з всмоктуючим і нагнітальним каналами.

Наявність шкідливого простору у циліндрі компресора суттєво впливає на його роботу. В кінці нагнітання у шкідливому просторі залишається стиснений газ, тому процес всмоктування може починатися тільки тоді, коли газ розшириться і його тиск знизиться на стільки, що тиск із зовнішньої сторони всмоктувального клапана зможе подолати зусилля пружини і відкрити його. Таким чином робочий об'єм циліндра дещо зменшиться, а значить зменшиться продуктивність компресора.

Важливим фактором роботи реального одноступінчастого компресора є температура. Максимально можлива температура при стисненні повітря в компресорі визначається умовами безпеки. При досягненні високої температури пари масла, яким змащується циліндр, можуть зайнятися і викликати вибух в нагнітальному повітроводі. Температура спалаху компресорних мастил становить 220-240 °С. Температура повітря при стисненні в одноступінчастих компресорах обмежується 160-180 °С.

Наявність зазначених факторів суттєво змінюють теоретичну індикаторну діаграму поршневого компресора (Рис. 4.44).

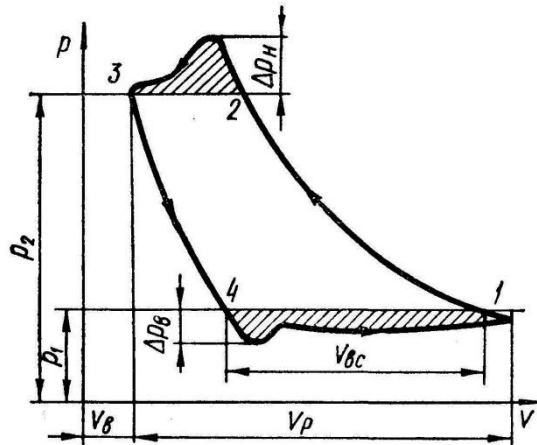


Рис. 4.44 Дійсна індикаторна діаграма одноступінчастого компресора

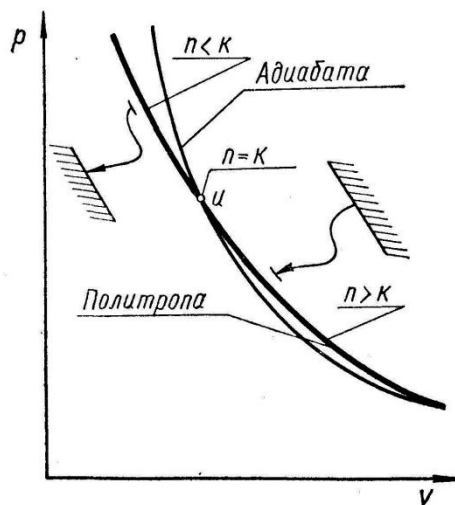


Рис. 4.45 Характеристика дійсної політропи стиснення

На діаграмі прийняті такі позначення,  $V_m$  – об'єм шкідливого простору;  $V_{роз}$  – об'єм розширення газу перед всмоктуванням;  $V_p$  – робочий об'єм циліндра;  $V_g$  – об'єм всмоктування;  $V_n$  – об'єм нагнітання.

Лінія всмоктування на дійсній діаграмі є не ізобарою, а своєрідною хвилястою лінією, яка різко знижується в момент відкриття клапана, що пояснюється інерцією і прилипанням клапана до сідла. Коливання тиску по ходу всмоктування пояснюється впливом газового опору тракту всмоктування та інерцією газу, який рухається в ньому. Величина втрати тиску при всмоктуванні залежить від швидкості газу при проходженні через клапан, розмірів і характеру всмоктувального трубопроводу, опору фільтра тощо.



Інерція і прилипання нагнітального клапана, а також інерція газу в напірній трубі аналогічно впливає на лінію подачі реальної діаграми. Реальний процес стиснення відрізняється від теоретичного, поскільки він описується політропою із змінним показником. На рисунку 4.45 показана дійсна політропа стиснення в порівнянні з адіабатою. Умовними стрілками показано характер теплообміну в реальному процесі стиснення. В кінці всмоктування і на початку стиснення температура газу виявляється нижче температури стінок циліндра і відбувається теплообмін з переходом теплоти від стінок циліндра до газу. При цьому політропа розташовується вище адіабати. В точці  $u$  температура газу зрівнюється з температурою циліндра і процес теплообміну припиняється. В процесі подальшого стиснення температура газу стає вище температури стінок циліндра, відбувається відвід теплоти від газу до стінок циліндра при цьому політропа стиснення розташовується нижчу адіабати.

### ***Багатоступінчасті компресори***

Одноступінчасті компресори одинарної дії мають просту конструкцію, але вони створюють відносно не велику ступінь стиснення газу ( $\lambda=6-7$ ) і продуктивність. Більш ефективними є компресори подвійної дії. Великі тихохідні компресори з метою зменшення розмірів роблять подвійної дії, а не великі швидкохідні – одинарні.

На малюнку 4.46 показаний V – подібний двохстінчастий компресор подвійної дії

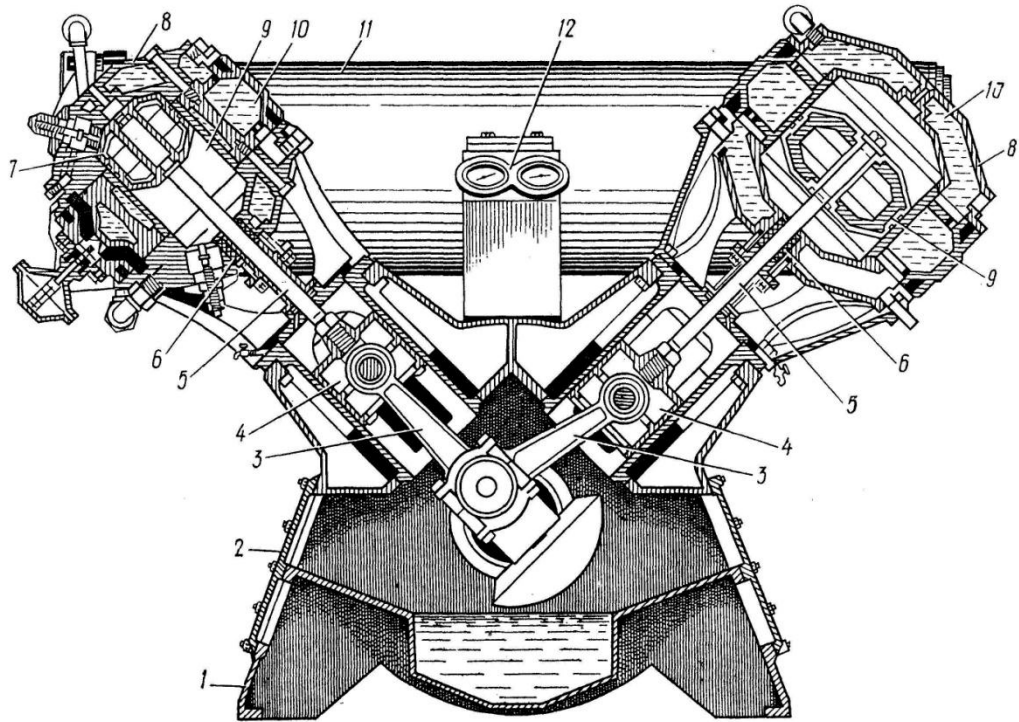


Рис. 4.46 – подібний двохступінчастий, клейцкопфний, подвійної дії поршневий компресор: 1 – масляна ванна, 2 – кожух, 3 – шатуни, 4 – клейцкопфи, 5 – шкالي, 6 – сальники, 7 – поршні, 8 – кришки циліндрів, 9 – циліндри низького і високого тиску, 10 – охолоджуючі порожнини, 11 – проміжний холодильник для охолодження повітря, 12 – манометр і показник обертів

Він називається клейцкопфним. Клейкопф (4) – це своєрідний повзун, який розташований між штоком поршня і шатуном. Він здійснює зворотно-поступальний рух у міцних направляючих і тому забезпечує краще переміщення поршня і розвантажує його від бокових зусиль, сприймає їх на себе. Завдяки цьому в клейцкопфних компресорах втрати енергії на тертя в 2-3 рази менші, ніж у безклейцкопфних.

Для отримання газу високого тиску застосовують багатоступінчасті компресори (Рис. 4.47), в яких процес стиснення здійснюється в декількох послідовно сполучених циліндрах з обов'язковим проміжним охолодженням газу після кожного стиснення.

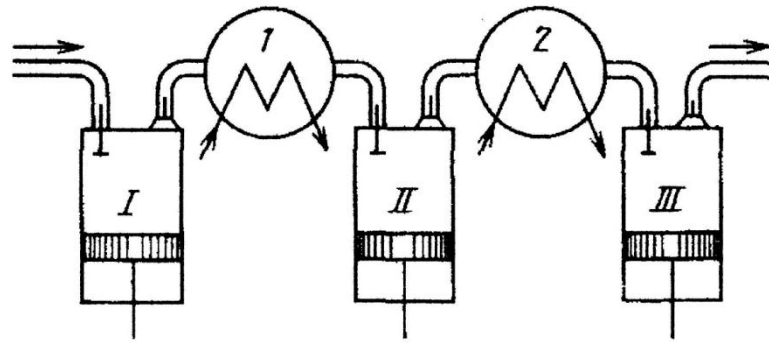


Рис. 4.47 Схема багатоступінчастого компресора:  
I-III – рівні стиснення; 1, 2 – проміжні холодильники

Індикаторна діаграма трьохступінчастого компресора зображена на рисунку 4.48. На першому рівні компресора газ стискується по політропі до тиску  $p_{II}$ , потім він поступає в проміжний холодильник 1, де охолоджується до початкової температури  $T_1$ . Опір холодильника по повітряному тракту з метою економії енергії, що витрачається на стиснення, роблять не великим. Це дозволяє вважати процес охолодження газу ізобарним. Після холодильника газ поступає на другий рівень і стискується по політропі до  $p_{III}$ , потім охолоджується до  $T_1$  в холодильнику 2 і поступає в циліндр третього рівня, де стискується до тиску  $p_2$ .

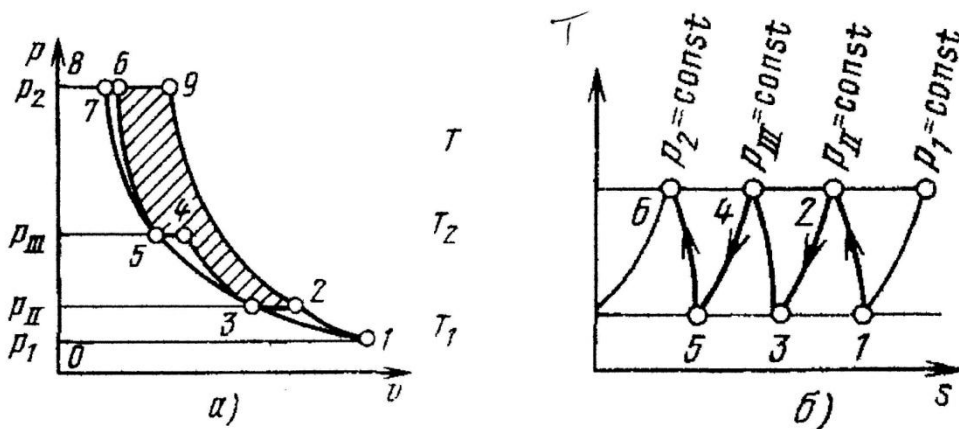


Рис. 4.48 Індикаторні діаграми трьохступінчастого компресора (а) і зображення процесу стиснення в  $T, s$  – координатах (б)

Якби процес стиснення здійснювався по ізотермі 1-3-5-7, то робота стиснення була б мінімальна. При стисненні в одноступінчастому компресорі по лінії 1-9 величина роботи визначалася б площею 0-1-9-8. Робота

трьохступінчастого компресора визначається площею 0-1-2-3-4-5-6-8. Заштрихована площа показує зменшення витрат роботи при використанні трьохступінчастого стиснення.

Чим більше число рівнів стиснення і проміжних охолоджувачів, тим ближче процес до найбільш економічного – ізотермічного, але тим складніше і дорожче конструкція компресора. Тому питання про вибір числа рівнів, що забезпечують необхідну величину  $p_2$  вирішується на підставі технічних і техніко-економічних міркувань.

Процеси стиснення в реальному компресорі характеризуються наявністю внутрішніх втрат на тертя, тому робота, що витрачається на стиснення газу, розраховується за відповідними формулами.

Ефективність роботи реального компресора визначаються відносним внутрішнім ККД, що є відношенням роботи, витраченої на привод ідеального компресора, до дійсної.

Для характеристики компресорів, що працюють без охолодження, застосовують адіабатний ККД  $\eta_{ад} = l_{ад}/l_{кд}$ , де  $l_{ад}$  – робота при рівноважному адіабатичному стані.

Теоретична робота за повний цикл ступінчастого стиснення при умові однакових ступеней стиснення в кожній ступені компресора і однакового охолодження газу в проміжних охолоджувачах до початкової температури може бути визначена за формулою

$$L = Z \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{2n}} - 1 \right] \text{ Дж.}$$

де  $Z$  – число ступеней стискання;

$n$  – показник політропи.

В реальних умовах досягнути однакової температури газу при всмоктуванні в усіх ступенях, так же як і однакових ступенях підвищення тиску дуже трудно. Тому практично робота, яка витрачена на стиснення газу в різних ступенях компресора виявляється не однаковою і загальна робота компресора може бути отримана як сума робіт окремих ступеней.

Ступінчасте стиснення газу може здійснюватися або в різних циліндрах або в одному циліндрі диференціальним поршнем. На Рис. 4.49 зображена схема трьохступінчастого компресора з диференціальним поршнем. Процес

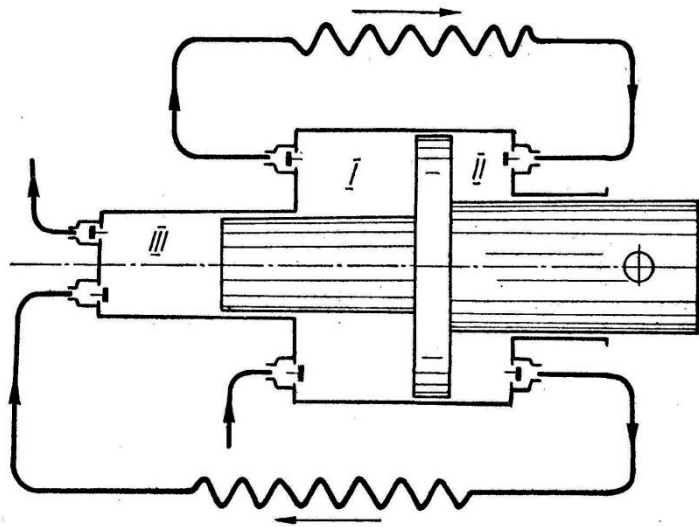


Рис. 4.49 Схема трьохступінчастого компресора з диференціальним поршнем

роботи третього ступеня стиснення в поєднанні з другим такий же, як і другого ступеня в поєднанні з першим. Інакше кажучи, трьохступінчастий компресор по даній схемі працює як двохступінчасті компресори.

Суттєвим недоліком таких компресорів є велика нерівномірність зусиль, що прикладаються до поршня протягом одного оберту вала.

Цього недоліку не має трьохступінчастий компресор з диференціальним поршнем, який розділяє першу ступінь (Рис. 4.50)

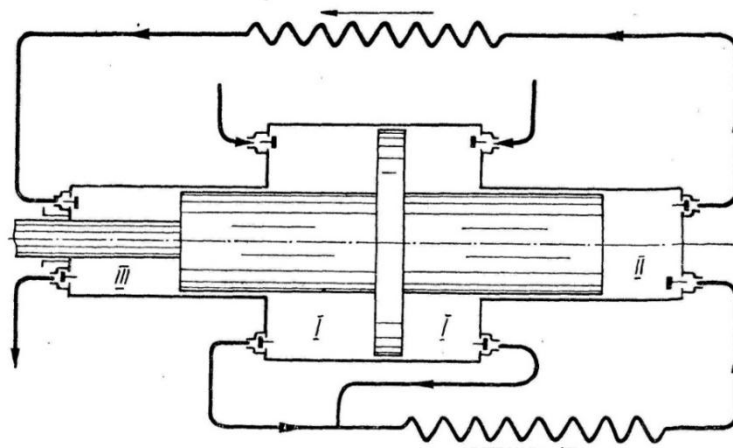


Рис. 4.50 Схема трьохступінчастого компресора з диференціальним поршнем, що розділяє першу ступінь

В ньому перша ступінь стиснення відбувається окремо в правій і лівій порожнинах циліндра за принципом машини подвійної дії. Друга і третя ступені стиснення відбуваються відповідно в лівій і правій порожнинах, що розташовані симетрично відносно середнього циліндра. Таке розташування робочих порожнин компресора забезпечує більш рівномірний розподіл зусиль, що прикладаються до поршня протягом одного оберту вала.

Газ в процесі роботи компресора подається в ресивер, а споживач, по мірі потреби відбирає з нього. Відбір газу може бути не рівномірним. Тому виникає потреба регулювати продуктивність компресора. Способи регулювання можуть бути різні: регулювання шляхом періодичних зупинок компресора; зміна швидкості обертання колінчастого вала; перекриття такту всмоктування; зміна об'єму шкідливого простору циліндра тощо. На практиці регулювання продуктивності компресора здійснюється переважно автоматично. Початковим поштовхом для роботи регулювального пристрою є зміна тиску в ресивері. Вибір способу визначається конкретними умовами, при яких працює компресор.

Наприклад, при електроприводі компресора регулювання може здійснюватись зупинкою всієї установки чи при наявності спеціальної муфти, тільки компресора. Виключення відбувається при досягненні встановленого максимального тиску газу, а включення – при зниженні тиску також до встановленого мінімального значення. Цей спосіб застосовується коли газ відбирається порціями, з достатньо великими перервами.

Регулювання зміною швидкості обертання колінчастого вала здійснюється коли привод компресора відбувається спеціальним електродвигуном, або обладнаний варіатором. Регулювання в такому разі забезпечує як плавну, так і ступінчасту зміну продуктивності, дає можливість підтримувати тиск в ресивері з мінімальними коливаннями і економічно вигідне.

Однак такий спосіб регулювання ускладнює і збільшує вартість компресорної установки.

## ***Відцентрові компресори***

Відцентровими компресорами називаються машини в яких стиснення газу відбувається в основному під дією відцентрових сил, які виникають при обертанні газу в радіальних міжлопаточних каналах робочого колеса. Інакше ці машини називаються турбокомпресорами, оскільки головний їх робочий орган, ротор – називається турбіною.

Однорядне робоче колесо, разом з пристроями, які необхідні для спрямування і розподілу потоків газу, називають ступінню відцентрового компресора. Підвищення тиску в одній ступені невелика, становить 1,2-1,3. Для збільшення тиску треба або підвищувати число обертів ротора, що малоефективно, або збільшувати число ступенів.

Ступінь відцентрового компресора (Рис. 4.51) складається з робочого колеса 2, жорстко насадженого на вал 3, розміщений в корпусі 6.

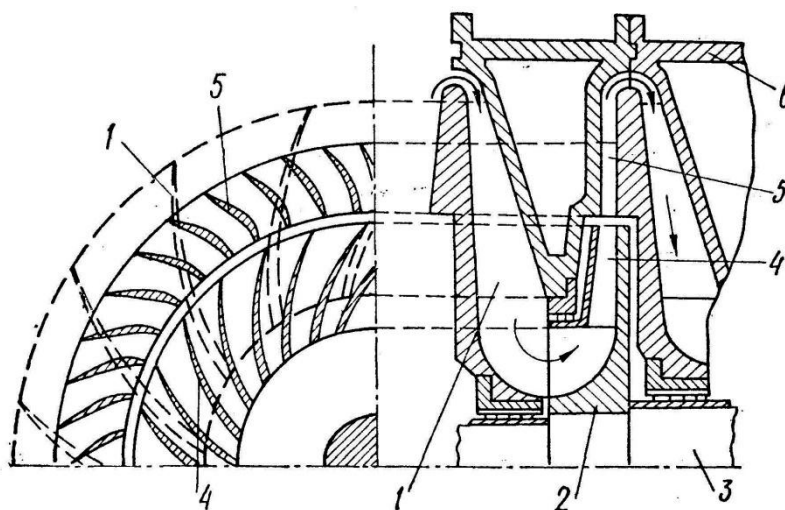


Рис. 4.51 Ступінь відцентрового компресора

Робоче колесо виготовлене у вигляді двох дисків, між якими закріплені лопатки 4, які разом з дисками утворюють канали закриті з чотирьох сторін. В корпусі компресора розташовані криволінійні направляючі лопатки 1, які утворюють направляючий апарат. По периферії робоче колесо оточене також нерухомими криволінійними лопатками 5. Які утворюють дифузор.

При роботі компресора газ поступає в направляючий апарат, де закручується в напрямку обертання робочого колеса і входить в його

порожнину. Знаходячись в каналах робочого колеса, газ набуває складний рух. На виході з порожнини робочого колеса газ потрапляє в дифузори, що утворюють лопатки 5, де кінетична енергія газу перетворюється в потенціальну, в результаті чого зростає тиск.

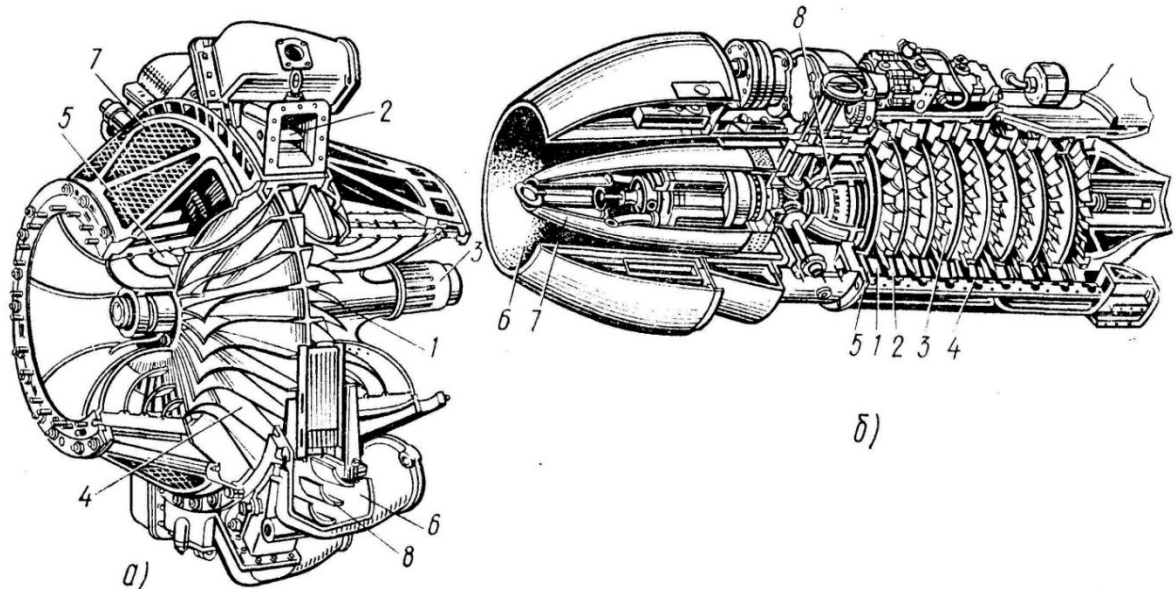


Рис. 4.52 Конструкція лопаточних компресорів

а – відцентровий компресор (двигуна ВК-1): 1 – робоче колесо, 2 – лопаточний дифузор, 3 – вал компресора, 4 – радіальні лопатки робочого колеса, 5 – вхідний направляючий апарат, 6 – збірні патрубки, 7 – запобіжна стінка на вході в компресор, 8 – направляючі лопатки для зменшення втрат при повороті повітря;

б – осьовий компресор (двигуна РД-10): 1 – робочі лопатки, 2 – лопатки зпрямовуючого апарату, 3 – ротор, 4 – корпус компресора, 5 – направляючий апарат, 6 – кожух вхідного пристрою, 7 – внутрішній обтікач, 8 – корпус переднього підшипника



## Ротаційні компресори

Ротаційні компресори є двох типів: роторно-лопатеві (Рис. 4.53, а) та пластинчасті (Рис. 4.53, б).

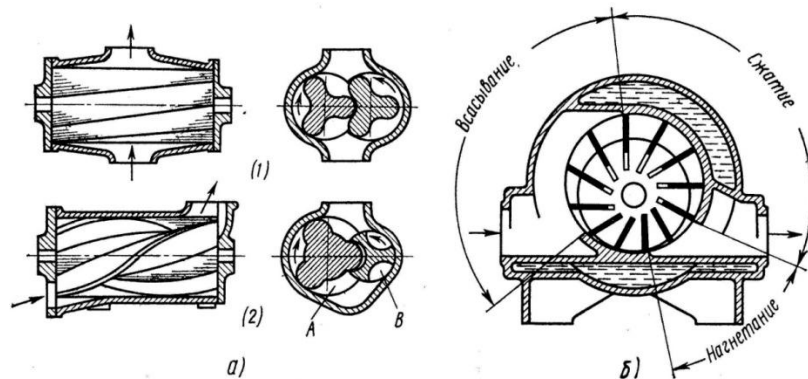


Рис. 4.53 Ротаційні компресори: а – схеми робочих органів компресорів Рутс (1) і Лісхольма (2); б – схема пластинчастого компресора

Вони прості за будовою, мають високі питомі показники на одиницю маси, не потребують ресиверів, можуть безпосередньо з'єднуватись з електродвигуном, оскільки працюють при великому числі обертів.

Роторно-лопатеві компресори (а) мають два ротори – кожний з двома чи трьома лопатками, розділеними зазором. Вони обертаються за допомогою двох шестерень в протилежні сторони. В певному місці один із роторів захоплює порцію газу і подає її в напірну лінію, де ізохорно підвищується тиск.

До однороторних відносяться пластинчасті компресори (б). В корпусі обертається ексцентрично розташований ротор, в пазах якого вільно встановлені сталеві пластини.

При обертанні ротора за годинниковою стрілкою об'єм порожнин між пластинами зменшується, газ стискується і потрапляє в нагнітальну систему. Тертя пластин по корпусу обмежує число обертів (500-2500 об/хв.). Степінь стиснення 3-5,  $V_K \approx 30 - 70 \text{ м}^3/\text{хв.}$

Інколи застосовують двоступінчасті конструкції таких компресорів, що дає можливість отримати ступінь стиснення 8-10.

Пластинчасті компресори можна використати і як вакуумні насоси.

## Гвинтові компресори

Гвинтові компресори відрізняються від традиційних поршневих принципом роботи.

Якщо в поршневому компресорі відбувається ударне стиснення повітря, то гвинтовий компресор нагнітає повітря плавно, за допомогою гвинтової пари. Гвинтова пара засмоктує повітря, обертаючись в масляній ванні, що забезпечує практично повну відсутність тертя, додаткове масляне ущільнення, що гарантує герметичність системи, а також ефективний тепловідвід від робочої зони. В результаті – високий ККД (~92%) і незначне перевищення температури (на 10-15°C) стислого повітря в порівнянні з температурою на вході. Високі експлуатаційні характеристики і ефективна система масляного охолодження забезпечують цілодобовий режим роботи гвинтового компресора при оптимальній температурі. При цьому система масловідділення, передбачена в стандартній комплектації гвинтових компресорів, забезпечує вміст масла на виході всього від 1 до 3 мг/м<sup>3</sup>.

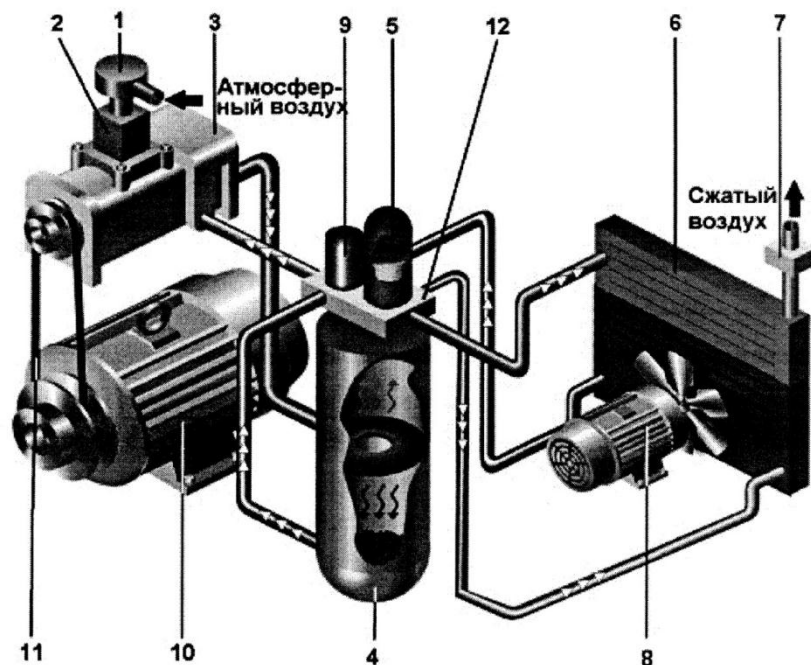


Рис. 4.54 Будова гвинтового компресора

1 – повітряний фільтр; 2 – впускний клапан; 3 – гвинтовий блок; 4 – маслобак; 5 – сепаратор тонкої очистки; 6 – комбінований радіатор; 7 – зворотний клапан; 8 – ел. двигун вентилятора; 9 – масляний фільтр; 10 – головний електродвигун; 11 – клиновидна пасова передача; 12 – комбінований блок: термостатичний клапан, клапан мінімального тиску.

В порівнянні з поршневыми, гвинтові компресори мають ряд переваг:

- мають низький рівень шуму і вібрації, малі габарити і вагу і можуть встановлюватися безпосередньо в цехах, де споживається повітря;
- не вимагають для цього спеціального фундаменту;
- практично не мають витрати масла (2-3 мгр/куб. м), на відміну від крупних поршневих компресорів і тому подають значно чистіше повітря, що дозволяє використовувати їх для живлення найсучаснішого пневмо обладнання;
- оснащені автоматичною системою управління і контролю працездатності, а тому безпечні, не вимагають спостереження за їх роботою, мають велику надійність, здатні на тривалу роботу без обслуговування;
- повітряне охолодження гвинтових компресорів дозволяє відмовитися від громіздкої системи водяного охолодження, і, крім того, дає можливість вторинного використання тепла, що виділяється в результаті роботи компресора, наприклад для обігріву приміщень в зимовий час;
- період безремонтної роботи для гвинтових компресорів на порядок більший, ніж для стандартних поршневих компресорів;
- гвинтові компресори не потребують спеціально підготовленого персоналу, який би постійно стежив і обслуговував їх;
- гвинтовий блок в компресорах працює з мінімальним шумом і вібрацією;
- гвинтовий компресор повністю автоматизований;
- стисле повітря на виході з компресора має мінімальний залишковий взміст масла;
- гвинтові компресори економічніші, споживають менше електроенергії;
- можливість безперервної роботи 24 години на добу;
- значно більший (у 2-3 рази) ресурс роботи.

Найважливішою перевагою є економічність: дослідження показують, що на виробництвах в середньому використовується тільки 50-80% потужності

компресора. У цих випадках типовий гвинтовий компресор працює в режимі «навантаження-холостий хід», а поршневий компресор викидає надлишки повітря через клапан в атмосферу, забруднюючи її.

### *Осьові компресори*

В осьових компресорах газ рухається вздовж його осі. Схема осьового компресора показана на рисунку 4.55

В корпусі 6 обертається порожнистий барабан 5, на поверхні якого закріплені робочі лопатки 1.

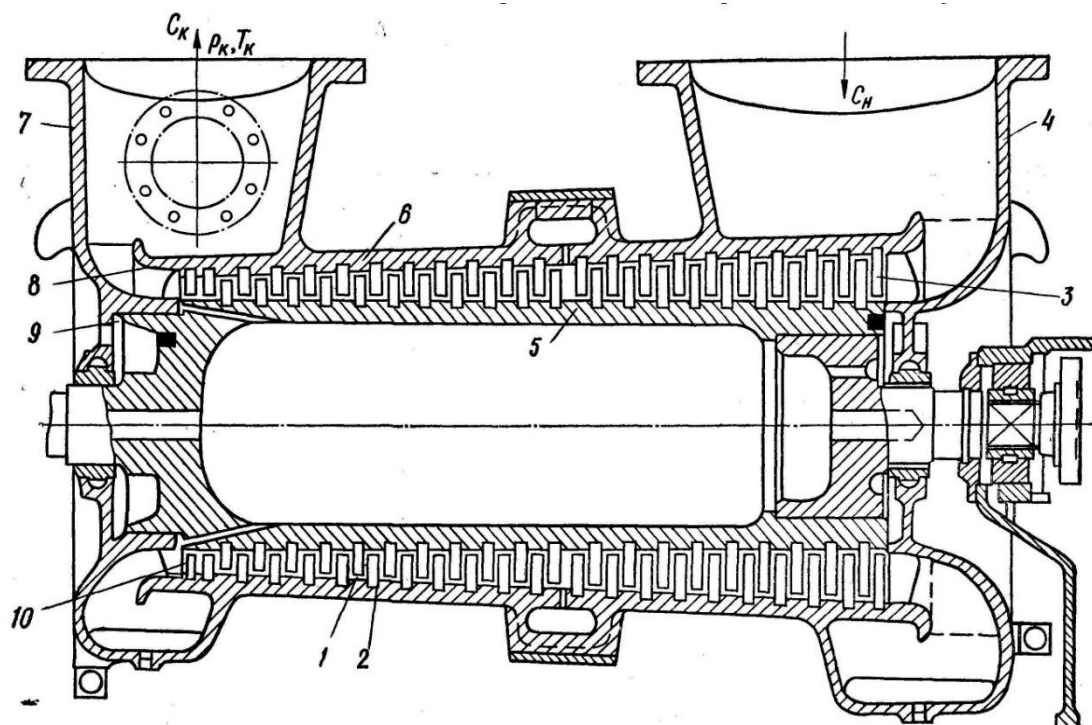


Рис. 4.55 Схема осьового компресора

Між робочими лопатками в корпусі закріплені ряди направляючих лопаток 2. На вході в проточну частину встановлено ряд направляючих лопаток 3, на виході з проточної частини – ряд спрямовуючих лопаток 10. Лабіринтне ущільнення 9 запобігає витоку газу через зазор між ротором і корпусом компресора. На виході стисненого газу із компресора встановлений дифузор 8. Газ входить через патрубок 4, а виходить з машини через патрубок 7.

Степінь підвищення тиску в одній ступені осьового компресора невелика – 1,15-1,35. Тому осьові компресори завжди виготовляють багатоступінчастими.

### **Струменеві компресори (ежектори)**

Ежектором називають газодинамічний апарат, який здійснює перекачування газу за допомогою потоку газу більш високого тиску. Будова струминного компресора показана на рисунку 4.56.

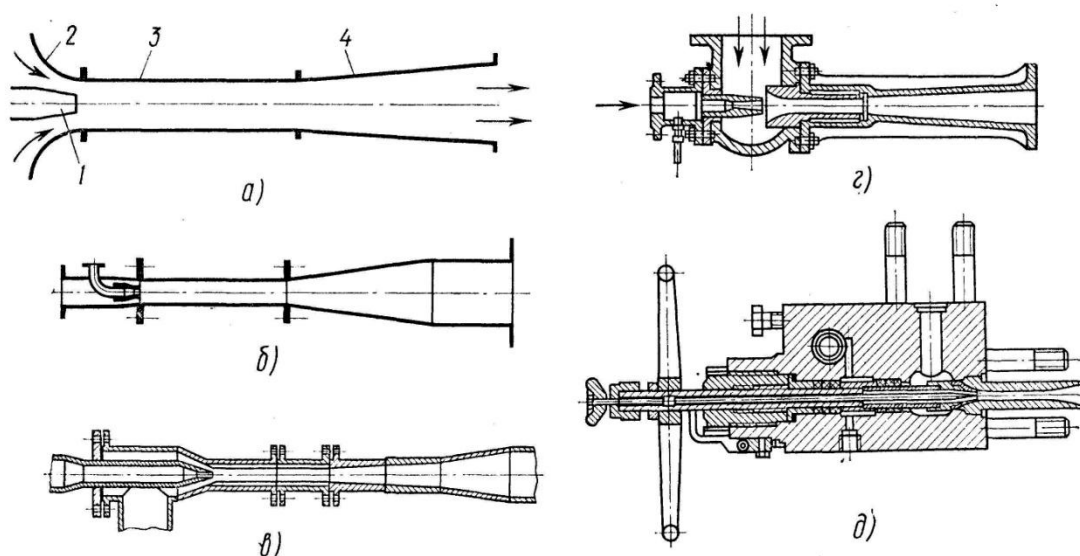


Рис. 4.56 Будова струменевих компресорів.

*а – принципова схема: 1 – активне сопло, 2 – пасивне сопло, 3 – камера змішування, 4 – дифузор; б – простий струменевий компресор; в – компресор, що використовується на газових промислах; г – компресор для прискорення створення розрідження в конденсаторі парової турбіни; д – компресор, що використовується при синтезі аміаку.*

Струмінь газу високого тиску подається через сопло 1 (Рис. 4.56, а). При встановившомусь режимі у вхідному перетині змішувальної камери 3 підтримується тиск, який завжди нижчий повного тиску газу, що транспортується. Під дією різниці тисків цей газ засмоктується в камеру.

Простота будови, невеликі розміри і маса, можливість змінювати в процесі експлуатації продуктивність в широкому діапазоні сприяють

використанню струменевих компресорів в газових промислах, парових турбінах, при синтезі аміаку тощо.

#### 4.6 Холодильні установки

*Загальні відомості.* Холодильна машина – пристрій, що служить для відводу тепла від охолоджуваного тіла при температурі нижчій, ніж температура навколишнього середовища. Процеси, що відбуваються в холодильних машинах, є окремим випадком термодинамічних процесів, тобто таких, в яких відбувається послідовна зміна параметрів стану робочої речовини: температури, тиску, питомого об'єму, ентальпії. Холодильні машини працюють за принципом теплового насосу – відбирають тепло від охолоджуваного тіла і передають його в охолоджуюче середовище (зазвичай воді або навколишньому повітрю), що має більш високу температуру, ніж охолоджуване тіло. Холодильні машини використовують для отримання температур від 10°C до – 150 °C. Область нижчих температур відноситься до кріогенної техніки. Робота холодильної машини характеризується їх холодопродуктивністю.

Холодильний агент (холодоагент) – робоча речовина холодильної машини, яка при кипінні і в процесі ізотермічного розширення відбирає теплоту від охолоджуваного об'єкту і потім після стискування передає її охолоджувальному середовищу за рахунок конденсації (воді, повітрю і т.д.). Основними холодильними агентами є аміак, фреони (хладони), і деякі вуглеводні.

Слід розрізняти холодоагенти і кріоагенти. У кріоагентів нижча температура кипіння. Це не стосується компресійних кріоагентів, які з'явилися останнім часом, здатних охолоджувати до температур нижче – 120°C без застосування рідкого азоту, як це було прийнято останні сто років.

Аміак – газ без кольору із задушливим запахом. Газоподібний аміак легший за повітря, рідкий проводить електричний струм. Температура

кипіння аміаку при атмосферному тиску становить  $33,4^{\circ}\text{C}$ , температура замерзання  $-77,7^{\circ}\text{C}$ . Це доступний і дешевий холодоагент.

Хладон-12 – важкий газ без кольору з дуже слабким запахом, один з найменш шкідливих холодоагентів, нормальна температура кипіння  $-29,8^{\circ}\text{C}$ .

Хладон-22 – важкий газ без кольору, має сприятливі експлуатаційні та фізичні властивості, вибухонебезпечний, негорючий. При атмосферному тиску кипить при температурі  $-40^{\circ}\text{C}$ , а замерзає при  $-160^{\circ}\text{C}$ . Об'ємна холодопродуктивність у нього вища ніж хладону-12.

Перша холодильна машина з'явилася в середині XIX ст. Одна з найстаріших холодильних машин – абсорбційна. Її винахід і конструктивне оформлення пов'язано з іменами Дж. Леслі (Великобританія, 1810), Ф. Карре (Франція, 1850) і Ф. Віндхауза (Німеччина, 1878). Перша парокомпресійна машина, яка працювала на ефірі, побудована Дж. Перкінсом (Великобританія, 1834). Пізніше були створені аналогічні машини з використанням в якості холодоагента метилового ефіру і сірчистого ангідриду. У 1874 К. Лінде (Німеччина) побудував аміачну парокомпресійну холодильну машину, яка поклала початок холодильного машинобудування.

В основі роботи холодильників лежить холодильний цикл. Простий паровий цикл механічної холодильної машини реалізується за допомогою чотирьох елементів, що утворюють замкнутий холодильний контур, – компресора, конденсатора, дросельного вентиля і випарника або охолоджувача (Рис. 4.57). Пара з випарника поступає в компресор і стискається, внаслідок чого її температура підвищується. Після виходу з компресора пара, що має високі температуру і тиск, надходить у конденсатор, де охолоджується і конденсується. У деяких конденсаторах використовується режим переохолодження, тобто подальше охолодження сконденсованої рідини нижче її температури кипіння. З конденсатора рідина проходить через дросельний вентиль. Оскільки температура кипіння (насичення) для даного тиску виявляється нижче температури рідини, починається її інтенсивне кипіння; при цьому частина рідини випаровується,

а температура решти опускається до рівноважної температури насичення (тепло рідини витрачається на її перетворення в пару). Процес дроселювання іноді називають внутрішнім охолодженням або самоохолодженням, оскільки в цьому процесі температура рідкого холодоагента знижується до потрібного рівня. Таким чином з дросельного вентиля виходять насичена рідина і насичена пара. Насичена пара не може ефективно відводити тепло, тому вона перепускається повз випарник і подається прямо на вхід компресора. Між дроселем і випарником встановлений сепаратор, в якому пара і рідина розділяються.

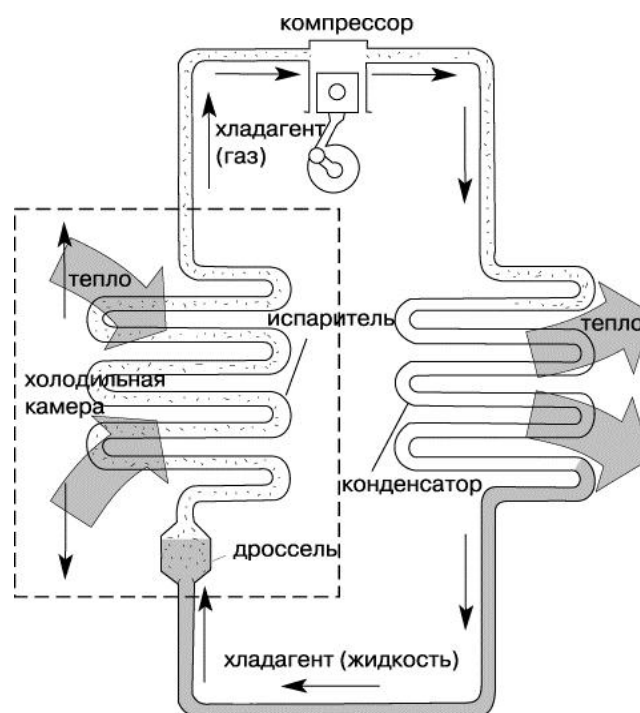


Рис. 4.57 Схема холодильного циклу.

### ***Принцип дії компресійних холодильних машин***

Компресійні холодильники – найбільш поширені та універсальні (Рис. 4.58).

Основними складовими частинами такого холодильника є:

- компресор (К), який приводиться в дію електродвигуном;
- конденсатор (Кон), що знаходиться зовні холодильника;
- випарник (В), що знаходиться всередині холодильника;





Таким чином, у конденсаторі холодоагент під впливом високого тиску конденсується і переходить в рідкий стан, виділяючи тепло, а у випарнику під впливом низького тиску закипає і переходить в газоподібний, поглинаючи тепло.

Терморегулюючий вентиль (ТРВ) потрібний для створення необхідної різниці тисків між конденсатором і випарником, при якій відбувається цикл теплопередачі. Він дозволяє правильно (найбільш повно) заповнювати внутрішній простір випарника холодоагентом. Пропускний перетин ТРВ змінюється в міру зниження теплового навантаження на випарник, при зниженні температури в камері кількість циркулюючого холодоагента зменшується. Капіляр – це аналог ТРВ. Він не змінює свій розтин, а дроселює певну кількість холодоагента, залежно від тиску на вході і виході капіляра, його діаметра і типу холодоагента.

Звичайно також наявний теплообмінник, що вирівнює температуру на виході з конденсатора і з випарника. У результаті до дроселя надходить уже охолоджений холодоагент, який потім ще сильніше охолоджується в випарнику, в той час як холодоагент, що надійшов з конденсатора підігрівається, перш ніж вступити в компресор і конденсатор. Це дозволяє збільшити ефективність холодильника.

При досягненні необхідної температури температурний датчик розмикає електричний ланцюг і компресор зупиняється. При підвищенні температури (за рахунок зовнішніх факторів) датчик знову включає компресор.

Для підвищення економічної ефективності холодильної машини (зниження витрат енергії на одиницю забраного від охолоджуваного тіла кількості теплоти) іноді перегрівають пару, яка засмоктується компресором, і переохолоджують рідину перед дроселюванням. З цієї ж причини для отримання температур нижче  $-30^{\circ}\text{C}$  використовують багатоступінчасті або каскадні холодильні машини.

У багатоступінчастих холодильних машинах стиснення пари проводиться послідовно в декілька ступенів з охолодженням її між окремими ступенями. При цьому в двоступінчастих холодильних машинах отримують температуру кипіння холодоагента до  $-80^{\circ}\text{C}$ .

У каскадних холодильних машинах, що представляють собою кілька послідовно з'єднаних холодильних машин, які працюють на різних, найбільш придатних за своїми термодинамічними властивостями для заданих температурних умов холодоагента, отримують температуру кипіння до  $-150^{\circ}\text{C}$ .

### ***Принцип дії абсорбційних холодильних машин***

У абсорбційних холодильних установках циркуляція холодоагента здійснюється в результаті процесу *абсорбції* поглинання холодоагента рідким розчинником – *абсорбентом*.

Робочою речовиною в абсорбційних холодильниках служать розчини двох компонентів з різними температурами кипіння при однаковому тиску. Компонент, який кипить при більш низькій температурі, виконує функцію холодоагента; другий служить абсорбентом. В межах температур від  $0$  до  $-45^{\circ}\text{C}$  застосовують машини, де робочою речовиною служить водний розчин аміаку (холодоагент – аміак). При температурах охолодження вище  $0^{\circ}\text{C}$  переважно використовують абсорбційні машини, що працюють на водному розчині бромиду (холодоагент – вода).

У абсорбційних системах зберігаються конденсатор (Кон) (Рис. 4.59), дросельний вентиль (Д) і випарник (В), але замість компресора використовують чотири інших елементи: абсорбен ( $A_2$ ), насос ( $H_1$ ), парогенератор (кип'ятильник) і редукційний клапан ( $D_1$ ).

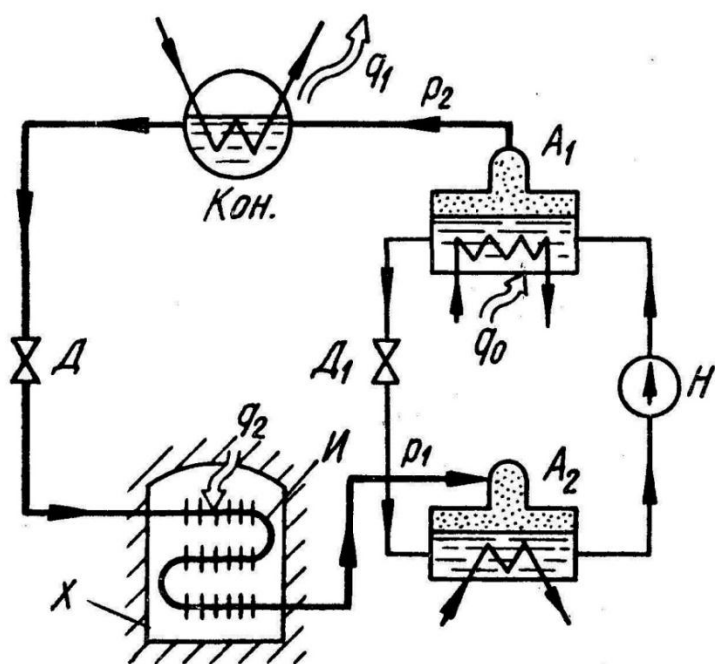


Рис. 4.59 Схема абсорбційної холодильної установки.  $A_1$  – парогенератор (кип'ятильник), Кон – конденсатор, В – випарник,  $A_2$  – абсорбер, Н – насос, Д – дросельний вентиль,  $D_1$  – дросельний вентиль для поповнення асорбента у абсорбер.

Пара з випарника потрапляє в абсорбер. Там вона стикається з абсорбуючою рідиною, яка поглинає пар. Тиск в абсорбері при цьому знижується, що забезпечує безперервне надходження пари з випарника. У процесі абсорбції відбувається виділення тепла, отже, абсорбер повинен охолоджуватися, наприклад, за рахунок циркуляції води. Холодна суміш абсорбуючої рідини і холодоагента надходить у насос, в якому її тиск підвищується. Оскільки підвищення тиску рідини супроводжується лише незначною зміною її об'єму, то необхідна для цього робота мала. Після виходу з насоса холодна рідина високого тиску надходить в кип'ятильник, де до неї підводиться тепло, і велика частина холодильного агента випаровується. Ця помірно перегріта пара високого тиску проходить через конденсатор і робить звичайний холодильний цикл, а абсорбент охолоджується і повертається в абсорбер (через редукційний клапан) для повторення циклу. Дійсний абсорбційний цикл відрізняється від ідеального тим, що частина абсорбенту випаровується в кип'ятильнику і переноситься

разом з парою холодоагентом. Якщо його не відокремити від холодоагента до входу у випарник, то це призведе до підвищення температури у випарнику, або тиск у випарнику буде значно меншим тиску насичення при тій температурі, яка повинна бути у випарнику. Відділення абсорбенту від холодоагента частково відбувається в сепараторі, що розташований між конденсатором і кип'ятильником і служить для конденсації абсорбенту та повернення його в кип'ятильник разом з невеликою кількістю супутнього холодоагента. Механічна робота абсорбційних холодильних установок значно менше, ніж компресійних, проте загальні витрати енергії значно вищі. Енергія, яка підводиться до кип'ятильника на багато більша тієї, яка відводиться від абсорбера охолоджуючою водою. Там, де електроенергія дорога, а теплова енергія і охолоджуюча вода дешеві, абсорбційні установки більш вигідні, ніж компресійні. Застосування абсорбційних машин вигідне на підприємствах, де є вторинні енергоресурси (відпрацьована пара, гаряча вода, гази, що виділяють промислові печі тощо).

### ***Принцип дії пароежекторних холодильних машин***

Спосіб отримання холоду без здійснення механічної роботи полягає в ежекції пари випарника. У такій установці холодоагентом є вода, тому температура в холодильній камері не може бути нижче  $0^{\circ}\text{C}$ .

Пароежекторний холодильник складається з ежектора (Е), випарника (В), конденсатора (Кон), насоса (Н) і ТРВ.

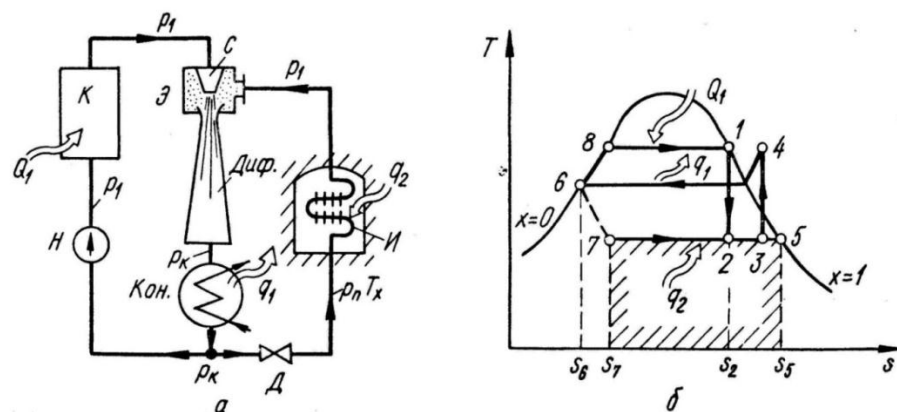


Рис. 4.60 Схема (а) і  $T - s$ -діаграма (б) циклу пароежекторної холодильної установки.

Холодоагентом служить вода, як джерело енергії використовується пара тиском 0,3-1 МН/ м<sup>2</sup> який надходить в сопло ежектора, де розширюється. У результаті в ежекторі, як наслідок, у випарнику машини створюється знижений тиск, якому відповідає температура кипіння води трохи вище 0°С (зазвичай близько 5°С). У випарнику за рахунок часткового випаровування відбувається охолодження камери (продукції). Відсмоктана з випарника пара, а також робоча пара ежектора надходить у конденсатор, де переходить у рідкий стан, віддаючи теплоту охолоджувальному середовищу. Частина води з конденсатора подається у випарник для поповнення витрат охолоджувальної води.

Пароежекторні установки знаходять застосування у виробництві, там, де є пара високого та середнього тиску і дешева вода для охолодження. Ці установки використовуються також на судах, оскільки невелика кількість рухомих частин спрощує їх обслуговування і ремонт.

### **Принцип дії холодильних машин на вихрових охолоджувачах**

Охолодження здійснюється за рахунок розширення попередньо стисненого компресором повітря в блоках спеціальних вихрових охолоджувачів.

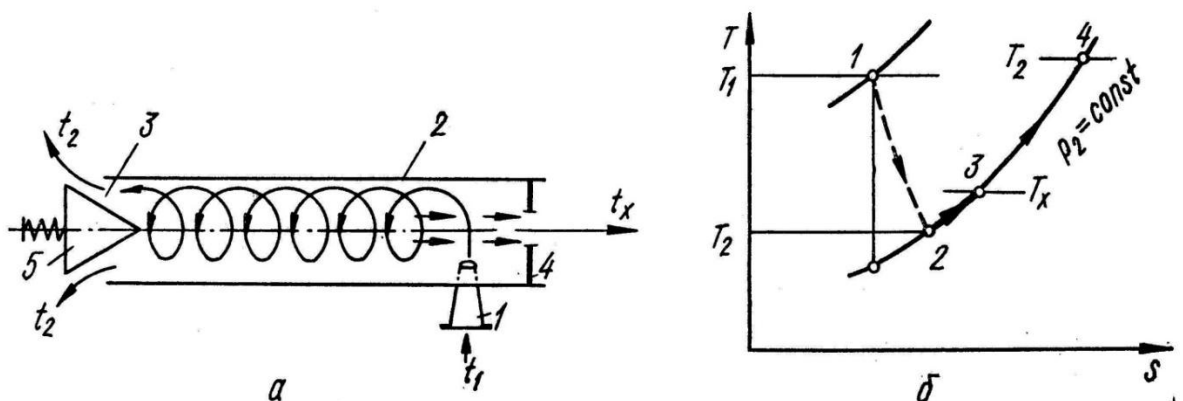


Рис. 4.61 Схема вихрової трубки (а) і процес охолодження на T – s-діаграмі (б). 1 – сопло, 2 – труба, 3 – регулюючий патрубков, 4 – діафрагма.

Поширення вона не набула із-за великої шумності, необхідності підведення стисненого (до 10-20 атмосфер) повітря і дуже великої його витрати, низького ККД. Переваги – більша безпека використання, так як у їх конструкції не використовується електрика, немає ні рухомих механічних частин, ні небезпечних хімічних сполук; довговічність, надійність.

Повітряно-розширювальні холодильні машини відносяться до класу холодильно-газових машин. Холодоагентом служить повітря. В області температур близьких до  $-80^{\circ}\text{C}$  економічна ефективність повітряних машин нижча, ніж парокompресійних. Більш економічними є регенеративні повітряні холодильні машини, в яких повітря перед розширенням охолоджується або в протиточному теплообміннику, або у теплообміннику-регенераторі. У залежності від тиску використаного стисненого повітря повітряні холодильні машини розділяються на машини високого та низького тиску. Розрізняють повітряні машини, що працюють за замкненим і розімкненим циклом.

### ***Принцип дії термоелектричних холодильних машин***

Робота термоелектричного холодильника базується на ефекті Пельтьє. Він безшумний, але великого розповсюдження не отримав через дороговизну охолоджуючих термоелектричних елементів. Тим не менше, сумки-холодильники, невеликі автомобільні холодильники часто робляться з охолодженням від елементів Пельтьє.

Термоелектричний холодильник працює на основі ефекту Пельтьє, який полягає у виділенні або поглинанні теплоти при проходженні електричного струму через спай термопари. На Рис. 4.62 схематично показано поперечний переріз такого холодильника об'ємом  $65\text{ дм}^3$ , здатного підтримувати температуру холодильної камери на  $10^{\circ}\text{C}$  нижче температури навколишнього середовища. У верхній частині розташовані 72 термоелементи, що забезпечують охолодження, які споживають велику частину з 135 Вт електроенергії, необхідної для роботи холодильника. У каналі обдування повітрям розташовані спеціальні ребра для кращого

відведення тепла, а в камері встановлені пластини для збільшення поверхні теплообміну. Подібні холодильники на суднах розраховані на зберігання шести тонн заморожених або охолоджених продуктів. Промисловість випускає й інші типи термохолодильників, зокрема термостати для лабораторних потреб.

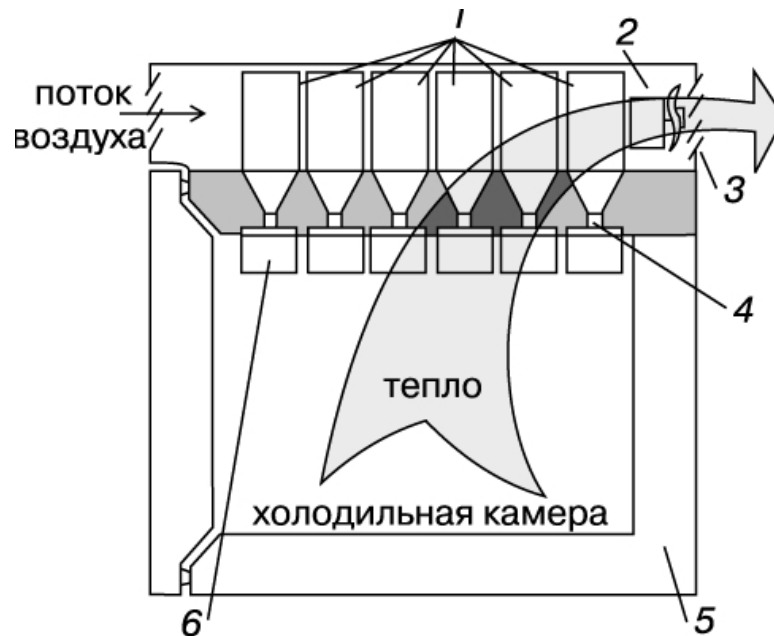


Рис. 4.62 Термоелектричний холодильник. 1 – охолоджуючі ребра, 2 – вентилятор, 3 – жалюзі, 4 – термоелементи, 5 – теплова ізоляція, 6 – холодні пластини.



