

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ І
СИСТЕМИ АПВ**
Частина 1
Котельні агрегати

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

СУМИ – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ І
СИСТЕМИ АПВ
Частина 1
Котельні агрегати

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

для здобувачів 4 та 3 с.т. курсу
освітньої програми «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
денної та заочної форм здобуття освіти
ступеню вищої освіти «бакалавр»

СУМИ – 2025

УДК 621.18(072)
Ч 44

Укладачі: **Чепіжний А.В.**, к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Козін В.М., к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сіренко В.Ф., к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем

Ч 44 Теплоенергетичні установки і системи АПВ : конспект лекцій. Частина 1. Котельні установки / укл. А. В. Чепіжний, В. М. Козін, В. Ф. Сіренко – Суми, 2025 – 49 с.

В конспекті лекцій частина 1 наведено основні принципи роботи теплоенергетичних установок, що використовуються в галузі АПВ їх основні характеристики. Також наведено основні відновлювальні джерела енергії, що використовуються в даній галузі.

Рецензенти:

Коноплянченко Є.В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування
Лобода В.Б., к.т.н., професор кафедри охорони праці та фізики

Відповідальний за випуск:

Чепіжний А.В. к.т.н., доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем

Рекомендовано до видання Радою із забезпечення якості освітньої діяльності та якості вищої освіти інженерно-технологічного факультету.
Протокол №4 від 28.01.2025 року

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН

№ з/п	Тема	Кількість годин
1	Джерела теплової енергії	2
2	Паливо	2
3	Основи теорії горіння	2
4	Котельні установки. Тепловий та енергетичний баланси котельного агрегату	2
5	Допоміжне обладнання котельної установки	2
6	Водне господарство та водний режим котлів	2
7	Зовнішнє обладнання котлоагрегатів	2
8	Електростанції з двигунами внутрішнього згорання	2
9	Компресорні машини	2
10	Теплогенератори, водонагрівачі та вентилятори	2
11	Газопостачання сільського господарства	2
12	Особливості використання газу в сільському господарстві	2
13	Системи теплопостачання	2
14	Відновлювані та вторинні енергоресурси у сільському господарстві	2
15	Теплонасосні установки в сільському господарстві	2
ВСЬОГО		30

ВСТУП

Вивчення дисципліни «Теплоенергетичні установки і системи АПВ» дозволить сформулювати у здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня освіти теоретичних знань та практичних навичок з питань застосування теплової енергії в агропромисловому виробництві, а також навичок у вирішенні конкретних інженерних завдань по проектуванню, використанню теплоенергетичного обладнання та мереж. Також вивчення дисципліни «Теплоенергетичні установки і системи АПВ» в цілому ефективно вирішувати проблему теплопостачання аграрного виробництва.

Метою дисципліни «Теплоенергетичні установки і системи АПВ» є підготовка кваліфікованих інженерних кадрів в області теплоенергетичних установок і систем у агропромисловому виробництві. Ефективне вирішення проблеми енергозбереження можливо лише при умові врахування всіх складових системи теплопостачання, а також сучасних досягнень в указаній області.

Дисципліна «Теплоенергетичні установки і системи АПВ» базується на вивченні дисципліни «Джерела енергії та довкілля», «Теоретичні основи автоматики». Базуючись на отриманих знаннях при вивченні дисципліни «Теплоенергетичні установки і системи АПВ» здобувачі освіти впроваджують свої знання та практичні навички у вивчення дисциплін «Основи проектування енергетичних об'єктів АПВ» та при підготовці та захисті кваліфікаційного (бакалаврського) проекту.

Конспект лекцій з дисципліни «Теплоенергетичні установки і системи АПВ», частина 1 – котельні установки призначена для вивчення питань пов'язаних з забезпеченням теплових процесів в АПВ та включає в себе лекційний матеріал з 1 по 7 тему з загального тематичного плану дисципліни.

ЗМІСТ

Лекція 1. Джерела теплової енергії.....	8
Лекція 2. Паливо.....	12
Лекція 3. Основи теорії горіння.....	20
Лекція 4. Котельні установки.....	26
Лекція 5. Допоміжне обладнання котельної установки.....	33
Лекція 6. Водне господарство та водний режим котлів.....	37
Лекція 7. Зовнішнє обладнання котлоагрегатів.....	42
Список використаної літератури.....	48

ЛЕКЦІЯ 1. ДЖЕРЕЛА ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

План

1.1. Джерела теплової енергії. Загальні відомості.

1.2. Енергетичні ресурси.

1.1. Джерела теплової енергії. Загальні відомості

Горюче паливо. Для одержання тепла люди спалюють горючі речовини. Найбільше тепла у процесі горіння дають паливні корисні копалини, які ще називають горючими. Це різні види вугілля, нафта, природний газ, торф тощо.

Сьогодні людство використовує багато нафти, газу та вугілля. Їхні запаси зменшуються набагато швидше, ніж утворюються нові поклади, адже процес утворення паливних корисних копалин триває мільйони років. Саме тому горючі корисні копалини належать до невідновлюваних ресурсів. Невідновлювані природні ресурси – це ресурси природи, які після їхнього використання або не відновлюються зовсім, або відновлюються впродовж дуже тривалого часу, або відновлюються значно повільніше, ніж споживаються (рис. 1.1а). Не лише видобуток, а й спалювання горючих копалини завдає шкоди нашій планеті. Під час горіння вугілля, газу або торфу в атмосферу потрапляє величезна кількість диму, складником якого є вуглекислий газ. А збільшення його кількості в атмосфері – одна з причин зміни клімату на нашій планеті.

Сьогодні пропонують використовувати такі джерела теплової енергії, які майже не шкодять довкіллю: енергію води, вітру й Сонця, внутрішню енергію Землі та енергію рослин (біомаси) (рис. 1.1б). Використання таких джерел теплової енергії називають «зеленою енергетикою».

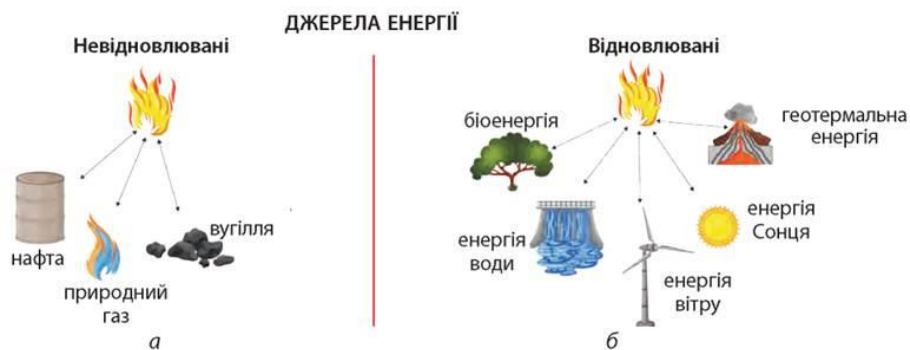


Рисунок 1.1. Невідновлювані (а) й відновлювані (б) джерела енергії

Сьогодні ми використовуємо енергію вітру для виробництва електричної енергії. Чим більша швидкість вітру, тим більше енергії виробляє вітрова установка. Сьогодні на території України функціонує 14 вітрових електричних станцій.

Сонячна енергія. Сонце є величезним джерелом теплової енергії, яку також можна використовувати для потреб людства. Випромінювання Сонця дуже потужне: якщо людство навчиться його використовувати, то це вирішить багато енергетичних проблем на Землі. Для використання енергії Сонця

створюють спеціальні системи, які можна розмістити на даху або стінах будинків (рис. 1.2). Так будівлі перетворюються на «постачальників» тепла.



Рисунок 1.2. Сонячне тепло нагріває воду в спеціальних трубках.
Будинок забезпечений теплою водою

Джерелом геотермальної енергії є природне тепло глибинних шарів Землі, яке нагріває підземні води. Використовуючи це тепло, людство змогло б суттєво зменшити використання паливних корисних копалин. Але геотермальну енергію поки що мало використовують. Утім в Ісландії вона забезпечує опалення половини всіх будинків. В Україні також є джерела геотермальної енергії, зокрема в Карпатах і Криму.

Паливні корисні копалини є найпоширенішими сьогодні джерелами теплової енергії. Це нафта, газ, вугілля, торф тощо. Горючі копалини належать до невідновлюваних ресурсів. Відновлювальні джерела теплової енергії – це вода, вітер, Сонце, тепла енергія Землі. Ці види енергії значно безпечніші для довкілля.

1.2. Енергетичні ресурси

Законсервована» енергія Сонця. Ми використовуємо теплову енергію, що виділяється під час згоряння вугілля, нафти та природного газу.

Паливні корисні копалини формувалися багато мільйонів років із решток відмерлих рослин і тварин під дією високого тиску й температури в глибині Землі. А рослини й тварини на нашій планеті, як ви знаєте, існують завдяки енергії Сонця. Рослини безпосередньо поглинали енергію сонячних променів, травоядні тварини харчувалися рослинами, а хижаки – травоядними тваринами. Із часом рештки рослин і тварин у надрах Землі перетворилися на паливні корисні копалини (рис. 1.3). Саме тому теплову енергію, що виділяється під час спалювання палива, можна назвати «законсервованою» енергією Сонця.



Рисунок 1.3. Кам'яне вугілля загальний вигляд

Паливні ресурси Землі. Сукупність паливних корисних копалин на нашій планеті називають паливними ресурсами Землі. До них належать газ, нафта, вугілля, торф, горючі сланці. За фізичними ознаками паливні копалини

поділяють на тверді (вугілля, горючі сланці, торф), рідкі (нафта), газоподібні (природний газ).



Рисунок 1.4. Паливні ресурси Землі

Вугілля. Вугілля людина використовує з давніх-давен. Це одна з найпоширеніших природних копалин. Вугілля – це тверда осадова гірська порода. Воно утворилося із залишків рослин під дією тиску й високої температури. Обов'язковою умовою утворення вугілля є відсутність кисню. Найкращі умови для утворення вугілля були в болотах.

За вмістом вуглецю вугілля поділяють на буре, кам'яне та антрацит (рис. 1.5). Найкращі паливні властивості в антрациті. Україна посідає восьме місце у світі за запасами вугілля.



Рисунок 1.5. Вугілля: а – кам'яне; б – буре

Нафта. Нафта є джерелом рідкого природного палива на нашій планеті. Це густа масляниста рідина (рис. 1.6). Її колір здебільшого темно-коричневий, але іноді знаходять поклади безбарвної нафти.



Рисунок 1.6. Нафта – густа масляниста рідина

Більшість із наукової спільноти вважають, що нафта утворюється на глибині понад 2 км із рештків вимерлих рослин і тварин за умов високої (до 100-200°C) температури. Їхнє перетворення на нафту триває мільйони років (рис. 1.7).

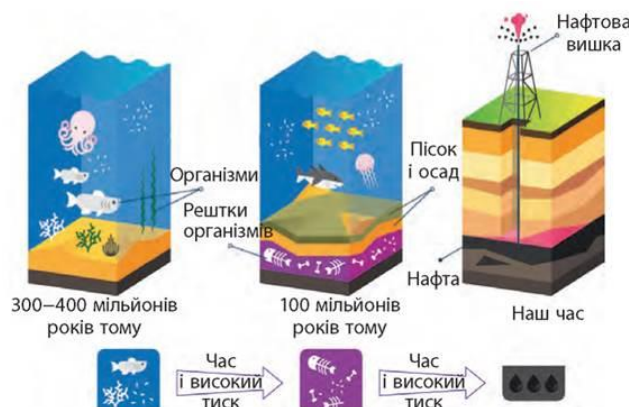


Рисунок 1.7. Процес утворення нафти з відмерлих організмів

1853 року у Львові було отримано перший у світі патент на виготовлення гасу з нафти. Його почали активно використовувати як джерело світла в газових лампах. Саме це привело до підвищення попиту на «чорне золото», як іноді називають нафту, і розвитку її видобутку у світі. Існує ще одна теорія походження горючих копалин, за якою вони мають мінеральне (вулканічне) походження. На початку XX століття французький науковець Поль Сабатьє змодельовав відповідний процес у своїй лабораторії. У результаті він отримав суміш, подібну до нафти.

Природний газ. Ще однією поширеною паливною копалиною є природний газ. Він утворюється під землею внаслідок розкладання різних органічних речовин за умов відсутності кисню. Часто газ називають «блакитним золотом». Це газоподібна безбарвна речовина, що не має запаху. Чому ж тоді «блакитне»? Таку назву газ отримав через колір полум'я під час горіння.

Людина використовує великі обсяги газу в промисловості та побуті. Він легко займається і в разі витіку може спричинити вибух. А за великого вмісту в повітрі чинить задушливу дію на організм людини. Тому під час використання газу в побуті слід дотримуватися правил безпеки поводження з газовими приладами. Природний газ не має запаху, тому, щоб можна було визначити витік газу, до нього додають спеціальні речовини. Саме їхній запах ми відчуваємо, якщо є його витік.

250 років тому надра України прославилися великими запасами нафти. «Чорне золото» знайшли на незначній глибині в кілька десятків метрів. Тому видобували його через нафтові копанки. Від 1771 р. на території сучасної Івано-Франківської області розпочалася промислова розробка нафти. Разом із підприємствами біля м. Борислав (Львівська область) цей нафтопромисел став найбільшим у Європі на той час.

Сукупність паливних корисних копалин на нашій планеті називають паливними ресурсами Землі. До них належать вугілля, газ, нафта, горючі сланці та торф. Майже всі паливні ресурси утворилися в надрах Землі із залишків рослин і тварин під дією тиску й високої температури впродовж мільйонів років. Усі паливні копалини є важливими для людства.

Питання для самоконтролю

1. Які властивості горючих корисних копалин дозволяють використовувати їх для господарської діяльності людини?
2. Назвіть головні джерела теплової енергії, які використовувало людство в минулому. Чи змінилося їх використання сьогодні?
3. Як впливає на довкілля використання горючих корисних копалин?
4. Чому все частіше людство використовує «зелену енергетику»?
5. Чи можна сказати, що Сонце випромінює необмежено велику кількість енергії?
6. Які корисні копалини належать до паливних ресурсів Землі?
7. Які паливні ресурси є в Україні? Для відповіді використайте карту корисних копалин України.

ЛЕКЦІЯ 2. ПАЛИВО

План

- 2.1. Загальні відомості.
- 2.2. Склад і характеристика палива.
- 2.3. Тверде паливо.
- 2.4. Рідке паливо.
- 2.5. Газоподібне паливо.

2.1. Загальні відомості

Основним джерелом енергії, що використовується людиною, є паливо. Паливом називають горючу речовину, яку спалюють для одержання необхідної кількості теплоти. За агрегатним станом паливо поділяють на тверде, рідке та газоподібне. Воно може бути органічним і ядерним, а за походженням – природним та штучним.

В органічному паливі теплота виділяється у результаті реакцій сполучення горючих складових із окиснювачем - киснем повітря. В ядерному паливі - при реакціях розпаду атомних ядер деяких ізотопів важких елементів (урану U_{235} та U_{233} плутонію Pu_{239}).

Органічне паливо – горюче, ядерне – розщеплюється. Органічне паливо поділяють на викопне природне та штучне. Викопне природне паливо є продуктом біологічних та хімічних перетворень речовини рослин та мікроорганізмів, що існували мільйони років тому. Воно нагромаджене у надрах Землі.

Штучне органічне паливо створене людиною шляхом відповідної переробки природних сполук. Штучне паливо поділяють на композиційне і синтетичне. Композиційне паливо являє собою механічну суміш горючих (наприклад, пропан-бутан). Синтетичне паливо – це продукт термохімічної переробки горючих речовин, у результаті якої вони набувають нових властивостей, що задовольняють споживача більшою мірою. До синтетичного палива відносять: продукти переробки нафти; рідке паливо, що одержують з вугілля; етанол з рослинності тощо.

Для теплопостачання сільського господарства в основному використовують природне органічне паливо.

Поняття «паливо» є категорія не тільки технічна, а й економічна та екологічна, оскільки у кожному конкретному випадку його використання має бути ефективним. До того ж, при спалюванні палива необхідно створити умови для якомога меншого забруднення навколишнього середовища.

Класифікація основних видів палива за його походженням та агрегатним станом наведена нижче у таблиці.

Таблиця 2.1. – Класифікація палива

Агрегатний стан палива	Походження палива	
	природне	штучне
Тверде	Викопне (торф, буре та кам'яне вугілля, антрацит, горючі сланці), дрова, відходи с.-г. виробництва	Кокс, напівкокс, торфові та кам'яновугільні брикети, деревне вугілля
Рідке	Нафта	Топкові мазути, паливо пінкове побутове, дизельне, солярове масло, бензин тощо. Продукти переробки твердого палива. Синтетичне паливо
Газоподібне	Природний та попутний газ	Гази генераторний, доменний, коксовий та ін. Пропан-бутанові суміші. Біогаз

2.2. Склад і характеристика палива

Органічне паливо складається із горючих елементів – водню (H), вуглецю (C), сірки (S) та негорючих елементів – кисню (O) та азоту (N). Сірку, що міститься у паливі, поділяють на горючу, так звану летку сірку S_L , та негорючу SH . Горюча сірка складається із органічних S_{OP} та колчеданних S_K сполук: $S_L = S_{OP} + S_K$. Крім того, до складу палива входять волога W та зола A .

Вміст елементів визначають у відсотках за масою. Розрізняють робочу, суху, горючу та органічну маси органічного палива. Кожній складовій маси палива присвоюються відповідний надбудовний індекс.

Робоча маса:

$$C^P + H^P + S^P + O^P + N^P + A^P + W^P = 100 \% \quad (2.1)$$

Склад палива, висушеного при $t = 105-110^\circ\text{C}$, визначає його суху масу:

$$C^c + H^c + S^{lc} + O^c + N^c + A^c = 100 \% \quad (2.2)$$

Склад палива як горючого матеріалу визначається складом його горючої маси:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100 \% \quad (2.3)$$

Власне горючими у цій масі є вуглець, водень та сірка.

Органічна маса:

$$C^o + H^o + S^o + O^o + N^o = 100 \% \quad (2.4)$$

Сірка органічної маси не містить колчеданної складової.

Приведення елементного складу палива від сухої маси до іншої провадиться за допомогою коефіцієнтів, що ґрунтуються на відповідних пропорціях.

Газоподібне паливо являє собою суміш різних горючих (CO , H_2 , CH_4 , C) і негорючих (O_2 , N_2 , CO_2) газів і невеликої кількості водяної пари. Баластом у сухому природному газі є азот та діоксид вуглецю.

Склад газоподібного палива задається у відсотках до об'єму і всі розрахунки відносять до кубічного метра сухого газу за нормальних умов: тиску 101,3 кПа (760 мм рт. ст.) і температури 0°C . Вміст домішок (водяних парів, смоли, пилу) виражають у г/м^3 сухого газу.

Основним елементом горючої маси твердого і рідкого палива є вуглець. Із збільшенням віку твердого палива вміст вуглецю збільшується (від 40 % у деревині та до 93% – в антрациті). У робочій масі нафти та нафтопродуктів вміст вуглецю коливається у межах $C^p = 84\ldots 87\%$. За повного згоряння вуглецю утворюється діоксид вуглецю CO_2 і виділяється 32,8 МДж теплоти на 1 кг вуглецю.

При неправильній організації процесу горіння відбувається неповне згоряння вуглецю, внаслідок чого утворюється оксид вуглецю CO та виділяється всього 9,2 МДж теплоти.

Водень є складовою частиною будь-якого палива. У твердому паливі кількість водню може досягати 6%, у рідкому – 11-14%. При повному згорянні 1 кг водню виділяється 143,64 МДж теплоти.

У твердому паливі у більшості східних районів України вміст сірки невеликий ($S_{\text{гор+к}} < 1\%$); у деякому вугіллі (українському, підмосковному та ін.) вміст її зростає до 6-9%.

За вмістом сірки нафту і мазут поділяють на три класи: малосірчасті із вмістом сірки до 0,5%, сірчасті – від 0,51 до 2% і високосірчасті – більше 3,5%. При згорянні сірки утворюється токсичний сірчастий ангідрид SO_2 – (у невеликих кількостях) сірчаний ангідрид SO_3 . При повному згорянні сірки виділяється 10,92 МДж на 1кг сірки. Сірчасті гази у поєднанні із водяними парами спричиняють корозію сталевих поверхонь котла. Викиди SO_2 і SO_3 з продуктами згоряння викликають забруднення повітряного басейну і негативно впливають на тваринний і рослинний світ та здоров'я людини.

Вміст азоту у твердих видах палива не перевищує 2% (у вугіллі Кузнецького басейну $N^p = 1,9\%$, Донецького і Підмосковного басейнів $N^p = 0,6\%$; у горючих сланцях $N^p = 0,1\%$, у торфі – $N^p = 1,1\%$).

У генераторному газі, що одержується при газифікації твердого палива, вміст азоту може досягати 50 %. Азот є шкідливим компонентом, оскільки при спалюванні сполук, що містять азот, можуть утворюватись токсичні оксиди NO і NO_2 . Крім того, азот є внутрішнім баластом палива.

У паливі наявна певна кількість вологи у результаті її хімічної та фізико-хімічної взаємодії з твердою масою палива. Спільну вологу у твердому паливі умовно поділяють на зовнішню і гідратну. До зовнішньої вологи відносять пологу, що потрапила до маси палива під час його видобування, зберігання і транспортування за рахунок ґрунтових вод та з атмосферного повітря. Її називають вільною зовнішньою вологою. До зовнішньої відносять сорбовану пологу та вологу, що заповнює капіляри та пори маси паливної речовини, так звану зв'язану вологу. До гідратної пологи відносять колоїдну вологу палива і

вологу, що є складовою кристалогідратів мінеральних домішок палива. Гідратна волога становить невелику частину води, що міститься у паливі.

Максимальна вологість W^p робочої маси палива досягне 50% і більше. На перетворення 1 кг води, взятої при 0°C , у пару, слід витратити 2,5 МДж. Тому вміст вологи у паливі визначає як можливість забезпечення ефективного процесу його спалювання, так і доцільність використання даного горючого матеріалу. Вологість знаходять висушуванням наважки при $105-110^\circ\text{C}$.

Зола включає мінеральні домішки, занесені у паливо у період його утворення, а також частинки породи, що захоплюються при видобуванні.

Неспалювана частина палива утворює згорілі залишки, що складаються із золи та шлаку. Зола – порошкоподібний негорючий залишок, що утворюється при горінні палива. Шлак - мінеральні домішки, які при горінні палива розплавившись або спеклися. Він має певну міцність.

Зола з температурою плавлення 1200°C вважається низькоплавкою, понад 1500°C – тугоплавкою. Плавкість золи залежить від її хімічного складу.

При аналізі зольність палива визначають на суху масу шляхом прогартування при температурі $800-825^\circ\text{C}$ (для рідких видів палива – 500°C) попередньо висушеної проби до припинення зменшення маси. Зольність робочої маси обчислюють за формулою:

$$100A^p = (100 - W^p)A^c \quad (2.5)$$

Вміст золи у паливі коливається у широких межах. Зольність сухої маси палива A^c становить: для деревини – 1%, торфу – 10%, кузнецького вугілля – 10...20%, підмосковного бурого вугілля – 30%, сланців – до 60%. У рідкому паливі міститься невелика кількість мінеральних домішок (0.2-1%).

Важливою характеристикою горючої маси палива є вихід летких речовин. Чим більше летких речовин, тим більше при нагріванні палива виділяється горючих газів і, отже, простіше запалити це паливо і легше підтримувати стійке горіння. Вихід летких речовин V^r , у % на горючу масу, визначають шляхом прогартування 1 г палива у закритому тиглі при $850 \pm 10^\circ\text{C}$ протягом 7 хв. Для деревини і сланців $V^r = 85-90\%$, для антрацитів $V^r = 3-4\%$. Для бурого вугілля та кам'яного вихід летких речовин коливається у межах 9-50%, для торфу він дорівнює 70%.

Теплота згоряння палива – це параметр, що характеризує його енергетичну цінність. Теплота згоряння дорівнює кількості теплоти, яка може виділятися при повному згорянні 1 кг маси твердого або рідкого палива або 1 м^3 газового палива за нормальних фізичних умов. Відповідно одиниці вимірювання теплоти згоряння – кДж/кг і кДж/м³ (або МДж/кг і МДж/м³).

Розрізняють вищу та нижчу теплоту згоряння. Вищою теплотою згоряння Q_p називають кількість теплоти, що виділяється при згорянні палива з урахуванням теплоти конденсації водяних парів, що утворюються при згорянні водню H^o і випаровуванні вологи палива W^p . Якщо з Q_p^B відняти величину теплоти конденсації водяних парів, одержимо нижчу теплоту згоряння Q_p^H . Оскільки 1 кг водню дає при згорянні 9 кг води, а теплота конденсації 1 кг водяної пари дорівнює близько 2,5 МДж, то:

$$Q_p = Q_p^H - 0,025(9H^p + W^p) \quad (2.6)$$

Значення H^p і W^p підставляють у цю формулу в %, Q_p і Q_p^H – у МДж/кг.

У теплотехнічних розрахунках теплоту згоряння палива, МДж/кг, визначають за формулою Менделєєва:

$$Q_p = 0,339C^p + 1,03H^p - 0,109(Q_p - S^p) - 0,025W^p \quad (2.7)$$

Нижчу теплоту згоряння сухого газоподібного палива розраховують за теплою згоряння його компонентів, МДж/м³:

$$Q_p = 0,127CO + 0,108H_2 + 0,234H_2S + 0,358CH_4 + 0,59C_2H_4 + 0,638C_2H_6 + 0,913C_3H_8 + 1,4C_6H_6 \quad (2.8)$$

Для порівняння різних видів палива при визначенні енергетичних балансів, а також оцінки паливних енергоресурсів всі види палива по теплоті згоряння приводять до єдиного еквівалента. Таким тепловим еквівалентом служить одиниця умовного палива (у.п.), що має теплоту згоряння 29,308 МДж/кг (7000 ккал/кг). Для перерахунку реальних палив в умовне паливо використовують тепловий еквівалент у кг у.п./кг:

$$E = \frac{Q_p^H}{29,308} \quad (2.9)$$

Усереднені значення теплових еквівалентів основних видів палива дорівнюють: для вугілля – 0,72, природного газу – 1,17-1,2, нафти – 1,43, мазуту – 1,3, торфу – 1,4, дров – 0,25. Для вологості, зольності і сірки, що містяться у паливі, користуються поняттям зведених характеристик. Вони дорівнюють вмісту відповідного компонента у паливі (W^p , A^p , S_L^p), поділеному на нижчу теплоту згоряння палива:

$$W_{\pi} = \frac{W^p}{Q_p^H}; A_{\pi} = \frac{A^p}{Q_p^H}; S_{\pi} = \frac{W^p}{Q_p^H} \quad (2.10)$$

Використання наведених характеристик спрощує виконання розрахунків, пов'язаних із певним визначенням характеристик палива.

2.3. Тверде паливо

Тверде органічне паливо – це деревина, торф, буре вугілля, кам'яне вугілля і антрацит. Цінність палива як горючої речовини визначається його хімічним складом і основними властивостями.

Дрова за геологічним віком – наймолодше органічне паливо. Вони містять понад 60% целюлози, близько 30% лігніну і приблизно 1% мінеральних домішок. Для різних порід склад органічної маси дров приблизно однаковий: $C^r = 50\%$, $H^r = 6\%$, $O^r = 43\%$, $N^r = 1\%$.

Основним баластом у дровах є волога, вміст якої у свіжозрубаних деревині досягає 50-60%. Дрова бувають сухі з вологістю менше 25%, напівсухі з вологістю 25-35% і сирі з вологістю понад 35%. Зольність дров на робочу масу не перевищує 1%. Теплота згоряння горючої маси дров становить 18,8-19,2 МДж/кг, проте при вологості 30% вона знижується до 13-13,3 МДж/кг.

Торф – молоде за геологічним віком викопне паливо. Він утворюється у результаті розкладання рослинності в умовах надлишку води і незначного доступу повітря. Розрізняють торф моховий, або верховий, з незначним

вмістом золи (2-4%) і лучний, або низинний, із зольністю 8-16%. Зустрічаються торф'яники змішаного перехідного походження, зольність яких дорівнює 7-9%. Вологість свіжо видобутого торфу становить приблизно 90%. У процесі природного сушіння його вологість знижується до 40%. Органічна маса торфу характеризується таким складом: $C^r = 55-56\%$, $H^r = 6\%$, $O^r = 35-40\%$, $N^r = 0,5-3\%$, $S^r = 0,12-1,5\%$. Нижча теплота згоряння горючої маси торфу становить близько 12,6 МДж/кг.

У шарових топках спалюють кусковий торф, що формується у процесі видобування у вигляді цеглин із наступним їх сушінням. Найбільше застосовують в енергетиці фрезерний торф, що одержують у вигляді дрібняку. Такий торф використовують у топках камерного типу.

Сланці складаються із вапняків, що просякнуті продуктами розкладу рослин і тваринних організмів без доступу повітря. Вони відрізняються високим вмістом золи (50-60%) і вологи (15-25%). У горючій частині сланців високий вміст кисню (до 10 %) і великий вихід летких речовин (до 90%), тому вони легко займаються. Значна зольність різко знижує теплову цінність сланців; їх теплота згоряння коливається у межах 5,8-10,8 МДж/кг. У сільському господарстві сланці, як і торф, використовують як місцеве котельне паливо.

Буре вугілля – паливо рослинного походження старішого розкладання, ніж торф. Воно має високу зольність (15-30%) і вологість (15-30%), тому діапазон значення його теплоти згоряння великий – 6,3-18,9 МДж/кг. За вологістю його поділяють на три групи: групу Б1 із вмістом вологи понад 40%, групу Б2 із вмістом вологи 30-40% і групу Б3 із вмістом вологи до 30%. Склад горючої маси бурого вугілля дуже неоднорідний: $C^r = 65-78\%$, $H^r = 4,3-6,2\%$, $O^r = 16-17\%$, $N^r = 0,7-1,8\%$, $S^r = 0,4-3,9\%$. Вихід летких речовин на горючу масу становить 30-60%.

Буре вугілля має схильність до самозаймання. Тому його рекомендується вкладати у штабелі висотою до 2,5 м і зберігати не більше місяця. Кам'яне вугілля утворювалось у результаті повільного розкладу деревовидних рослин без доступу повітря протягом мільйонів років. Це основний вид твердого палива в енергетиці. За складом органічної маси кам'яне вугілля неоднорідне: $C^r = 78-90\%$, $H^r = 4,0-5,8\%$, $O^r = 3-15\%$, $N^r = 0,5-2,0\%$, $S^r = 1-6\%$. Зольність кам'яного вугілля на робочу масу становить 10-25%, вологість 5-12%, вихід летких речовин 9-50%. Нижча теплота згоряння робочої маси коливається від 20,7 до 31,4 МДж/кг. Кам'яне вугілля поділяють на марки, які розрізняють за виходом летких речовин і характером леткого залишку.

Таблиця 2.2. Марки кам'яного вугілля

Вугілля	Марка	Q_p^H , МДж/кг	Вугілля	Марка	Q_p^H , МДж/кг
Довгополумєневе	Д	Понад 37	Пісне спікливе	ОС	14...22
Газове	Г	35	Слабкоспікливе	СЕ	25...37
Жирне	Ж	27...35	Пісне	Т	8...17
Коксове	К	18...27			

Антрацити мають найдавніший геологічний вік серед твердого палива. Вони чорного кольору, їм властиві високі щільність і міцність, їх можна перевозити на великі відстані без помітного подрібнення. Вологість антрацитів 3-7%, зольність 10-18%, вихід летких речовин 2-9%, теплота згоряння 25-27 МДж/кг.

Відходи с.-г. виробництва використовують як паливо для виробничих та побутових потреб. До них відносять соломку, стебла соняшника і бавовни, кострицю, лушпиння соняшника, рисову лузгу тощо. За складом органічної маси ці відходи близькі до деревини. З відходів с.-г. виробництва із застосуванням зв'язуючих речовин одержують брикети. Вони найзручніші для спалювання.

2.4. Рідке паливо

Рідке паливо, що використовують для потреб теплоенергетики, одержують методами його термохімічного розкладу. Нафта складається в основному з вуглеводнів трьох класів: метанові вуглеводні – метан, етан, пропан, бутан, ізобутан тощо; нафтенові вуглеці – циклогексан тощо; ароматичні вуглеці – бензол, толуол, нафталін тощо.

Склад нафти такий: $C^p = 83-87\%$, $N^p = 11-14\%$, S^p від 0,01% – у малосірчистих нафтах; до 5-7% – у високо-сірчистих, $O^p = 0,1-0,3\%$, $N^p = 0,02-1,7\%$. Нижча робоча теплота згоряння нафти $Q_p = 40-46$ МДж/кг. Природні нафта містить не більше 0,3% мінеральних домішок і 2% води.

Із нафти, залежно від температури перегонки, одержують нафтопродукти: бензинові, газові, дизельні, соляркові, мазутні. Для побутового опалення випускають пічне побутове паливо (ППП). У великих опалювальних котельнях, що працюють на рідкому паливі, звичайно застосовують мазут, а у невеликих котельнях та побутових установках – пічне побутове паливо.

Мазути, що застосовують у котлах, поділяють на топкові марок 40В і 40 (паливо середньої в'язкості) і топкові мазута 100В, 100 і 200 (паливо важке).

За вмістом у них сірки топкові мазути ділять на три групи: мало сірчисті ($S_p < 0,5\%$), сірчисті ($S_p = 0,5-2\%$) і високо сірчисті ($S_p > 2\%$). Зольність мазутів не перевищує 0,1-0,3%. Вміст води у мазуті коливається у великих межах (0,5-5%). Теплота згоряння мазуту становить 39-42 МДж/кг. Температура спалаху дорівнює 80-140°C. В'язкість, що визначається при температурах 50, 80 і 100°C, коливається у межах 5-16В. Густина мазуту дорівнює 0,98-1,05 т/м³.

Пічне побутове паливо широко використовується у с.-г. виробництві. На цьому паливі працюють парові та водогрійні котли, теплогенератори, зерносушарки, установки для комунально-побутових потреб. Пічне паливо виробляється з нафти. Температура його застигання не вище -15°C і тому ємкості, де зберігається паливо, і баки, звідки воно надходить до установок для спалювання, розміщують в утеплених приміщеннях.

Пічне побутове малов'язке паливо (із умовною в'язкістю не більше 1,15°ВУ). Температура спалаху не нижча +42°C. Нижча теплота згоряння у перерахунку на сухе паливо – не менше 41,2 МДж/кг.

Гас використовують як паливо у теплогенераторах і сушарках, а також для побутових потреб.

Дизельне паливо випускають двох марок ДТ і ДМ. Паливо марки ДТ має в'язкість при 50°C менше 5°ВУ, температуру спалаху понад 65°C, температуру застигання менше -5°C. Паливо марки ДМ характеризується в'язкістю при температурі 50°C, що дорівнює 20°ВУ, температурою спалаху 85°C, температурою застигання -10°C. Нижча теплота згоряння дорівнює приблизно 42,5 МДж/кг. Дизельне паливо використовують в основному у дизелях, у тому числі у дизельних електростанціях.

2.5. Газоподібне паливо

Газоподібне паливо поділяють на природне і штучне. До природного відносять газ, що видобувається з газових родовищ, попутний газ, одержуваний одночасно із видобутком нафти, а також газ, який видобувається із конденсатних родовищ. До штучних відносять гази, що одержують при переробці нафти, перегонці твердого палива, анаеробній ферментації відходів (біогаз), а також зріджені гази.

Гази, що видобуваються із газових родовищ, складаються в основному з метану (85-95%). Вміст у них $N_2 = 0-4\%$, CO_2 – не більше 15%, H_2S – не більше 6%. Нижча теплота згоряння цих газів $Q_p^H = 33-40$ МДж/кг.

Таблиця 2.3. Характеристики палива

Родовище, Вид палива	Марка	Склад робочої маси, %								Склад повітря і продуктів згоряння, м³/кг				Теплота згоряння Q_p^H , МДж/кг	Вихід легких речовин, %
		W ^P	A ^P	S _к ^P	S _{сп} ^P	C ^P	H ^P	N ^P	O ^P	V ^o	V _{RO2}	V _{N₂} ^o	V _{H₂O} ^o		
Тверде паливо															
Донецьке	Д	13,0	24,4	1,8	1,3	47,0	3,4	1,0	8,1	4,91	0,9	3,89	0,62	18,5	43
	Г	10,0	25,2	2,1	1,1	51,2	3,6	0,9	5,9	5,92	0,98	4,29	0,61	20,47	40
Тверде паливо															
	Ж	6,0	26,3	2,0	0,7	56,5	3,5	1,0	4,0	5,91	1,7	4,67	0,56	22,4	32
	Т	6,0	25,4	1,6	0,8	61,1	2,9	1,0	1,2	6,24	1,16	4,94	0,5	23,4	12
	А	8,5	30,2	1,1	0,5	56,4	1,1	0,5	1,7	5,3	1,06	4,19	0,31	19,97	4
Львівсько-Волинське	Г	10,0	22,5	2,1	0,9	53,3	3,5	1,0	6,7	5,54	1,02	4,39	0,6	20,85	39
	ГЖ	8,0	32,2	2,1	0,7	49,7	3,3	0,7	4,3	5,15	0,93	4,08	0,55	19,38	36
Рідке паливо															
Мазут:															
малосірчистий	-	3,0	0,05	-	0,3	84,65	11,7	0,3	-	10,62	1,58	8,39	1,51	40,28	-
сірчистий	-	3,0	0,1		1,4	83,8	11,2	0,5	-	10,45	1,57	8,25	1,45	39,73	-
високосірчистий	-	3,0	0,1		2,8	83,0	10,4	0,7	-	10,2	1,57	8,06	1,36	38,77	-
Гас	-	-	-		0,2	86,0	13,7	0,1	-	11,28	1,61	8,91	1,7	43,0	-
Дизельне паливо	-	-	-		0,3	86,3	13,3	0,1	-	11,2	1,62	8,85	1,66	42,65	-
Солярове масло	-	-	-		0,3	86,5	12,8	0,4	-	11,08	1,62	8,77	1,6	42,4	-
Пічне побутове паливо	-	-	-		0,5	86,0	13,5	-	-	11,24	1,61	8,88	1,68	39,8	-

Генераторний газ одержують при перегонці твердого палива (кам'яне або буре вугілля, дрова, торф) із нестачею повітря близько 60% у спеціальних

установках – газогенераторах. Склад генераторного газу коливається у межах: $\text{CO} = 25\text{-}30\%$, $\text{H}_2 = 12\text{-}15\%$, $\text{CH}_4 = 0,5\text{-}3,5\%$, $\text{CO}_2 = 5\text{-}8\%$, $\text{O}_2 = 0,20,5\%$, $\text{N}_2 = 45\text{-}50\%$. Нижча теплота згоряння генераторного газу $5\text{...}6,5 \text{ МДж/м}^3$.

Таблиця 2.4. Характеристика природного газоподібного палива

Родовище, газопровід	Склад газу по об'єму, %							Теплота згоряння МДж/м^3	Густина, кг/м^3 , при $t=0^\circ\text{C}$ і $p=101,3 \text{ кПа}$
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2		
Єфремівське	93,2	3,9	0,81	0,28	0,18	0,20	1,4	33,4	0,770
Джанкойське	96,0	0,5	0,20	0,04	-	0,20	3,0	32,5	0,740
Пролетарське	36,2	5,3	2,4	2,0	1,55	0,10	1,5	38,6	0,874
Дашава – Київ	93,9	0,3	0,10	0,10	-	0,2	0,4	35,9	0,712
Шебелинка – Дніпропетровськ	92,8	3,9	1,0	0,4	0,3	-	1,5	37,3	0,781

Питання для самоконтролю

1. Що таке теплота згоряння?
2. Які типи мас палива розрізняють?
3. Що є баластом у сухому природному газі?
4. Що відбувається при неправильній організації процесу горіння палива?
5. Що відноситься до твердих видів палива?
6. Який тип рідкого палива використовують для спалювання в котельних агрегатах?

ЛЕКЦІЯ 3. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ГОРІННЯ

План

- 3.1. Загальні відомості.
- 3.2. Кінетичні основи процесу горіння.
- 3.3. Фізичні уявлення про горіння палива.
- 3.4. Горіння твердого палива.
- 3.5. Горіння рідкого палива.
- 3.6. Горіння газоподібного палива.

3.1. Загальні відомості

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 концентрацій 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.

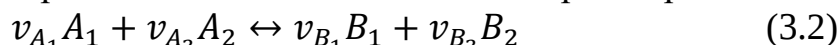
Реакція горіння відбувається не безпосередньо між молекулами вихідних речовин (палива і окислювача), а через проміжні стадії. Цим визначається ланцюговий механізм реакцій горіння, розроблений М.М. Семеновим. Реакція горіння є результатом ряду ланцюгових реакцій, що перебігають послідовно. Залежно від 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 випарюваних рідких палив. При цьому мається на увазі їх перемішування з окислювачем до процесу горіння. Прикладами гетерогенного горіння служить горіння твердих палив і горіння крапель важких рідких палив, коли фронт горіння встановлюється на межі розділу палива і окислювача. Горіння палива є потоковим процесом і для його перебігу необхідне підведення компонентів (палива і окислювача) у зону реакції і відведення з неї продуктів згоряння. Організація перебігу процесу горіння можлива у ламінарному та у турбулентному потоках окислювача. У загальному випадку час горіння τ_r палива складається із часу перебігу фізичних τ_ϕ і хімічних τ_x процесів:

$$\tau_r = \tau_\phi + \tau_x \quad (3.1)$$

3.2. Кінетичні основи процесу горіння

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 концентрацій речовин, що реагують.

До зворотної хімічної реакції можна скласти стехіометричне рівняння:



де A_1, A_2, B_1, B_2 – хімічні символи речовин, що реагують; $\nu_{A_1}, \nu_{A_2}, \nu_{B_1}, \nu_{B_2}$ – стехіометричні коефіцієнти.

Швидкість прямої реакції виражається рівнянням:

$$\omega_1 = k_1 C_{A_1}^{\nu_{A_1}} \cdot C_{A_2}^{\nu_{A_2}} \quad (3.3)$$

і відповідно швидкість зворотної реакції:

$$\omega_2 = k_2 C_{B_1}^{\nu_{B_1}} \cdot C_{B_2}^{\nu_{B_2}} \quad (3.4)$$

де k_1 і k_2 – константи швидкості відповідно прямої та зворотної реакції; $C_{A_1}, C_{A_2}, C_{B_1}, C_{B_2}$ – поточні концентрації речовин, що реагують.

При хімічній рівновазі швидкості прямої та зворотної реакцій дорівнюють одна одній: $\omega_1 = \omega_2$.

У цьому випадку можна записати:

$$\frac{C_{A_1}^{\nu_{A_1}} \cdot C_{A_2}^{\nu_{A_2}}}{C_{B_1}^{\nu_{B_1}} \cdot C_{B_2}^{\nu_{B_2}}} = \frac{k_1}{k_2} = k_c \quad (3.5)$$

де k_c – константа рівноваги, що є постійною величиною.

Швидкість реакції значною мірою залежить від температури. Ця залежність виражається законом Арреніуса:

$$w = k_o e^{-E/(kT)} C_{A_1}^{v_{A_1}} \cdot C_{A_2}^{v_{A_2}} \quad (3.6)$$

де k_o – передекспоненційний множник, що визначається дослідним шляхом ($k_o \approx \sqrt{T}$); E – енергія активації, що дорівнює деякому потенціальному бар'єру, необхідному для руйнування початкових зв'язків у молекулі; R – універсальна газова стала; T – термодинамічна температура, К.

Швидкість реакції горіння різко збільшується із підвищенням температури. Тому для всіх реакцій горіння характерна особливість – щоб горіння відбулося, реагенти повинні мати температуру, не нижчу від деякого граничного значення.

Тепловиділення при екзотермічній реакції для горючої суміші пропорціональне швидкості реакції:

$$Q_p = \omega Q = k_o e^{-E/(kT)} C_{A_1}^{v_{A_1}} \cdot C_{A_2}^{v_{A_2}} \quad (3.7)$$

де Q – теплота реакції горючої суміші.

Самозаймання називають ініціювання горіння у всьому обсязі реакційної суміші. Воно може статися при досягненні деякого граничного значення температури, що називають температурою самозаймання t_c 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°C, оксиду вуглецю – 644-658°C, метану – 650-750°C. У більшості технічних пристроїв горіння ініціюється не шляхом самозаймання, а запалюванням за допомогою факела або електричної іскри.

3.3. Фізичні уявлення про горіння палива

Для перебігу реакції горіння необхідне перемішування компонентів (окислювача і палива) на молекулярному рівні, тобто забезпечення процесу масоперенесення компонентів, що реагують. У турбулентному потоці масоперенесення здійснюється за рахунок турбулентної дифузії, а у ламінарному потоці і у пограничному шарі – за рахунок молекулярної дифузії. Для розрахунку дифузійного масообміну між компонентами, що реагують, користуються рівнянням, аналогічним співвідношенню Ньютона для конвективного теплообміну:

$$j = \alpha_D \Delta C \quad (3.8)$$

де j – густина потоку маси, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; α_D – коефіцієнт дифузного обміну, $\text{м}/\text{с}$, аналогічний коефіцієнту теплообміну α ; ΔC – різниця концентрацій поблизу поверхні розділу фаз і в осередку потоку (середовища), $\text{кг}/\text{м}^3$. Коефіцієнт α_D визначають із критеріальних рівнянь масообміну, аналогічних критеріальним рівнянням конвективного теплообміну. Подібно до константи хімічної реакції k вводять поняття сумарної швидкості реакції $\bar{k}$, що оцінюється за швидкістю споживання одного з компонентів, що реагують. Константа швидкості реакції також виражає частоту активних стикань молекул, що ведуть до реакції, але з урахуванням дифузії і молекул

компонентів, що реагують. Величина $\frac{1}{k}$, тобто опір переходу газу, що реагує, у зону реакції із навколишнього середовища, складається із опору дифузії $1/\alpha_D$ і хімічного опору:

$$1/u = 1/\alpha_D + 1/k \quad (3.9)$$

Можна виділити два граничних режими процесу горіння. Режим, за якого $k \gg \alpha_D$, $1/\bar{k} \sim 1/\alpha_D$, має назву дифузійного. У цьому випадку сумарна швидкість реакції визначається інтенсивністю масоперенесення компонентів, що реагують, у зону реакції. Час згоряння палива τ_z лімітується в основному часом τ_d сумішоутворення. Режим, за якого $k \ll \alpha_D$, $1/\bar{k} \approx 1/\alpha_D$, і швидкість реакції визначається швидкістю реагування компонентів, називають кінетичним. Для цього режиму горіння лімітується часом самої хімічної реакції.

Дифузійний режим горіння відбувається при подаванні палива і окислювача нарізно (наприклад, при дифузійному горінні газу, горінні розпиленого рідкого і твердого палива). Він має місце при високій температурі процесу горіння. Кінетичний принцип горіння здійснюється при спалюванні попередньо ретельно перемішаних сумішей газоподібного палива і окислювача, а також при низькотемпературному горінні твердих палив.

Суміш палива і окислювача згоряє звичайно у вигляді полум'я. При ламінарному русі палива та окислювача утворюється фронт полум'я, що являє собою шар, який відділяє неспалену суміш від продуктів згоряння. За певних умов полум'я переходить у турбулентне. Швидкість поширення турбулентного полум'я практично пропорційна інтенсивності турбулентних пульсацій. Остання в свою чергу пропорційна швидкості газу.

Максимальна температура полум'я досягається при коефіцієнті надлишку повітря, що дорівнює $\alpha_n \approx 1$ (так звана стехіометрична суміш). Розрізняють нижню ($\alpha_n > 1$, бідна суміш) і верхню ($\alpha_n < 1$, багата суміш) концентраційні межі поширення полум'я. Поза цими межами процес горіння не ведеться.

3.4. Горіння твердого палива

Горіння твердого палива являє собою складний фізико-хімічний процес, що складається із ряду послідовних (іноді таких, що накладаються частково одна на одну) стадій: підсушування палива і нагрівання до температури початку виходу летких речовин; спалахування летких речовин та їх вигорання; вигорання горючих речовин із коксу.

Волога із палива випаровується при температурі порядку 100°C , а вихід летких речовин залежить від геологічного віку палива. У торфі він відбувається при $280\text{-}390^\circ\text{C}$, у бурого вугілля – при $420\text{-}540^\circ\text{C}$, у пісного вугілля і антрациту – при $780\text{-}800^\circ\text{C}$.

При горінні палива із низьким виходом летких речовин (пісне вугілля, антрацити) час горіння визначається, в основному, часом горіння коксу. Для

палив, багатих на леткі речовини (дрова, торф, деякі види кам'яного вугілля), час горіння визначається горінням летких речовин.

Леткі речовини чинять на горіння подвійний вплив. Від палаючого факела летких речовин швидше прогрівається кокс, проте вони перехоплюють основну масу кисню, що призводить до гальмування горіння коксу. В міру зменшення виходу летких речовин зростає інтенсивність горіння коксу.

Процес горіння твердого палива характеризується швидкостями горіння. При цьому розрізняють три зони горіння: кінетичну, проміжну та дифузійну.

У кінетичній зоні горіння лімітується хімічною реакцією, що посилюється із підвищенням температури процесу. У проміжній зоні швидкості дифузії та хімічної реакції мають однакові значення. Підведений до палива окислювач, головним чином, витрачається на горіння.

У дифузійній зоні такою, що лімітує, стає швидкість дифузії. Залежність зміни швидкості горіння від температури і співвідношення кінетичної та дифузійної зон горіння наведена на рис. 3.1.

Зола палива знижує теплоту його згоряння, зменшує горючу частину і при значних кількостях її у паливі утворюється покривний зольний шар, що утруднює доступ кисню до частинок палива. Горіння може ускладнюватися шлакуванням, що з'являється, коли температура у зоні горіння перевищує температуру плавлення золи. На практиці при спалюванні високозольного твердого палива застосовують засоби видалення золи і руйнування шлакового шару (поворотні колосники, шуровочні пристрої тощо). Крім того, прагнуть, щоб реакція горіння відбувалася при температурі, що запобігає утворенню шлаку.

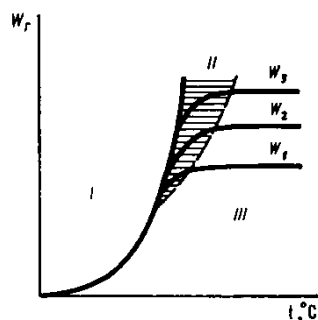


Рисунок 3.1. Графік залежності швидкості горіння від температури: I, II, III – відповідно кінетична, проміжна та дифузійна області

3.5. Горіння рідкого палива

Рідке паливо у теплоенергетичних установках, як правило, спалюється у розпиленому стані, у вигляді крапель у потоці повітря. При наявності окислювача горіння рідкого палива можливе у паровому стані і тому процесам спалахування і горіння краплі передують її випаровування. Процес горіння включає такі стадії: нагрівання та випаровування палива; перемішування парів палива з окислювачем (утворення горючої суміші); спалахування горючої суміші; власно горіння суміші.

У стаціонарному процесі швидкість горіння рідкого палива залежить від швидкості його випаровування. Процес випаровування за своєю природою є фізичним, горіння суміші – це хімічний процес. Тому швидкість і час горіння рідкого палива будуть визначатися інтенсивністю перебігу фізичного та

хімічного процесів. Якщо швидкість згоряння палива значно перевищує швидкість випаровування палива, можна прийняти, що швидкість горіння дорівнює швидкості випаровування ($\tau_r = \tau_{\text{вип}} = \tau_{\phi}$). У протилежному разі, превалюючою є швидкість хімічної взаємодії і $\tau_r = \tau_{\chi}$.

Для забезпечення потрібної інтенсивності випаровування рідких палив їх розпилюють у потоці повітря і у результаті утворюється полідисперсний потік дрібних краплин розмірами від 0 до 0,15...0,2 мм. Цим досягається велика питома поверхня випаровування, а потім і горіння. Теплота, необхідна для випаровування палива, передається поверхні краплі із зони горіння, в основному, випромінюванням і у результаті часткової дифузії всередину парової оболонки продуктів згоряння. Структура факела рідкого палива наведена на рис. 3.2.

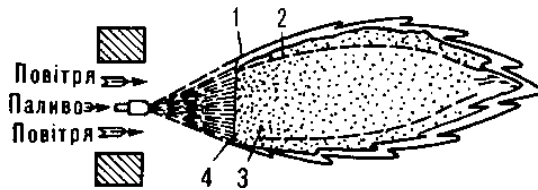


Рисунок 3.2. Структура факела рідкого палива: 1 – фронт займання; 2 – зона пароповітряної суміші та продуктів горіння; 3 – зона пароповітряної суміші та краплин палива; 4 – фронт горіння

3.6. Горіння газоподібного палива

Визначальною особливістю горіння газоподібного палива є те, що обидва компоненти, які реагують (паливо та окислювач), перебувають в одній газоподібній фазі. Організація горіння цього палива можлива як при попередньому перемішуванні окислювача і палива, так і при роздільній їх подачі до топки. Газоповітряна суміш, що надходить, взаємодіє із оточуючим середовищем, у результаті чого відбувається її нагрівання у турбулентному пограничному шарі. У периферичній зоні струмини газоповітряна суміш спалахує, утворюючи зону горіння. Ця зона розширюється в міру віддалення від устя сопла пальника. В ядрі струмини газу рухаються із постійною швидкістю і при постійній температурі. У цій зоні суміш не горить. Видимим фронтом горіння є ділянка факела, що включає зону займання l_3 , і товщину турбулентного фронту горіння δ_r (рис. 3.3). Під впливом турбулентних пульсацій фронт полум'я не залишається постійним й іноді розривається на окремі вогнища.

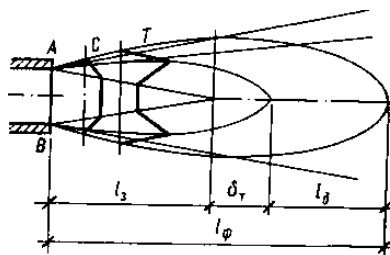


Рисунок 3.3. Структура факела газоподібного палива: С – крива зміни концентрації горючої суміші; Т – крива зміни температури; l_3 – довжина зони займання; l_{ϕ} – довжина факела; АВ – переріз сопла; δ_r – товщина фронту турбулентного горіння; l_d – зона догорання

При роздільному надходженні у топковий об'єм газоподібного палива і окислювача має місце дифузійний режим горіння, в якому визначальним є процес сумішоутворення. При турбулентному поширенні газу в зону горіння із оточуючого середовища дифундує повітря, а з ядра струмини – газоподібне паливо. У результаті цього дифузійні потоки палива та повітря вступають у хімічну реакцію. У даному випадку швидкість горіння визначається інтенсивністю дифузії, а положення зони горіння – умовами турбулентної дифузії.

При кінетичному горінні фронт полум'я являє собою поверхню розділу між горючою сумішшю та продуктами згоряння. При дифузійному горінні газу дифузійний фронт являє собою поверхню розділу між продуктами згоряння і сумішшю газу із продуктами згоряння, що дифундують на зустріч потокові. Змішане горіння характеризується особливостями вказаних двох способів горіння. Схеми фронтів горіння наведені на рис. 3.4.

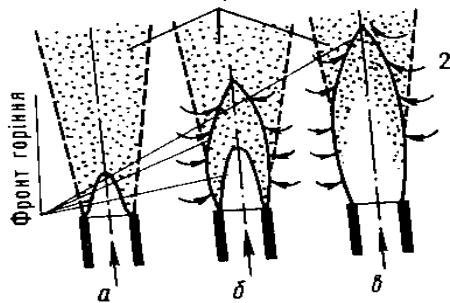


Рисунок 3.4. Схема фронтів горіння: а – кінетичного; б – змішаного; в – дифузійного; 1 – продукти згоряння; 2 – окислювач

Значне поширення одержали комбіновані газомазутні пальники, призначені для спалювання природного газу і мазуту. На практиці використовують пальники типу ГМГ, модернізований варіант ГМГм, НГМГи, ГМГБ.

Питання для самоконтролю

1. Яким чином спалюється тверде паливо?
2. Наведіть особливості горіння газоподібного палива.
3. Наведіть особливості горіння рідкого палива.
4. Яким чином відбувається дифузійний режим горіння?

ЛЕКЦІЯ 4. КОТЕЛЬНІ УСТАНОВКИ. ТЕПЛОВИЙ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНСИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ

План

- 4.1. Парові та водогрійні котли.
- 4.2. Принципова схема котельної установки.
- 4.3. Тепловий та енергетичний баланси котельного агрегату.

4.1. Парові та водогрійні котли

Котел – це пристрій, призначений для одержання пари із тиском вище атмосферного або гарячої води за рахунок тепла, що виділяється при спалюванні палива. Основними елементами котла є топка й теплообмінні поверхні. Спеціальний пристрій котла, в якому відбувається спалювання

палива, називається топкою або топковою камерою. Деякі типи котлів, наприклад котли-утилізатори, не мають топки. У такому випадку отримання пари або підігрів води здійснюються за рахунок теплоти гарячих газів, що утворюються при якому-небудь технологічному процесі. Газовий тракт котла, тобто та частина котла, якою протікають продукти згорання, розділений на окремі газоходи. Взаємне розташування газоходів, що визначає напрямок руху продуктів згорання й розташування поверхонь нагріву, називається компоновкою. Найпоширенішими у даний час є П-подібна, Т-подібна та баштова компоновки. Можна виділити й конвективні газоходи, якими протікають уже відносно холодні гази. У котел подається вода, яка називається живильною. Живильна вода у котлі нагрівається, а потім перетворюється на насичену або перегріту пару необхідних параметрів. Під параметрами пари маються на увазі її тиск і температура. Основним споживачем водяної пари, що виробляється у котельних установках, є паросилові установки, а також вона може використовуватися для технологічних потреб.

Перетворення живильної води у пару відбувається в поверхнях нагріву котла. До поверхонь нагріву котла відносяться випарні, пароперегрівні та економайзерні поверхні. Випарні поверхні нагріву розташовуються у топці котла або безпосередньо за нею. У них вода нагрівається до температури насичення й утворюється пароводяна суміш. Пароперегрівники призначені для отримання перегрітої пари. Вони розташовуються за топковою камерою.

Економайзерні поверхні нагріву призначені для попереднього підігріву живильної води теплотою продуктів згорання, що відходять з котла. Теплообмінні поверхні котла конструктивно можуть розділятися на окремі секції або «пакети».

До основних елементів котла відносяться також барабани, повітропідігрівники, пальникові пристрої, пристрої для регулювання температури перегріву пари. Барабани котлів призначені для відділення насиченої пари від води, видалення з неї надмірної вологи, а також як пристрій, в якому акумулюється кількість води, необхідної для надійної роботи котла. Повітропідігрівники котла – це поверхні нагріву, в яких відбувається попередній підігрів повітря, що надходить в топку, й необхідного для спалювання палива. Пальникові пристрої – це пристрої для спалювання палива у топці котла. Пальникові пристрої сучасних котлів у першу чергу забезпечують найефективніше згорання палива як хімічного процесу й зниження кількості шкідливих речовин, що утворюються у процесі горіння та викидаються в атмосферу. До пристроїв регулювання температури перегріву пари відносяться теплообмінники різних типів та впорскувальні пароохолоджувачі.

Для забезпечення роботи сучасні котли оснащені допоміжним устаткуванням, до якого відносяться дуттьові вентилятори, димососи, золоуловлююче устаткування, устаткування з підготовки палива і т.п. Сукупність котла та допоміжного устаткування називається котельною установкою. Одним з важливих елементів котла є каркас, призначений для

розміщення та кріплення всіх його елементів. Він виготовлений з металоконструкцій і спирається на фундамент або елементи будівлі.

Для забезпечення безпеки роботи персоналу, а також для зниження втрат теплоти у навколишнє середовище на котлі передбачені обмурування та теплова ізоляція.

Котли класифікують за призначенням, паровидатністю, параметрами пари, типом топкового пристрою, способом організації взаємного руху продуктів згорання й робочого середовища, способом організації руху робочого середовища у поверхнях нагріву та видом спалюваного органічного палива.

За призначенням котли поділяються на парові, що виробляють водяну пару необхідних параметрів, водогрійні, котлиутилізатори і енерготехнологічні котли. Вони призначаються для енергетичних, виробничих, опалювально-виробничих і опалювальних котельних установок.

За паровидатністю котли поділяються на котли малої потужності, котли середньої потужності, енергетичні котли і котли великої паропродуктивності енергоблоків ТЕС.

За параметрами пари парові котли поділяються на такі, що працюють на низькому (0,88 МПа), середньому (1,36, 2,36 і 3,9 МПа), високому (9,8 й 13,8 МПа), критичному (16 МПа), надкритичному (24 МПа) тиску. Досягнення сучасної науки й техніки в області отримання нових конструкційних матеріалів та сталей дозволили створити нові типи парових котлів, що працюють на супернадкритичному тиску (до 30 й більше МПа).

Парові котли малої паровидатності (до 20 т/год) випускаються на низький та середній тиск пари. Вони отримали значне розповсюдження й широко використовуються для технологічних і господарських потреб, входять до складу стаціонарних й пересувних котельно-опалювальних установок.

Котли середньої паровидатності (до 100 т/год) – це, як правило, котли середнього тиску з помірною температурою перегрітої пари (425-450°C) – широко використовуються як джерело технологічної пари на промислових підприємствах. Енергетичні парові котли випускаються на середній й високий тиск пари і мають паровидатність від 100 до 640 т/год. Ці котли встановлюються на невеликих теплоелектроцентралях й промислових підприємствах і призначаються для вироблення електроенергії, отримання водяної пари або гарячої води для технологічних потреб та опалювання.

Котли енергоблоків ТЕС (КЕС і ТЕЦ) мають паровидатність до 3600 т/год і випускаються на середній, високий, надкритичний і супернадкритичний тиск пари. Вони призначені для забезпечення вироблення електроенергії й теплофікації населених пунктів. За типом топкового пристрою вирізняють котли, оснащені шаровою топкою, камерною топкою, циклонною топкою, вихровою топкою, топкою з киплячим шаром, спеціальними топками для спалювання специфічних видів палива. Котли, оснащені вихровими топками й топками з киплячим шаром, останнім часом мають багато модифікацій і набувають все більшого поширення. Їх перевага перед котлами з камерними топками полягає у тому, що вони можуть

спалювати тверде паливо погіршеної якості та багато промислових й побутових відходів. При цьому для них не потрібні системи пилоприготування. Вони мають меншу металоємність й більш високі екологічні показники.

За способом організації взаємного руху продуктів згорання й робочого середовища котли поділяються на газотрубні й водотрубні. Водотрубні котли у свою чергу випускаються декількох модифікацій: барабанні з природною циркуляцією, сепараційні (безбарабанні) з багаторазовою примусовою циркуляцією і прямоточні котли. У котлах з природною циркуляцією вода циркулює за рахунок різниць її густини; для забезпечення примусової циркуляції використовуються циркуляційні насоси, а рух середовища у прямоточних котлах здійснюється за рахунок напору, що розвивається живильним насосом.

4.2. Принципова схема котельної установки

Залежно від типу, призначення і розмірів котельної установки вона може містити у своєму складі ті чи інші елементи основного і допоміжного обладнання. Принципіальна технологічна схема котельної установки, що працює на твердому паливі (пилоподібному паливі) із природною циркуляцією наведена на рис. 4.3. Паливо із приймального бункера 1 подається у вуглерозмельний млин 2. Після розмолу пилоподібне паливо через механічний вентилятор 3 подається у пальник 4. До пальника підводиться також необхідне для горіння повітря, що за допомогою дуттьового вентилятора 12 проходить через повітропідігрівник 9, де він сприймає теплоту відхідних димових газів.

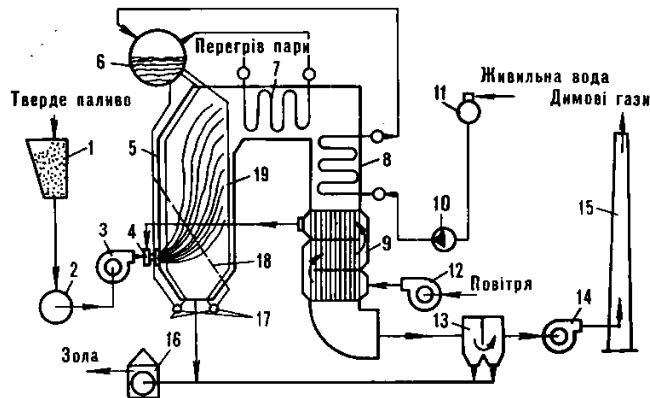


Рисунок 4.3. Принципова схема котельної установки, що працює на твердому паливі: 1 – паливний бункер; 2 – вуглемельний млин; 3 – млиновий вентилятор; 4 – пальник; 5 – топка; 6 – барабан; 7 – перегрівник; 8 – економайзер; 9 – повітряний підігрівник; 10 – живильний насос; 11 – деаератор; 12 – вентилятор; 13 – прилад газоочистки; 14 – димосос; 15 – димова труба; 16 – золовикидний пристрій; 17 – колектор; 18 – опускні труби; 19 – екрани

Живильна вода перед подачею у котел проходить систему водопідготовки, тобто вивільняється від розчинюваних у ній мінеральних солей шляхом іонообмінної сорбції (на схемі не відображено) і деаерується

(вивільняється від розчиненого у ній повітря). Після деаераційного пристрою 11 вода живильним насосом 10 подається у водяний економайзер 8, де вона попередньо підігрівається відхідними димовими газами, і надходить у барабан 6 котла. Котел оснащений системою опускних труб 18, по яких вода з барабанів 6 опускається у колектори 17, і системою випарних труб (які називають екранами) 19, по яких утворювана у результаті випаровування води пароводяна суміш повертається назад у барабан 6. Утворювана у барабані насичена пара відділяється від крапель води і спрямовується у паропідігрівник 7, де температура пари підвищується. При цьому її тиск залишається постійним.

При згорянні у пальниках палива утворюються димові гази, які, переміщуючись у котлі 5, випромінюють теплоту на екрани 19, розміщені вздовж стін топки. На виході з топки димові гази далі проходять через перегрівник 7, економайзер 8 і повітропідігрівник 9, де додатково віддають свою теплоту і відповідно охолоджуються. Димові гази, що виходять із котельної установки, проходять газоочисний пристрій 13, що служить для вловлювання частинок золи, які виносяться газами з топки, і за допомогою димососу 14 спрямовуються у димову трубу 15. Утворювані при згорянні твердого палива зола і шлак видаляються потоком води за допомогою золовидаального пристрою 16.

До складу котельного агрегату, крім розглянутих вище елементів основного та допоміжного обладнання, входять також обмурівка котла, каркас, бункери, живильники, запірна арматура, контрольно-вимірювальні прилади і система автоматичного регулювання.

4.3. Тепловий та енергетичний баланси котельного агрегату.

Тепловий (енергетичний) баланс діючого котла складають за результатами балансових випробувань з метою аналізу ефективності роботи котла і визначення його ККД. При тепловому розрахунку проектного котла тепловий баланс складають на основі нормативних даних з метою визначення витрати палива і ККД проектного агрегату. У котельній техніці тепловий баланс приводять стосовно до 1 кг твердого і рідкого палива або 1 м³ газоподібного палива (при $t = 273 \text{ K}$ і $p = 0,1013 \text{ МПа}$).

Тепловий баланс виражає рівність між прибутковою тепловою енергією, що називається наявною теплотою, і витратною.

Наявна теплота Q_p^p включає нижчу теплоту згоряння палива у розрахунку на робочу масу палива Q_n^p , фізичну теплоту, повітря, що надходить у повітропідігрівник $Q_{\text{п}}$, і фізичну теплоту пари яка подається на розпил рідкого палива (якщо котел працює на рідкому паливі, розпилюв. здійснюється паром) $Q_{\text{пар}}$:

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{т}} + Q_{\text{п}} + Q_{\text{пар}} \quad (4.1)$$

В умовах с.-г. виробництва $Q_n^p \gg Q_{\text{т}}, Q_{\text{п}}, Q_{\text{пар}}$. Тому без особливої похибки можна прийняти $Q_p^p = Q_n^p$. У цьому випадку рівняння теплового балансу має такий вигляд:

$$Q_H^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (4.3)$$

де Q_1 – корисно використана теплота; Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 і Q_6 – втрати теплоти відповідно із відхідними газами, від хімічної неповноти згоряння палива, від механічної неповноти згоряння палива, у навколишнє середовище та із шлаками, що видаляються з топки.

Поділивши обидві частини рівняння на Q_H^p і помноживши його на 100, одержимо вираз теплового балансу у процентах до наявної теплоти:

$$100 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (4.4)$$

де $q_1 = \frac{Q_1}{Q_H^p} 100$; $q_2 = \frac{Q_2}{Q_H^p} 100$; $q_3 = \frac{Q_3}{Q_H^p} 100$; $q_4 = \frac{Q_4}{Q_H^p} 100$; $q_5 = \frac{Q_5}{Q_H^p} 100$; $q_6 = \frac{Q_6}{Q_H^p} 100$.

Теплоту, кДж/кг, що корисно використана у паровому котлоагрегаті, визначають за формулою:

$$Q_1 = \frac{D}{B} \left((h_{п.п} - h_{п.в}) + \frac{P}{100} (h_{к.в} - h_{п.в}) \right) \quad (4.5)$$

де D – витрата пари, кг/с; B – витрата палива, кг/с; $h_{п.п}$, $h_{п.в}$, $h_{к.в}$ – відповідно ентальпія пари, живильної та котлової води, кДж/кг; P – величина безперервної продувки, %.

Теплота, кДж/кг, що корисно використана у водогрійних котлах:

$$Q_1 = \frac{M_B}{B} (h_2 - h_1) \quad (4.6)$$

де h_1 і h_2 – відповідно ентальпія води, що надходить у котел і виходить з нього, кДж/кг; M_B – витрата води, кг/с.

Втрати теплоти із відхідними газами:

$$Q_2 = \frac{(N_{yx} - \alpha_{yx} N_{x.п}^0)(100 - q_4)}{100} \quad (4.7)$$

де N_{yx} і $N_{x.п}^0$ – відповідно ентальпії продуктів згоряння і холодного повітря, кДж/кг; α_{yx} – коефіцієнт надлишку повітря за котлоагрегатом; $100 - q_4$ – поправка на механічний недопал палива.

Втрати із відхідними газами становлять 6-15%, залежать від температури відхідних газів та їх обсягу. На об'єм відхідних газів суттєво впливає режим роботи топки (у першу чергу, коефіцієнт надлишку повітря у топці) і наявність підсосів повітря через нещільності в обмурівці котла, що призводить до збільшення значення α_{yx} . При проектуванні котлів температуру відхідних газів приймають рівною 400-450К.

Втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння палива Q_2 спричинені тим, що у процесі горіння не всі елементи окислюються до кінцевих продуктів. Ці втрати становлять до 3%. Вони визначаються за вмістом у димових газах продуктів неповного згоряння палива (в основному оксиду вуглецю, а також H_2 , CH_4 , C_mH_n).

Втрати від механічного недопалу визначаються за вмістом у золі та шлаці горючих речовин. Залежно від способу спалювання і властивостей палива значення q_4 коливається у межах 1-12%. При шаровому методі спалювання палива втрата q_4 більша, ніж при факельному.

Втрата теплоти в оточуюче середовище (0,5-3%) залежить від температури і площі зовнішніх поверхонь котельного агрегату. У котельній техніці цю втрату визначають залежно від продуктивності котлоагрегату.

Втрати з фізичним теплом шлаків залежать від кількості шлаків, що видаляють із котла, їх теплоємності та температури. Звичайно значення q_6 невелике і тільки при рідкому шлаковидаленні може досягти 1-5%. В агропромисловому комплексі котли із рідким шлаковидаленням не застосовують і тому у цьому випадку можна прийняти $q_6 = 0$. Відношення корисно використаної у котлі теплоти до наявної теплоти визначають ККД котла брутто:

$$\eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}} = (D(h_{\text{п.п}} - h_{\text{п.в}}) + 0,01P(h_{\text{к.в}} - h_{\text{п.в}})) = \frac{Q_1}{Q_p^p} \quad (4.8)$$

або

$$\eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}} = 100 - \sum q_i \quad (4.9)$$

Залежно від потужності котлів та розвинутості конвективних поверхонь нагріву вона становить 70-92%.

Враховуючи втрати енергії на власні потреби котельні (привод насосів та вентиляторів, допоміжного обладнання), що складають 3-4%, одержимо ККД котла нетто:

$$\eta_{\text{к.а}}^{\text{нт}} = \eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}} - q_{\text{с.н}} \quad (4.10)$$

Витрата натурального палива B , кг/год або $\text{м}^3/\text{год}$:

- у паровому котлі:

$$B = \frac{D(h_{\text{п.п}} - h_{\text{п.в}}) + 0,01P(h_{\text{к.в}} - h_{\text{п.в}})}{0,01\eta_{\text{к.а}}Q_p^p} \quad (4.11)$$

- у водогрійному котлі

$$B = \frac{c_B M_B (h_2 - h_1)}{0,01\eta_{\text{к.а}}Q_p^p} \quad (4.12)$$

Витрата умовного палива, кг/год:

$$B_{\text{умов}} = \frac{BQ_p}{29300} \quad (4.13)$$

Ексергетичний баланс котла. Тепловий баланс котла дає кількісну картину розподілу наявної теплоти, в тому числі й розподіл теплових втрат, без урахування якості теплоти у складових балансу. Для оцінки ефективності роботи котла з позиції якості одержуваного теплоносія – пари чи гарячої води – складають ексергетичний баланс, який включає: енергію палива та повітря, енергію одержуваного теплоносія, енергії складових втрат теплоти. Крім цих втрат, у ексергетичний баланс котла входять втрати енергії через необоротність процесу горіння, необоротність теплообміну і змішування потоків. Ексергетичний ККД котла визначається виразом:

$$\eta_e = \frac{E_1}{E_H} = 1 - \frac{\sum \Delta E_i}{E_H} \quad (4.14)$$

де E_1 , E_H – ексергія відповідно корисно використана і наявна, Дж/кг палива (або Дж/м³ палива); $\sum \Delta E_i$ – сумарні втрати ексергії через необоротність процесів у котлі: горіння, теплообміну, змішування потоків, підсмоктування повітря через нещільності тощо.

Наявна ексергія у котлі E_H складається з ексергії палива $E_{\text{пал}}$ і повітря $E_{\text{п}}$, що подаються у топку:

$$E_H = E_{\text{п}} + E_{\text{пал}} \quad (4.15)$$

Втрати ексергії при горінні:

$$\Delta E_{\text{г}} = E_H - E_a \quad (4.16)$$

де E_a – ексергія продуктів згоряння при адіабатній температурі.

Втрати ексергії при теплообміні:

$$\Delta E_{\text{т}} = \Delta E_1 - \Delta E_2 \quad (4.17)$$

де ΔE_1 – зменшення ексергії гріючого тіла (продуктів згоряння при передачі теплоти у котельній установці); ΔE_2 – збільшення ексергії нагріваного тіла (води та пари).

Втрати ексергії $E_{\text{зм}}$ від змішування потоків при різних їх температурах T_a і T_b мають місце у результаті підсмоктування повітря по тракту котла:

$$E_{\text{зм}} = E_a + E_b - E_{\text{зм}} \quad (4.18)$$

де E_a і E_b – ексергії змішуваних потоків із температурами T_a і T_b , Дж/(кг палива); $E_{\text{зм}}$ – ексергія потоку після змішування Дж/(кг палива).

Ексергетичний ККД котла дорівнює 45-47%. При цьому основними втратами є втрати від нерівномірності процесу горіння (25-35%) та теплообміну (20-25%), тоді як втрати ексергії із відхідними газами становлять лише $\approx 1\%$. Збільшенню ексергетичного ККД сприяє оптимізація параметрів пари та підігріву повітря.

Питання для самоконтролю

1. Як розраховується ККД котла?
2. Від чого залежить ККД Котла?
3. Для чого призначений пальник?
4. Що таке котельні установки?
5. Які типи котлів розрізняють?

ЛЕКЦІЯ 5. ДОПОМІЖНЕ ОБЛАДНАННЯ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

План

- 5.1. Допоміжні поверхні нагріву котельних агрегатів.
- 5.2. Економайзери.
- 5.3. Повітропідігрівники.
- 5.4. Пароперегрівники.

5.1. Допоміжні поверхні нагріву котельних агрегатів

До допоміжних поверхонь нагріву відносять водяні економайзери, повітропідігрівники та пароперегрівники. Економайзер для нагріву живильної води та повітропідігрівник для нагріву дуттьового повітря розташовані у кінці конвективного газоходу і обмиваються газоподібними продуктами згорання, що виходять із котельного агрегату, із відносно низькою температурою. Тому їх називають також низькотемпературними або хвостовими поверхнями нагріву. При встановленні економайзерів та повітропідігрівників знижується

температура продуктів згорання на виході із котла, через що зменшуються втрати із підхідними газами і підвищується ККД котлоагрегату.

5.2. Економайзери

Залежно від конструктивного виконання економайзери поділяють на чавунні, сталеві гладкотрубні та сталеві ребристих труб.

Чавунні економайзери застосовують у котлах із робочим тиском до 2,3 МПа (рис. 5.1). Вони складаються із чавунних ребристих труб, що з'єднуються за допомогою калачів. Внаслідок ребристої поверхні економайзери чутливі до забруднення золою. Ребристі труби очищають обдуванням парою або повітрям.

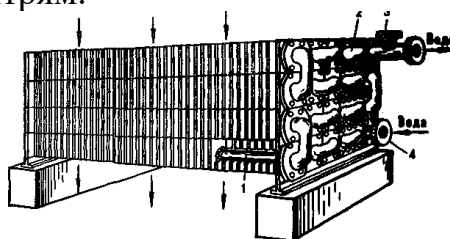


Рисунок 5.1. Чавунний економайзер: 1 – ребриста батарея; 2 – калач (перепускний патрубок); 3 – вихідні патрубки; 4 – вхідний патрубок

Сталеві гладкотрубні економайзери виготовляють із суцільнотягнутих або зварних труб із зовнішнім діаметром 32, 38 і 51 мм, зігнутих у вигляді змійовиків (рис. 5.2). Вхідні та вихідні кінці змійовиків об'єднуються, відповідно, вхідними та вихідними колекторами, розміщеними на стінках конвективного газоходу. У газоході змійовики розміщують у шаховому порядку.

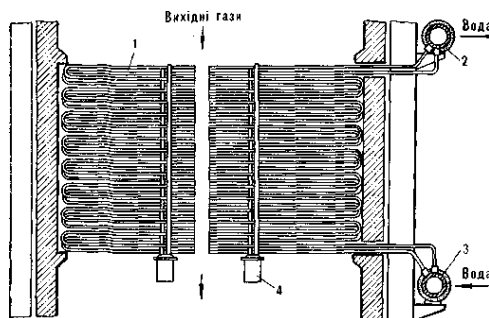


Рисунок 5.2. Сталевий економайзер: 1 – змійовик із труб; 2 – вихідний колектор; 3 – вхідний колектор; 4 – опора змійовиків

За рівнем нагріву води економайзери поділяють на киплячі та некиплячі. В економайзерах некиплячого типу живильна вода підігрівається до температури на 40-50°C нижчої за температуру кипіння при даному тиску в котлі. В економайзерах киплячого типу поряд із підігрівом води утворюється пара (звичайно не більше 20-25% всієї води).

Економайзери обладнані контрольно-вимірювальними приладами, арматурою і запобіжними пристроями. У найвищій точці економайзера встановлений пристрій для видалення повітря (вантуз) у період заповнення

економізатора водою. Крім того, наявна дренажна труба для видалення води економізатора після зупинки котла.

5.3. Повітропідігрівники

Застосування для дуття гарячого повітря підвищує температуру у топці, полегшує підсушку і займання палив, прискорює процес їх згоряння. Крім того, зменшуються втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння. Тому застосування повітропідігрівників дає значний тепловий та економічний ефект.

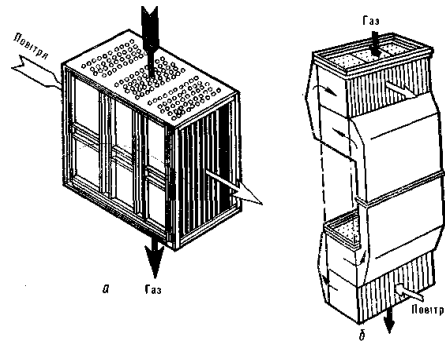


Рисунок 5.3. Трубчастий стальний повітропідігрівник: а – з одним ходом для повітря; б – з трьома ходами для повітря

За принципом роботи повітропідігрівники поділяють на рекуперативні і регенеративні. Регенеративні повітропідігрівники застосовують лише у котлах із великою продуктивністю. У котлах малої та середньої продуктивності встановлюють рекуперативні трубчасті повітропідігрівники (рис. 5.3). Для їх виготовлення використовують сталі труби діаметром 51×1,5; 40×1,5; 25×1,5 мм. Труби вставляють в отвори трубних дошок, а їх кінці приварюють. Пучки труб повітропідігрівників розміщені у шаховому порядку. Міжтрубний простір ділиться на кілька ходів. Збільшення ходів підвищує рух повітря і збільшує коефіцієнт тепловіддачі від труб до повітря. Залежно від кількості повітря, що нагрівається, величини поверхні нагріву і потрібної температури повітропідігрівники мають різну компоновку: одно- та багатоходову.

5.4. Пароперегрівники

Пароперегрівники являють собою систему включених по парі змійовиків, що обмиваються із зовнішнього боку продуктами згоряння палива, і призначену для перегріву насиченої пари до заданої температури. Для виготовлення пароперегрівників використовують високолеговану сталь, оскільки теплові напруження у перегрівнику дуже великі. Діаметр труб змійовиків – 30-40 мм.

Розміщення змійовиків пароперегрівників може бути вертикальним (у вертикально-водотрубних котлах) і горизонтальним (у горизонтально-водотрубних котлах). За умовами зовнішнього тепло сприйняття розрізняють конвективні, радіаційні та конвективно-радіаційні пароперегрівники. Останні пароперегрівники розміщують у зоні високої температури продуктів згоряння,

тому тепловий потік до них передається здебільшого за рахунок випромінювання.

За взаємним напрямком потоків газу і пари пароперегрівники поділяють на паралельнотоківі, протитоківі та із змішаним током (рис. 5.4). Найбільше застосування знайшли змішані схеми включення пароперегрівника.

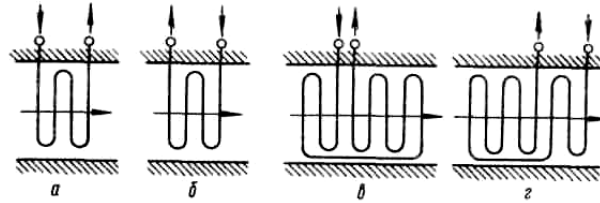


Рисунок 5.4. Схема взаємного руху пари і газу в пароперегрівниках: а – паралельна течія; б – протитечія; в, г – змішана течія

У котельних агрегатах застосовують конвективні та комбіновані пароперегрівники. Конвективний пароперегрівник розміщують у газоході котельного агрегату за топкою. Пароперегрівник відділяється від топки невеликим фестоном, що складається із двох-трьох рядів кип'ятильних труб. Ці підігрівники знайшли застосування у котлах низького та середнього тиску. При тиску пари 1,4 і 2,3 МПа конвективні пароперегрівники виконують одноходовими; при тиску 4,0 МПа – двоходовими.

Конвективний пароперегрівник для котлів ДКВР та Е зображений на рис. 5.5. Конвективний пароперегрівник котельних агрегатів екранного типу виконують із двох послідовно розміщених груп змійовиків (рис. 5.5). У котлах типу КВ-300М перегрів пари до температури 130°C відбувається у вертикальному перегрівнику, розміщеному за котлом.

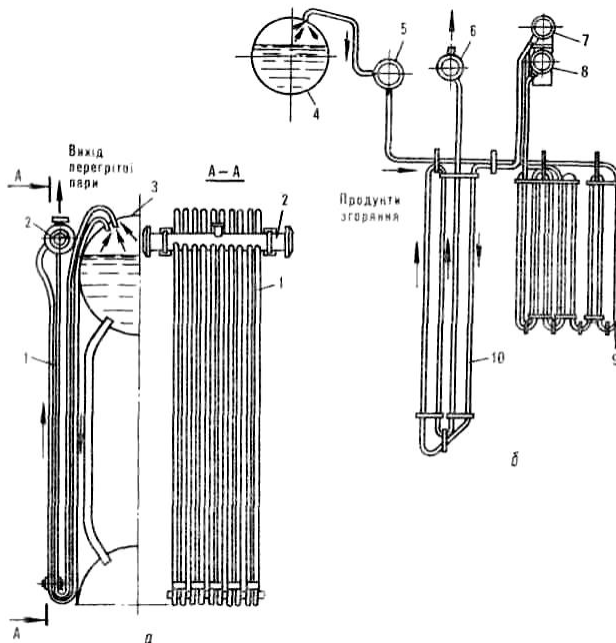


Рисунок 5.5. Конвективні пароперегрівники: а – типу ДКВР; б – екранного типу; 1 – труби пароперегрівника; 2 – камери перегрітої пари; 3, 4 – барабани котла; 5 – камера насиченої пари; 7 – проміжна камера; 8 – вихідна камера; 9 – змійовик; 10 – перша ступінь перегрівника

У парових котлах низького тиску перегрів пари регулюють газовою заслінкою, за допомогою якої змінюють кількість парів, що протікають через пароперегрівник. У котлах середнього тиску для цієї мети застосовують спеціальні пристрої (так звані парохолодники).

Питання для самоконтролю

1. Для чого призначені пароперегрівники?
2. Для чого призначені повітропідігрівники?
3. Для чого призначені економайзери?
4. Які типи економайзерів існують?

ЛЕКЦІЯ 6. ВОДНЕ ГОСПОДАРСТВО ТА ВОДНИЙ РЕЖИМ КОТЛІВ

План

- 6.1. Характеристики котлової води.
- 6.2. Підготовка води до живлення котла.
- 6.3. Технологічний процес водопідготовки.

6.1. Характеристики котлової води

Робочим тілом у котлах є вода. Якість води має велике значення для нормальної роботи котлоагрегатів. Тому вода, що безпосередньо використовується для виробництва пари або гарячої води, заздалегідь обробляється. Вона проходить систему попереднього обігріву, очистки від механічних та розчинених хімічних та газоподібних домішок.

У циклі котлоагрегату на різних стадіях процесу розрізняють: вихідну воду, що готують в установках хімічної очистки води і додають до конденсату, що повертається в котел; живильну воду, що подають насосом в котел, вона дорівнює сумі конденсату, що повертається, і підживлювальної води; котлову воду, що циркулює в котлі. Якість живильної, додаткової та котлової води характеризується такими показниками.

Завислі речовини, що виражаються у міліграмах на кг (мг/кг) – це механічні домішки, що видаляють із води шляхом фільтрування. Сухий залишок, мг/кг, вказує на кількість розчинених у воді речовин, його отримують випарюванням відфільтрованої води при температурі 105-110°C.

Окислюваність характеризує вміст у воді органічних речовин. Останні, потрапляючи у котлову воду, спінюють її та погіршують якість одержуваної пари.

Жорсткість води визначається вмістом накипоутворюючих речовин (солей магнію).

Лужність визначається концентрацією у воді гідроксильних ОН, бікарбонатних HCO_3 , карбонатних CO_3 , силікатних SiO_3 -іонів, а також деяких слабких органічних кислот, які називають гуматами.

Таблиця 6.1. Норми якості живильної води для водотрубних парових котлів

Показник	Норма для котлів, що працюють при тиску, МПа	
	до 1,4	до 2,4
Загальна жорсткість, мкг·екв/кг	10/21	15/10
Вміст у воді компонентів:		
- завислих речовин	5	5
- розчиненого кисню, мкг/кг	50/30	50/20
Значення рН при $t = 25^\circ\text{C}$	8,5...9,5	8,5...9,5

Кремнієвміст, мг/кг, характеризується концентрацією у воді сполук кремнію. Крім того, у воді містяться розчинені гази. Вони визначають корозійні властивості води. За крупністю мінеральні та органічні домішки, що знаходяться у природній воді, розділяють на грубодисперсні речовини із розміром частинок більше $0,1 \cdot 10^{-2}$ мм і на колоїдні домішки із частинками від $0,1 \cdot 10^{-2}$ до $0,1 \cdot 10^{-4}$ мм. До живильної води парогенераторів і до підживлювальної води водогрійних котлів ставлять певні вимоги (табл. 6.1).

Для зменшення концентрації речовин, що забруднюють котлову воду, проводять продувку. Для зниження вологості пари у барабані котла передбачені спеціальні сепарувальні пристрої.

6.2. Підготовка води до живлення котла

Завислі та колоїдні речовини, що містяться у природній воді, можуть бути видалені шляхом відстоювання, коагуляції та фільтрування. Для відстоювання води використовують відстійники, об'єм яких дорівнює полуторній або подвійній годинній продуктивності котла. Після відстоювання воду піддають фільтруванню, для чого її пропускають через напірні фільтри, заповнені дрібнодисперсним матеріалом (кварцовий пісок, мармур, доломіт) із розмірами частинок 0,6-1 мм.

Ефективнішим є процес коагуляції, завдяки якому за рахунок спеціальних реагентів-коагулянтів відбувається укрупнення колоїдних частинок і зависей та виділення їх у осад. Як коагулянти використовують солі алюмінію та залізосульфат алюмінію $Al_2(SO_4)_3$, сульфат заліза $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ і хлорне залізо $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Для видалення гумінових речовин рекомендується підтримувати $pH = 3,5-4,5$. У разі коагуляції води солями заліза pH має бути більше 8,5. У процесі коагуляції температура води повинна бути рівною плюс 35-40°C.

Залежно від жорсткості води і продуктивності котла застосовують різні способи водопідготовки. У дрібних котельних установках застосовують внутрішньокотельну обробку води; при значній жорсткості у котельнях середньої та великої потужності – докотлову водопідготовку. Найпоширенішими є методи Na-катіонування та H-катіонування. Ці методи відрізняються високим ступенем зм'якшення, компактністю апаратури і простотою обслуговування.

Водопідготовка у Na-катіонітових установках полягає у фільтруванні через шар природного натрієвого матеріалу (катіоніту). При цьому кальцієві або магнієві солі, що містяться у воді, вступають в обмінні реакції із названим мінералом, у результаті чого замість накипоутворюючих катіонів утворюються еквівалентні кількості легко розчинних натрієвих солей.

У процесі експлуатації катіонітова маса забруднюється і ущільнюється. Для очистки та попереднього спущування катіонітової маси її промивають зворотним потоком води. Регенерацію катіоніту здійснюють розчином NaCl. Тривалість регенерації для нового фільтру 12-15хв; а для експлуатованого – 1,5-2 год.

В установках Н-катіонування як катіоніт використовують сульфовугілля. Цей метод катіонування поєднують із Na-катіонуванням. Поєднання Н-катіонування із Na-катіонуванням може відбуватися як за паралельною, так і за послідовною схемами. Найчастіше застосовують послідовну схему (рис. 6.1).

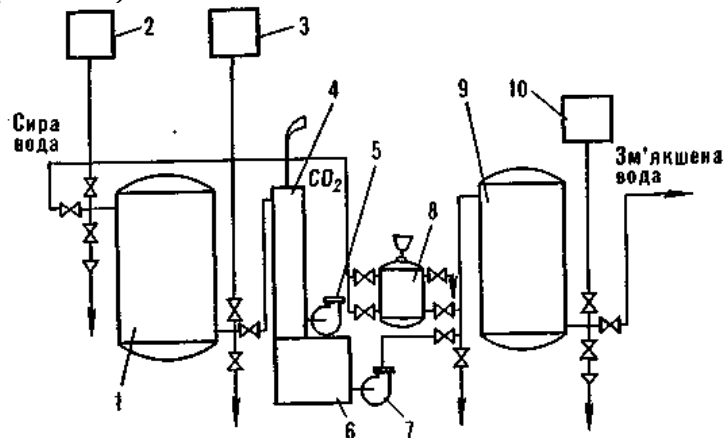


Рисунок 6.1. Схема послідовного Н- і Na-катіонування: 1 – Н-катіонітовий фільтр; 2 – бак для розчину кислоти; 3 – бак для розпушування Н-катіоніта; 4 – видавач вуглекислоти; 5 – вентилятор; 6 – бак для пом'якшення води; 7 – насос; 8 – солерозчинник; 9 – Na-катіонітовий фільтр; 10 – бак руйнування Na-катіоніта

Останнім часом, крім традиційних способів, використовують магнітний метод очистки води. Цей метод полягає в тому, що після впливу на воду магнітного поля певної напруженості і полярності та при наступному її нагріванні у котлі не утворюються накипні відкладання на поверхнях нагріву.

У воді, що надходить після фільтрів або інших видів очистки, можуть міститися гази: кисень, двоокис вуглецю, аміак, азот тощо. Ці гази спричиняють посилення корозії поверхні нагріву котла, а також сприяють порушенню циркуляції води. Все це знижує строк служби і надійність роботи котла.

Для видалення газів із живильної води застосовують деаерацію останньої. Цей процес ґрунтується на фізичному законі, згідно із яким розчинність газів із підвищенням температури знижується і для будь-якого тиску при температурі кипіння дорівнює нулю. Такий процес деаерації називають термічним. Залежно від величини тиску, при якому відбувається деаерація, деаератори поділяють на вакуумні (працюють при вакуумі 0,06-0,093МПа і температурі 40-75°C), атмосферні (температурою 95-100°C) і підвищеного тиску (температурою понад 100°C). Для досягнення найкращої деаерації необхідно, щоб різниця між температурою кипіння і кінцевою температурою, так званим недогрівом води, у деаераторі була мінімальною, тобто становила 0,1-0,2°C.

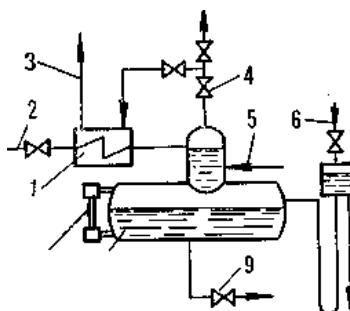


Рисунок 6.2. Схема деаераторної установки: 1 – охолодник випару; 2 – подача хімічно-очищеної води; 3 – викид пари в атмосферу; 4 – трубопровід випару; 5 – подача пари в колонку деаератора; 6 – випуск води в гідрозатвор; 7 – гідрозатвор; 8 – випуск зайвої води із гідрозатвора; 9 – випуск живильної води; 10 – бак; 11 – водопоказчик

Принципова схема деаераторної установки наведена на рис. 6.2. Деаератор складається із деаераторної колонки і деаераторного бака 10. Живильна вода надходить по трубі 2 на розподільні тарілки, із яких струмками стікає донизу. Знизу вверх по трубі надходить пара для підігріву води. При нагріві води виділяються гази, що відходять через вестову трубу. Вивільнена від газів вода стікає у бак 10, звідки живильним насосом подається в котел. Для уникнення підвищення тиску у 8 деаераторі на ньому встановлюють запобіжний клапан. На випадок утворення у деаераторі розрідження передбачають гідравлічний затвор. Його встановлюють висотою 3,5-4м. Для зменшення концентрації речовин, що забруднюють воду, проводять продувку, тобто видаляють із котла частину води і замінюють її живильною водою.

Розрізняють безперервну та періодичну продувки. Безперервну продувку проводять із місць з найвищим солевмістом, тобто до змішування котлової води із підживлювальною. Об'єм безперервної продувки становить 0,5-3% паропродуктивності котла. Періодична продувка ефективна тільки в котлах із грязьовиками, в яких відбувається відокремлення шламу. Грязьовики включені у систему циркуляції води.

6.3. Технологічний процес водопідготовки

Для підтримки високої чистоти живильної води і витрати води для підживлення, оптимальна система очищення води в котлі в основному складається з напірного фільтра, установки пом'якшення, зворотного осмосу і термдеаератора.

Використання звичайної жорсткої водопровідної води в якості підживлювальної води для парового котла призведе до осадження солей жорсткості в зоні нагріву котла. Таким чином, збільшуються втрати енергії і кількість кислоти для очищення котла всередині.

Завдяки пом'якшенню води запобігається утворення накипу, вміст бікарбонату в сирій воді безперешкодно проходить через установку пом'якшення. В котлі бікарбонат розщеплюється на вуглекислий газ (CO_2) і гідроксид натрію (NaOH), утворюючи корозійний конденсат і збільшуючи потребу в продувці. Цієї проблеми можна уникнути, видаливши вміст солей в

підживлювальній воді в установці зворотного осмосу або в двоколонній іонообмінній установці для отримання демінералізованої води, а потім дегазуючи за допомогою термічного деаератора.

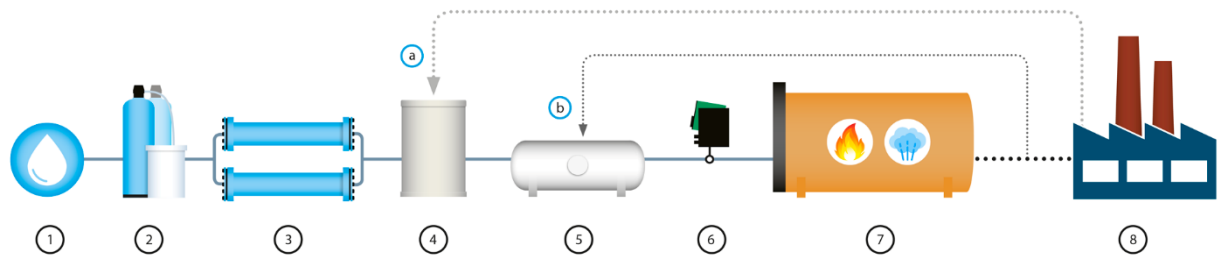


Рисунок 6.3 – Технологічний процес водопідготовки

Технологічний процес водопідготовки складається з наступних операцій (рис. 6.3):

1. Вихідна вода:
 - Фільтрація вихідної води під тиском.
 - Видалення заліза (Fe^{++}) та марганцю (Mn^{++}).
2. Пом'якшення:
 - Пом'якшення іонним обміном.
 - Видалення кальцію (Ca^{++}) та Магнію (Mg^{++}).
3. Демінералізація:
 - Демінералізована вода методом зворотного осмосу.
 - Видалення 98% солей, калію (K^+), натрію (Na^+), хлориду (Cl^-), нітратів (NO_3^-), сульфату (SO_4^{--}), кремнієвої кислоти (SiO_4^-), лужності (HCO_3^-).
4. Резервуар для води – зберігання демінералізованої води.
5. Дегазація:
 - Видалення газів термічним деаератором.
 - Видалення вуглекислого газу (CO_2) та кисню (O_2).
6. Дозуючий насос – для дозування хімікатів для підтримки роботи котла.
7. Паровий котел – для нагрівання води для створення пара високої якості.
8. Виробництво – конденсована вода поступає в резервуар для води (а). Пар для попереднього нагріву направляється в термічний деаератор (б).

Питання для самоконтролю

1. Опишіть технологічний процес водопідготовки для парових котлів.
2. Для чого виконують водопідготовку?
3. Опишіть процес деаерації. Для чого її проводять?
4. Для чого використовують відстоювання води?
5. Що таке Окисність?

ЛЕКЦІЯ 7. ЗОВНІШНІЄ ОБЛАДНАННЯ КОТЛОАГРЕГАТІВ

План

- 7.1. Тяго-дутьове обладнання.
- 7.2. Живильні пристрої.
- 7.3. Шлакозоловидалення.
- 7.4. Золоуловлювання.

7.1. Тяго-дутьове обладнання

Для нормальної роботи котельного агрегату необхідно забезпечити безперервну подачу повітря у топкову камеру, переміщення продуктів згоряння по газоходах та їх наступне видалення із агрегату. При русі по газоповітряному тракту продукти згоряння мають подолати аеродинамічний опір, на що витрачається певна кількість енергії. Рух повітря і продуктів згоряння здійснюється за допомогою тяги. Тяга може бути природною і штучною.

Природна тяга використовується у котельних агрегатах малої потужності (до 2,5т/год) без хвостових поверхонь нагріву і з невеликим опором газового тракту (50-60Па). У цьому випадку тяга забезпечується рушійною силою, зумовленою різницею статичних тисків між повітрям, що надходить у топкову камеру, і продуктами згоряння, що залишають котельну установку. Силу тяги, тобто рушійну силу, необхідну для подолання гідравлічних опорів, створює димар.

Тяга тим більша, чим вищий димар, більша температура відхідних газів і чим нижча температура зовнішнього повітря. Для зміни режиму тяги використовують заслінки.

Залежно від потужності котельних агрегатів або котельної установки димарі будують стальними, цегляними або залізобетонними. Для тимчасових і невеликих котелень, стальні димарі можуть мати висоту до 40м. Для котельних установок середньої потужності – цегляні труби до 80м.

Висоту труби вибирають залежно від виду тяги (природна або штучна) та вимог санітарно-технічних норм. При штучній тязі димар призначений для відведення продуктів згоряння в атмосферу на висоту, що визначається санітарно-гігієнічними та протипожежними вимогами.

Діаметр труби залежить від сумарної кількості продуктів згоряння, що залишають котельні агрегати і швидкості газів на виході з труби. Значення швидкості знаходиться у межах 6-10м/с.

У сучасних котлоагрегатах, обладнаних хвостовими поверхнями нагріву, природна тяга не може забезпечити потрібну швидкість руху газоповітряного потоку і його видалення в атмосферу. У цьому випадку застосовують штучну тягу із встановленням дутьових вентиляторів та димососів. Вибір димососів і вентиляторів здійснюють із розрахунку на максимальне навантаження котельного агрегату (номінальну продуктивність). Це забезпечує їх нормальну роботу при різноманітних режимах котельної установки.

Для подачі повітря у топку застосовують найчастіше радіальні дуттьові вентилятори. Вентилятори однобічного всмоктування ВД (при температурі всмоктуваного повітря 20°C) і димососи Д, що видаляють продукти згоряння з температурою до 250°C, виготовляють правого та лівого обертання.

Димосос піддається впливові високих температур та механічному зносу золою. Якщо спалюється багатозольне паливо, лопатки димососів мають бути наплавлені спеціальними твердими сплавами для їх захисту від можливого зносу. Потужність N , Вт, двигуна для привода димососа або вентилятора визначають за формулою:

$$N = \frac{1,1LP_n}{\eta} \quad (7.1)$$

де 1,1 – коефіцієнт запасу по потужності; L – продуктивність димососа або вентилятора, м³/с; P_n – повний тиск димососа або вентилятора, Па; η – ККД димососа або вентилятора.

При штучній тязі застосовують кілька способів регулювання.

Дросельне регулювання полягає у тому, що у газоповітряному тракті за допомогою спеціального пристрою – шибера – створюється додатковий опір. Цей спосіб дуже простий, але малоекономічний.

Регулювання сили тяги зміною частоти обертання димососа і вентилятора є більш ефективним. Проте це вимагає застосування електродвигуна із регульованою частотою обертання.

Найбільше поширення знайшов спосіб регулювання продуктивності димососів і вентиляторів напрямними лопатковими апаратами, що встановлюють на всмоктувальних патрубках агрегатів.

7.2. Живильні пристрої

Воду в котли подають живильними пристроями. При цьому використовують насоси різних типів: поршневі або відцентрові із електричним або паровим приводом. Крім того, у невеликих опалювальних котельнях як живильні пристрої застосовують інжектори і ручні насоси.

У котельних установках повинно бути передбачено не менше двох живильних насосів із різними приводами. Допускається установка обох живильних насосів із паровими приводами. Подача кожного насоса має бути не менше 120% потрібної максимальної подачі робочих котлів.

Для живлення парових котлів продуктивністю до 150кг/год і тиском не більше 0,4МПа допускається застосовувати один ручний насос. Другий ручний насос передбачають для живлення водогрійних котлів із загальною поверхнею нагріву до 150м².

У виробничих опалювальних котельнях для подачі води в агрегати в основному застосовують поршневі насоси із паровим приводом і відцентрові – із електричним приводом.

Поршневі насоси встановлюють у котельних установках невеликої потужності. Найширше насоси ПВД і ПДГ використовують для живлення котлів водою при температурі до 100°C. Так, вертикальні двоциліндрові парові насоси типу ПДД призначені для живлення парових котлів ДКВР.

На поршневому насосі повинні бути розміщені манометр і запобіжний клапан на нагнітальному трубопроводі, засувки на нагнітальному і всмоктувальному трубопроводах, вентиль на паропровідному та вихлопному трубопроводах, продувальні клапани для випуску конденсату з циліндрів при прогріві насоса парою.

Відцентрові насоси є найпоширенішими у системі живлення котлів. Вони подають воду рівномірно, відзначаються високою економічністю, зручністю регулювання продуктивності. До недоліків відносять: необхідність тримати насос під заливом або заповнювати його перед пуском; зменшення ККД при малій продуктивності. Відцентрові живильні насоси виготовляють одно- або багатоступінчастими залежно від подачі і робочого тиску.

На відцентровому насосі встановлюють манометри і засувки на всмоктувальному та нагнітальному трубопроводах, приймальний клапан на всмоктувальному трубопроводі, зворотний клапан на нагнітальному трубопроводі, крани для випуску повітря у верхній частині корпусу кожного ступеня.

Для живлення водою дрібних опалювальних котелень застосовують інжектори, що є пароструминними пристроями. Витрата пари становить 7-9% кількості води, що подається. Температура води, що надходить у інжектор, не повинна перевищувати плюс 40°C. Висота подачі води інжектором – не більше 2м. Інжектори мають просту будову, займають мало місця.

У насоси вода надходить із живильних або деаераторних баків. При температурі води понад плюс 70°C вода повинна надходити у насос під деяким напором. Тому баки встановлюють вище живильного насоса. Живильні насоси вибирають із умови забезпечення потрібної продуктивності і необхідного напору.

Продуктивність живильного насоса $L_{\text{жн}}$, м³/с, визначають за формулою:

$$L_{\text{жн}} = 1,2 \left(\frac{D}{\rho} \right) \quad (7.2)$$

де 1,2 – коефіцієнт запасу по продуктивності; D – максимальна продуктивність всієї котельні, кг/с; ρ – густина, кг/м³.

Повний напір, необхідний для подачі води у котел:

$$H_{\text{жн}} = (P_{\text{н}} - P_{\text{п}}) \quad (7.3)$$

де $P_{\text{н}}$ – тиск у нагнітальному патрубку насоса, Па; $P_{\text{п}}$ – тиск у приймальному патрубку насоса, Па.

У першому наближенні для розрахунку напору, що розвивається живильним насосом, можна користуватися формулою:

$$H_{\text{жн}} = 1,1(P_{\text{б}} + (0,15 \dots 0,20)) \quad (7.4)$$

де 1,1 – коефіцієнт запасу по напору; $P_{\text{б}}$ – робочий тиск у барабані котельного агрегату, Па; 0,15...0,20 – число, що враховує втрати напору у трубопроводах і живильній арматурі, Па.

Потужність N, Вт, потрібну для привода насоса, визначають із виразу:

$$N = (L_{\text{жн}} H_{\text{жн}}) / \eta_{\text{н}} \quad (7.5)$$

де $L_{\text{жн}}$ – продуктивність насоса, м³/с; $H_{\text{жн}}$ – повний напір насоса, Па; $\eta_{\text{н}}$ – ККД насоса, що дорівнює 0,70...0,85.

7.3. Шлакозоловидалення

У процесі спалювання палива виділяються шлак, що залишається у топці, і зола, що провалюється через колосникову решітку або виноситься із продуктами згоряння. Остання частково осідає у газоведах і зупиняється золоуловлювачами, а частково через димову трубу викидається в атмосферу. При камерному спалюванні твердого палива основна маса золи іде з газами.

Процес шлакозоловидалення складається із видалення золи та шлаку із котельних агрегатів, прибирання та їх транспортування з території. У котельних установках застосовують такі способи шлакозоловидалення: ручний, механічний, пневматичний та гідравлічний.

Ручне шлакозоловидалення застосовують тільки у котельних установках паропродуктивністю до 2т/год. Шлак і зола потрапляють у бункер, розміщений під колосниковими решітками. Із бункера шлак і золу вагонеткою вивозять із приміщення котельні.

Механізоване шлакозоловидалення проводиться кількома способами. Найпростіший із них полягає у переміщенні вагонеток по похилій естакаді за допомогою електролебідки. Більш широко застосовують скреперні установки, що забезпечують сухе або мокре золовидалення (рис. 7.1). Шлак і зола, попередньо залиті водою (при мокрому способі) надходять у шлаковий канал 2, звідки скреперами 3 по похилій естакаді подаються в бункер 6, встановлений за межами будівлі котельні. Із бункера шлак і зола потрапляють у кузов автомобіля. Скрепер пересувається по вузькоколіїних рейках за допомогою лебідки та канатів.

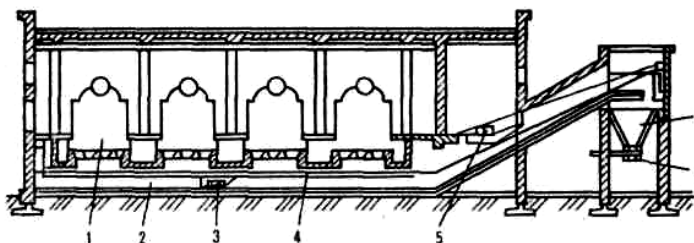


Рисунок 7.1. Схема скреперного шлакозоловидалення: 1 – топки котлів; 2 – шлаковий канал; 3 – скрепер; 4 – система канатів; 5 – шибер; 6 – затвор; 7 – шлаковий бункер

Пневматичні системи шлакозоловидалення застосовують при виході вогнищевих залишків 0,3-10т/год. Вони можуть бути нагнітального або всмоктувального типу. Перевага віддається схемі пневматичної системи шлаковидалення всмоктувального типу. Швидкість повітря у трубопроводі при пневмотранспорті шлаку і золи повинна бути не менше 25м/с. Концентрація завислих у повітряному потоці частинок не повинна перевищувати 3,5-7,0кг на 1 кг повітря. Попередньо шлак подрібнюється у дробарці до розміру не більше 20мм.

Системи пневмошлаковидалення відрізняються компактністю, простотою побудови і обслуговування. Основний недолік цих систем – велика витрата електроенергії на транспортування шлаку та золи.

Гідравлічні системи шлакозоловидалення застосовують при необхідності видалення шлаку і золи понад 10 т/год при достатній кількості води і близькості золовідвалу. У цій системі транспортуючим агентом є вода.

7.4. Золоуловлювання

У відхідних газах знаходиться летка зола, частинки палива, що не згоріло, окиси сірки і азоту, які забруднюють повітря і тим самим шкідливо впливають на навколишнє середовище. Тому застосовують різні системи золоуловлювання.

Розрізняють такі групи золоуловлювачів: механічні сухі інерційні, механічні інерційні мокрі, електрофільтри. Механічні сухі золоуловлювачі поділяють на два типи: відцентрові (або циклонні) та інерційні (жалюзійні).

У котельних установках малої та середньої потужності найчастіше застосовують циклонні золоуловлювачі. В циклонних золоуловлювачах продукти згоряння вводяться зверху через кільцевий простір між корпусом і трубою (рис. 7.2). Встановлені в них гвинтоподібні лопаті 2 сприяють вихроподібному руху газів. Частинки золи, що містяться у газах, притискаються до корпусу циклона, втрачають швидкість і по конічній частині 6 під впливом сили тяжіння опускаються в бункер 7, звідки періодично видаляються. Циклонні батареї мають просту конструкцію, забезпечують відносно добрий ступінь очистки газів (65-85%). їх недоліки – схильність до забивання. Великий опір по газу (до 10Па), великі габаритні розміри.

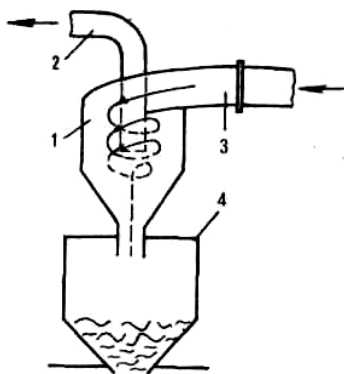


Рисунок 7.2. Батарейний циклон: 1 – корпус циклона; 2 – патрубок для газів; 3 – патрубок 4 – бункер випуску очищених для входу димових газів

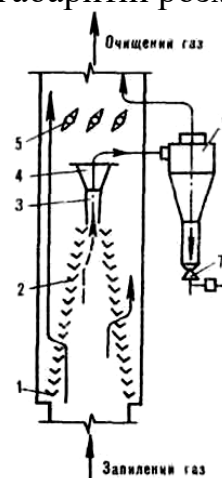


Рисунок 7.3. Схема жалюзійних золоуловлювачів: 1 – входна камера; 2 – кутник решітки; 3 – оглядово-ремонтна щілина; 4 – дифузор; 5 – поворотна заслінка; 6 – циклон; 7 – клапан-мигалка

Жалюзійні золоуловлювачі складаються із решіток, виготовлених із металічних кутників 2, встановлених у вертикальному корпусі (рис. 7.3). При різкому повороті потоку газів частинки золи по інерції продовжують рухатись і більша їх частина через щілину 4 потрапляє із невеликою кількістю газу в циклон 6. За допомогою клапана 7 зола періодично видаляється із циклона.

Перевагами жалюзійних золоуловлювачів є їх невеликі габаритні розміри, малий опір, а недоліками – швидкий знос решіток і низький коефіцієнт очистки газів (60-70%).

Мокрі механічні золоуловлювачі (відцентрові скрубери) застосовують у котельнях середньої та великої потужностей. Вони працюють за принципом інерційних золоуловлювачів. Більш висока очистка у мокрих золоуловлювачах досягається зволоженням середовища, куди потрапляють відхідні гази.

Електрофільтри у с.-г. котельних установках не застосовують. Їх використовують на потужних теплових електростанціях і великих теплоцентралях.

Питання для самоконтролю

1. Як проводять золоуловлювання?
2. Для чого проводять золоуловлювання?
3. Як проводять шлаковидалення?
4. Для чого проводять шлаковидалення?
5. Для чого використовують живильні пристрої?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горобець В.Г. Теплоенергетичні установки і системи: [Навчальний посібник] Горобець В.Г. – К.: ЦП «Компринт», 2018. – 380 с.
2. Теплоенергетичні установки. Конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 208 «Агроінженерія». Харків. ДБТУ; уклад.: С.О. Поляшенко, О.В. Єсіпов. – Харків: [б. в.], 2023. – 109 с.
3. Проектування систем тепlopостачання сільського господарства: Навч. посіб. / Драганов Б.Х. та інш.; за ред. Б.Х. Драганова. – Київ: Техніка, 2003. – 161 С.
4. Прядко М.О., Павелко В.І., Василенко С.М. Теплові мережі: Навчальний посібник / За ред. Прядка М.О. – К.: Алерта, 2005. – 227с.
5. Єнін П.М., Швачко Н.А. Тепlopостачання. (частина 1. Теплові мережі та споруди: Навч. посібник. – К.: Кондор, 2007. – 244 с.
6. Конструкції елементів пневмоагрегатів [Текст] : навч. пос. / М. Г. Прокопов, С. М. Ванєєв, В. М. Козін, Ю. С. Мерзляков. – Суми : СумДУ, 2020. – 146 с.
7. Арсеньєв, В. М. Кріогенна техніка: основи теорії і розрахунку циклів кріогенних установок [Текст] : навч. посіб. / В. М. Арсеньєв, В. М. Козін. – Суми : СумДУ, 2021. – 272 с.
8. Козін, В. М. Холодильні технології: основи теорії, приклади і завдання [Текст] : навч. посіб. / В. М. Козін, С. О. Шарapов. – Суми : СумДУ, 2021. – 140 с.
9. Арсеньєв В. М. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи на тему «Розрахунок повітроохолоджувача поверхневого типу» з дисципліни «Проектування холодильних установок» [Текст] : для студ. спец. 142 «Енергетичне машинобудування» за освітньо-професійною програмою «Холодильні машини і установки» денної та заочної форм навчання / В. М. Арсеньєв, О. Ю. Чех, В. М. Козін. – Суми : СумДУ, 2020. – 32 с.
10. Методичні вказівки до практичних занять із дисципліни «Тепломасообмін» [Текст] : для здобувачів за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти зі спец. 142 «Енергетичне машинобудування» та 144 «Теплоенергетика» заочної форми навчання / В. М. Козін, С. С. Мелейчук. – Суми : СумДУ, 2020. – 90 с.
11. Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи на тему «Розрахунок параметрів циклу» двоступеневої парокомпресійної холодильної машини з дисципліни «Теплофізичні основи низькотемпературної техніки» [Електронний ресурс] : для здобувачів за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти за спец. 142 «Енергетичне машинобудування» за освітньо-професійними програмами «Холодильні машини і установки» та «Опалення, вентиляція, кондиціонування повітря та штучний холод» денної, заочної та дистанційної форм навчання / В. М. Арсеньєв, В. М. Козін. – Суми : СумДУ, 2022. – 39 с.

Чепіжний Андрій Володимирович
Козін Віктор Миколайович
Сіренко Віктор Федорович

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНІ УСТАНОВКИ І
СИСТЕМИ АПВ
Частина 1
Котельні агрегати
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

Суми РВВ, Сумський національний аграрний університет, вул. Г. Кондратьєва, 160

Підписано до друку: січень, 2025р. Формат А5: Гарнітура Times New Roman
Тираж: 50 примірників Замовлення _____ Умов. друк. арк. 2,1
