

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних і самостійних робіт  
з курсу

**«ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧІ УСТАНОВКИ»**

(для студентів 3 курсу денної форми навчання  
напряму підготовки 6.060101 «Будівництво»)

ХАРКІВ  
ХНАМГ  
2013

Методичні вказівки до виконання практичних і самостійних робіт з курсу «Теплогенеруючі установки» (для студентів 3 курсу денної форми навчання напряму підготовки 6.060101 «Будівництво») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: Б. С. Ільченко, В. Г. Котух. – Х.: ХНАМГ, 2013. – 34 с.

Укладачі: д. т. н., проф. Б. С. Ільченко,  
к. т. н., доцент В. Г. Котух

Рецензент: д. т. н., проф. І. І. Капцов

Методичні вказівки побудовані за вимогами кредитно-модульної системи організації навчального процесу (КМСОНП).

Рекомендовано кафедрою ЕГТС,  
протокол № 16 від 16.11.2012 р.

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ .....	4
1. Основні фізико-хімічні поняття .....	5
2. Основи теплопередачі .....	9
2.1 Теплопровідність .....	9
2.2 Теплопередача .....	11
3. Паливо та його спалювання .....	14
3.1 Елементарний склад палива .....	14
3.2 Процес горіння палива .....	17
3.3 Топкове обладнання .....	23
4. Котельні установки .....	24
4.1 Тепловий баланс та ККД котлоагрегата .....	24
4.2 Витрати палива. Випарна здатність палива .....	29
Список джерел .....	31
ДОДАТКИ .....	32
Додаток А .....	32
Додаток Б .....	34

## ВСТУП

**Теплогенеруюча установка** – сукупність обладнань і механізмів для виробництва теплової енергії у вигляді пари, гарячої води або підігрітого повітря.

Водна пара використовується для технологічних потреб у промисловості та сільському господарстві, а також для нагрівання води, яка спрямовується для потреб опалення, вентиляції та гарячого водопостачання.

Гаряча вода та підігріте повітря використовуються для опалення виробничих, громадських і житлових будівель, а також для комунально-побутових потреб населення.

Теплогенеруючі установки призначені для виробництва теплової енергії з первинних джерел енергії, якими є органічне та ядерне паливо, сонячна та геотермальна енергія, горючі та теплові відходи промислових підприємств.

Теплова енергія – один з основних видів енергії, яку використовує людина для забезпечення необхідних умов життєдіяльності (життя, побуту та праці).

Теплова енергія, яку виробляє людина з первинних джерел енергії, використовується для отримання електричної енергії на теплових електростанціях, для технологічних потреб промислових підприємств, для опалення та гарячого водопостачання житлових і громадських будівель.

**Системи теплопостачання** - комплекси обладнань, які виробляють теплову енергію та доставляють її у вигляді водної пари, гарячої води або підігрітого повітря споживачам.

**Джерелами енергії** (також і теплової) можуть бути речовини, енергетичний потенціал яких є достатнім для наступних перетворень їхньої енергії на інші види з метою наступного використання. Енергетичний потенціал речовин є параметром, що дає змогу оцінити принципову можливість і доцільність їхнього використання як джерела енергії та вимірюється в одиницях енергії: джоулях (Дж) або кіловат – годинах (теплових) [ кВт(тепл.)·год].

Джерела енергії умовно поділяють на первинні та вторинні.

**Первинні джерела енергії** – речовини, енергетичний потенціал яких є наслідком природних процесів, що не залежить від діяльності людини.

Первинні джерела енергії умовно поділяють на:

- невідновлювані (вугілля, нафта, природній газ, сланці, торф, ядерне паливо);
- відновлювані (вітер, сонце, водні ресурси річок, океани, моря, деревина);
- невичерпні (термальні води Землі, речовини та джерела отримання термоядерної енергії).

**Вторинні джерела енергії** – речовини, які володіють певним енергетичним потенціалом і є побічними продуктами діяльності людини:

- відпрацьовані горючі органічні речовини;
- міські відходи;
- промислові відходи;
- гарячий відпрацьований теплоносієм промислових виробництв (газ, вода, пара) та нагріті вентиляційні викиди;
- відходи сільгосп підприємств.

Перетворення різних видів енергії (хімічної, випромінювання, електричної та інших) на теплову здійснюється в технологічних обладнаннях шляхом створення умов, завдяки яким це перетворення перебігатиме з максимальним термодинамічним ефектом.

При цьому створюється робоче тіло – носій теплової енергії (**теплоносій**), завдяки якому тепла енергія транспортується до споживача та реалізується у вигляді теплоти заданого процесу. Зазвичай, робочим тілом для переносу теплової енергії – теплоносієм – є рідина або газ. У системах тепlopостачання теплоносієм є вода, водна пара, повітря.

Теплову енергію заданого потенціалу можна отримати шляхом перетворення:

- хімічної енергії органічного палива;
- енергії, яка виділяється при розщепленні ядерного палива;
- електричної енергії;
- енергії сонячного випромінювання;
- геотермальної енергії.

Згідно з цим використовують такі **методи виробництва теплової енергії**:

- метод спалювання органічного палива;
- метод, який базується на самокерованій ланцюговій ядерній реакції ділення ядер елементів;
- метод перетворення електричної енергії на теплову шляхом розігріву нагрівача з високим електроопором із наступним передаванням теплоти від цього нагрівача до робочого тіла (газу або рідини) шляхом теплоперенесення;
- метод перетворення сонячної енергії на теплову у спеціальних обладнаннях, які сприймають енергію Сонця, - геліоприймачах із наступним передаванням від них теплоти робочому тілу – воді або повітрю;
- метод, який базується на передаванні теплоти від геотермальних вод, у теплообміннику до робочого тіла, яке нагрівається за рахунок теплової енергії цих вод до заданих параметрів і спрямовується до споживача.

## 1. ОСНОВНІ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПОНЯТТЯ

Усі предмети, що оточують людину (стілець, стіл, насос, книга), є **фізичними тілами**. Усі фізичні тіла складаються з окремих елементів, що є речовинами.

**Речовина** - окремий вид матерії, який має за певних умов постійні фізичні властивості. Наприклад: залізо, мідь, кисень, вода.

Усі речовини у природі зустрічаються у трьох станах:

- твердому (усі тверді речовини за нормальних умов зберігають форму й об'єм);
- рідкому (рідкі речовини за нормальних умов не зберігають своєї форми але їхній об'єм не змінюється);
- газоподібному (газоподібні речовини не зберігають а ні об'єм, а ні форму, й вони намагаються зайняти якнайбільший об'єм).

При нагріванні всі речовини розширюються, а при охолодженні - стискаються.

**Енергія** – це спільне кількісне мірило всіх форм руху матерії. У природі існує потенційна, кінетична та внутрішня енергія.

**Потенційна енергія** – це така енергія, яка визначається взаємним положенням речовин, тіл або частин речовини чи тіла. Потенційну енергію має водна пара в паровому котлі.

**Кінетична енергія** – це енергія, яку має будь-яка речовина або фізичне тіло внаслідок свого руху. Кінетична енергія речовини або фізичного тіла залежить від маси та швидкості. Чим більша маса та швидкість речовини чи тіла, що рухається, тим більша його кінетична енергія.

**Внутрішня енергія речовини** – це кінетична та потенційна енергія молекул, з яких складається речовина. Вона не залежить а ні від руху, ані від положення цієї речовини відносно інших речовин. Вона залежить тільки від температури речовини, оскільки залежно від температури речовини змінюється швидкість руху молекул, а відповідно, і внутрішня енергія.

**Інерція** – це властивість речовини або фізичного тіла зберігати спокій або прямолінійний рівномірний рух.

**Тиск пари (газу)** на стінки сосуду, у якому міститься пара (газ), - це середній результат ударів об стінки великої кількості молекул, із яких складається пара (газ). Тиск вимірюється силою, яка діє рівномірно на одиницю поверхні за напрямком, перпендикулярним поверхні. У міжнародній системі одиниць (СІ) за одиницю тиску прийнято паскаль ( $1\text{Па} = 1\text{Н}/\text{м}^2$ ). Паскаль – одиниця вимірювання тиску дуже мала. Прийняті несистемні одиниці в техніці: кілопаскаль (1 кПа), мегапаскалі (1 МПа) та гігапаскалі (1 ГПа).

**Напір** – це висота, на яку рідина або газ можуть піднятися під дією статичного тиску (насосом). Напір – лінійна величина, яка відбивається в одиницях довжини (м), а не тиску.

**Атмосферний тиск** – це тиск повітряної оболонки Землі завтовшки в декілька сотень кілометрів на поверхню Землі та предметів, що на ній знаходяться. Атмосферний тиск на рівні моря дорівнює 760 мм рт.ст. Чим вище від рівня моря точка поверхні Землі, тим менше атмосферний тиск. **Фізична атмосфера** (атм) – тиск стовпчика ртуті заввишки 760мм або  $1,033\text{ кгс}/\text{см}^2$  або 101325 Па. Крім фізичної атмосфери, одиницею вимірювання тиску є **технічна атмосфера**, яка дорівнює  $1\text{ кгс}/\text{см}^2 = 98066,5\text{ Па} = 0,98\text{ кПа}$ .

У закритих сосудах розрізняють тиск надлишковий, абсолютний і розрідження (вакуум).

**Надлишковий тиск** (ати) – це тиск понадатмосферний. Манометр, який приєднаний до працюючого парового або водогрійного котла, показує надлишковий тиск (стрілка манометра перебуває на одиниці, то це відповідає тиску в котлі 1атм або  $0,1\text{ МПа} = 1\text{кгс}/\text{см}^2$ , а якщо стрілка на 10, то тиск пари в котлі 10атм або  $1\text{ МПа} = 10\text{ кгс}/\text{см}^2$ ).

**Абсолютний тиск** (ата) дорівнює суммі надлишкового тиску та тиску навколишнього повітря (атмосферного тиску).

**Розрідження (вакуум)** – це тиск, який менше за тиск навколишнього повітря (атмосферного тиску).

**Температура** – це вимірник нагрятості речовини або фізичного тіла. У нашій країні використовуються дві температурних шкали: термодинамічна та міжнародна практична. За кожною з цих шкал температура може бути відображена й у градусах абсолютної шкали Кельвіна (К) й у градусах Цельсія ( $^{\circ}\text{C}$ ) залежно від початку відліку (положення нуля) на шкалі. Температура в Кельвінах більша за температуру, виміряну у градусах Цельсія, на  $273^{\circ}\text{C}$ .

**Робота, потужність і теплота.** При здійсненні будь-якої роботи з'являється рівна їй кількість теплової енергії (за рахунок витраченої при цьому кількості механічної енергії), і навпаки, при зникненні деякої кількості теплоти виникає рівна їй кількість механічної енергії. У Міжнародній системі (СІ) теплота, енергія та робота відображаються загальною одиницею енергії – джоулем (Дж). Робота, яка здійснена в одиницю часу, є потужністю. За одиницю потужності прийнятий ватт ( $1\text{ Вт} = 1\text{ Дж/с}$ ).

**Теплоємність** – це кількість теплоти, яку необхідно витратити для зміни температури одиниці будь-якої речовини на  $1^{\circ}\text{C}$ . Для характеристики теплових якостей речовини прийнята теплоємність їхньої одиниці ( $1\text{ кг}$ ,  $1\text{ м}^3$ ), яку відповідно, називають питомою масовою, або питомою об'ємною теплоємністю. Теплоємність залежить від природи робочого тіла, його температури та характеру процесу, у якому здійснюється підведення або відведення тепла.

**Питома теплоємність** – це кількість теплоти, яку потрібно витратити на одиницю речовини або фізичного тіла ( $1\text{ кг}$ ,  $1\text{ м}^3$ ), для того, щоб змінити його температуру на  $1^{\circ}\text{C}$ . Одиниці вимірювання питомих теплоємностей:  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$  або  $\text{ккал}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ ;  $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$  або  $\text{ккал}/(\text{м}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ .

Для газів розрізняють питому теплоємність за постійного об'єму ( $c_v$ ) і питому теплоємність за постійного тиску ( $c_p$ ). Завжди  $c_p$  більше  $c_v$ . У теплотехніці прийнято питому теплоємність називати просто теплоємністю.

**Теплообмін** – це розповсюдження та передавання теплоти між речовинами та фізичними тілами.

Розрізняють три способи передавання теплоти: теплопровідність, конвекція та випромінювання (радіація).

**Теплопровідність** – перенесення теплоти від більш нагрітих ділянок тіла до менш нагрітих унаслідок теплового руху молекул, атомів і вільних електронів. Це фактично здатність речовини або фізичного тіла пропускати скрізь себе теплоту. При цьому перенесення теплоти завжди здійснюється таким чином, що він сприяє вирівнюванню температури в середовищі.

**Коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$** ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ , - кількість теплоти, яка передається  $1\text{ м}^2$  поверхні стінки за одиницю часу при різниці температур  $1^{\circ}\text{C}$  та товщині стінки -  $1\text{ м}$ .

**Конвекція** – перенесення теплоти у рідинах і газах за рахунок переміщення їхніх об'ємів при нагріванні (або шляхом перемішування та переміщення по різному нагрітих шарів рідини і газоподібних речовин під дією сил тяжіння). Явище передавання теплоти при стиканні стінки з рідиною шляхом теплопровідності й наступне розповсюдження її в рідині за рахунок конвекції є **конвективним теплообміном**, або **теплопередачею**.

**Коефіцієнт конвективного теплообміну**  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), – кількість теплоти, яка передається від стінки площею поверхні 1м<sup>2</sup> до рідини або газу, і, навпаки, за одиницю часу за різниці температур 1°С.

**Випромінювання (радіація)** – передача теплоти від одного тіла до іншого шляхом електромагнітних хвиль (променевої енергії) скрізь прозоре газове середовище (наприклад, повітря), яка, потрапивши на інші тіла, частково або повністю поглинається цим тілом. Цей процес передавання теплоти (без руху молекул) супроводжується перетворенням теплової енергії на променеву і, навпаки, променевої в теплову.

**Коефіцієнт променистого теплообміну**  $\alpha_{п}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), – кількість теплоти, яка передається випромінюванням від 1м<sup>2</sup> однієї поверхні до іншої за одиницю часу за різниці температур 1°С. Величина променевого теплообміну залежить від температури випромінювальної поверхні в четвертому ступені (Т<sup>4</sup>) і коефіцієнтів випромінювання поверхонь.

Променевий теплообмін може здійснюватись не лише між твердими тілами, але й між газами та твердими тілами (топки котлів). У газах випромінювання та поглинання здійснюється по всьому об'єму, а у твердих тілах – лише в поверхневому шарі.

Одночасний теплообмін теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням здійснюється в паровому котлі. У котлі теплота передається від продуктів згорання палива до сталевих стінок кип'ятильних і екранних труб шляхом випромінювання та конвекції, а крізь сталеві стінки труб теплота передається воді теплопровідністю.

**Коефіцієнт тепловіддачі** від рідини або газу до стінки  $\alpha_v$  або від стінки до рідини або газу  $\alpha_n$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С), – кількість теплоти, яку отримає або віддасть за одиницю часу одиниця площі поверхні стінки в 1м<sup>2</sup> за різниці температур у 1°С. Коефіцієнт тепловіддачі відповідно дорівнює сумі коефіцієнтів конвекції та випромінювання.

**Коефіцієнт теплопередачі К**, Вт/(м<sup>2</sup>·°С), – кількість теплоти, яка передається за одиницю часу від одного середовища до іншого (рідина або газу) крізь стінку площею 1м<sup>2</sup>, що їх відокремлює, за різниці температур 1°С.

**Термічний опір теплопередачі R= 1/К** – величина, зворотна коефіцієнту теплопередачі.

**Теплота пароутворення (випаровування) води**, кДж/кг, - кількість теплоти, яку потрібно підвести до води для перетворення її з рідкого стану на пароподібний за температури кипіння та постійного тиску.

Теплота пароутворення є **прихованою теплотою**, тому що під час нагрівання рідини та газу за постійного тиску (у замкненій посудині) температура їхня залишається постійною, поки вся рідина не перетвориться на пару. При конденсації пари виділяється прихована теплота пароутворення.

**Ентальпія (тепловміст)**, кДж/кг, - кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання 1кг води від 0° С до температури кипіння (до моменту пароутворення). Із підвищенням тиску пари прихована теплота пароутворення зменшується, а температура кипіння й ентальпія підвищуються.

Розрізняють пару насичену та перегріту.



**Насичена пара** – це пара, яка перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною та яка має однакову з рідиною температуру й тиск.

**Волога насичена пара** – це пара, у яку при пароутворенні потрапили крапельки котлової води.

**Суха насичена пара** – це пара без крапель води.

Якщо до сухої насиченої пари підвести теплоту за постійного тиску, тоді отримаємо **перегріту пару**, яка не містить вологи, а її температура буде вищою за температуру кипіння при цьому тиску. Фактично перегріта пара – це водна пара, у якій температура вище за температуру насиченої пари за однакового тиску.

Різниця між температурою перегрітої пари та температурою насиченої пари того самого тиску - це **ступінь перегріву**.

При охолодженні перегрітої пари її температура спочатку знижується до температури, яка дорівнює температурі насиченої пари того самого тиску, а потім може початися конденсація.

## 2. ОСНОВИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ

У котельних установках тепло від продуктів згоряння огорожувальним конструкціям топки та газоходам, а скрізь них воді, парі, повітрю передається трьома способами: випромінюванням (радіацією), теплопровідністю та конвекцією.

### 2.1 Теплопровідність

Кількість тепла, яка проходить крізь плоску однорідну стіну за одиницю часу, визначається за формулою:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м · °С);

$t_1$  та  $t_2$  – температури поверхонь стіни, °С;

$F$  – площа стінки, м<sup>2</sup>;

$\delta$  – товщина стінки, м.

Для багатошарової стінки кількість тепла визначаємо за формулою:

$$Q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} F = \frac{\lambda_{екв}}{\Delta} (t_1 - t_{n+1}) F, \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

де  $\lambda_{екв}$  – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності багатошарової стінки

$$\lambda_{екв} = \frac{\Delta}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \text{ Вт}/(\text{ м} \cdot \text{ } ^\circ \text{ С}), \quad (2.3)$$

$n$  – кількість шарів;

$\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  – товщина шарів стінки;

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  - коефіцієнт теплопровідності окремих шарів.

Температури на поверхні шарів багатошарової стіни визначаються за формулами:

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad (2.4)$$

$$t_3 = t_2 - q \frac{\delta_2}{\lambda_2} = t_1 - q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right); \quad (2.5)$$

$$t_{n+1} = t_1 - q \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (2.6)$$

Лінійна щільність теплового потоку циліндричної стінки визначається так:

$$q = \frac{2\pi(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт/м}, \quad (2.7)$$

де  $\ell$  -- довжина труби, м;

$d_1$  та  $d_2$  – відповідно внутрішній і зовнішній діаметри труби, м.

Для багат шарової циліндричної стінки лінійна щільність теплового потоку визначається за формулою:

$$q = \frac{2\pi(t_1 - t_{n+1})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n}}. \quad (2.8)$$

Температури на поверхнях шарів багат шарової циліндричної стінки визначаються за формулами:

$$t_2 = t_1 - \frac{q}{2\pi} \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}; \quad (2.9)$$

$$t_3 = t_2 - \frac{q}{2\pi} \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = t_1 - \frac{q}{2\pi} \left( \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \right); \quad (2.10)$$

$$t_{i+1} = t_1 - \frac{q}{2\pi} \sum_{i=1}^i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}. \quad (2.11)$$

За допомогою вищенаведеного теоретичного матеріалу можна розв'язати наступні задачі.

**Задача 1.** Крізь плоску металеву стінку топки котла завтовшки  $\delta = 14$  мм від газів до киплячої води проходить питомий тепловий потік  $q = 25000$  Вт/м<sup>2</sup>. Коефіцієнт теплопровідності сталі  $\lambda_{ст} = 50$  Вт/(м·°С). Визначити перепад температури на поверхнях стінки.

Відповідь:  $\Delta t = 7^\circ\text{C}$ .

**Задача 2.** Визначити еквівалентний коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{екв}$  сталевий стінки парового котла, якщо вона покривається шаром накипу 2 мм з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda_{н} = 1,35$  Вт/(м·°С). Товщина сталевий листа  $\delta = 16$ мм, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_{ст} = 50$  Вт/(м·°С). Порівняти  $\lambda_{екв}$  з коефіцієнтом теплопровідності сталі.

Відповідь:  $\lambda_{екв} = 10$  Вт/(м·°С), що в п'ять разів менше.

**Задача 3** Підрахувати питомий тепловий потік  $q$  крізь сталевий стінку котла завтовшки  $\delta_1 = 20$ мм, якщо одна поверхня цієї стінки покрита шаром накипу завтовшки  $\delta = 2$  мм. Коефіцієнт теплопровідності сталі  $\lambda_{ст} = 50$  ккал/(м·год·°С), накипу  $\lambda_{н} = 1,0$  ккал/(м·год·°С). Температура поверхні сталевий труби дорівнює  $250^\circ\text{C}$ , а поверхні накипу -  $100^\circ\text{C}$ . Визначити також температуру у площині торкання металу та накипу. Підрахунок провалити в одиницях системи СІ.

Відповідь:  $q = 75000$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t = 224^\circ\text{C}$ .

**Задача 4.** Стінка нагрівальної печі має два шари цегли. Унутрішній шар виконаний із вогнетривкої цегли завтовшки  $\delta_1 = 350$  мм, а зовнішній з червоної цегли товщиною  $\delta_2 = 250$  мм. Визначити температуру на внутрішній поверхні стінки  $t_1$  та на внутрішньому боці червоної цегли  $t_2$ , якщо на зовнішньому боці температура стінки  $t_3 = 90^\circ \text{C}$ , а втрати тепла крізь  $1 \text{ м}^2$  стінки дорівнює  $1 \text{ кВт}$ . Коефіцієнт теплопровідності вогнетривкої та червоної цегли відповідно  $\lambda_{\text{в.ц}} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  і  $\lambda_{\text{ч.ц}} = 0,58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ .

Відповідь:  $t_1 = 770^\circ \text{C}$ ;  $t_2 = 520^\circ \text{C}$ .

**Задача 5.** Обмурівка печі складається з шарів шамотної та червоної цегли та діатомітової засипки між ними. Товщина шамотного шару дорівнює  $\delta_1 = 120$  мм, діатомітової засипки  $\delta_2 = 50$  мм та червоної цегли  $\delta_3 = 250$  мм. Коефіцієнти теплопровідності відповідно дорівнюють  $\lambda_1 = 0,8 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot \text{год}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $\lambda_2 = 0,12 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C})$  та  $\lambda_3 = 0,6 \text{ ккал}/(\text{м}\cdot\text{год}\cdot^\circ\text{C})$ . Підрахунок робити в одиницях системи СІ.

У скільки разів необхідно збільшити товщину шару червоної цегли для того, щоб обмурівка без діатомітової засипки мала такі самі теплові втрати, як і з засипкою?

Відповідь: для визначення потрібно використовувати умову рівності термічних опорів обмурівки печі для двох випадків; товщину шару червоної цегли потрібно збільшити у два рази.

**Задача 6.** Визначити питомі витрати тепла крізь стінку труби ( $d_1/d_2 = 20/30$  мм) з жаротривкої сталі, коефіцієнт теплопровідності якої  $\lambda_2 = 17,45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ , температура зовнішньої поверхні  $600^\circ\text{C}$ , а внутрішньої поверхні  $450^\circ\text{C}$ .

Відповідь:  $q = 40705 \text{ Вт}/\text{м}$ .

**Задача 7.** Визначити тепловий потік крізь поверхню  $1 \text{ м}$  пароводу внутрішнім діаметром  $140$  мм, ізолюваного двома шарами теплової ізоляції завтовшки  $\delta_2 = 20$  мм та  $\delta_3 = 40$  мм. Коефіцієнти теплопровідності труби й ізоляції відповідно  $\lambda_1 = 55 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ ,  $\lambda_2 = 0,037 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  та  $\lambda_3 = 0,14 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ . Температура на внутрішній поверхні трубопроводу  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  та зовнішньої поверхні ізоляції  $t_4 = 55^\circ\text{C}$ . Товщина стінки пароводу  $\delta = 5$  мм.

Відповідь:  $q = 172,5 \text{ Вт}/\text{м}$ .

**Задача 8.** Як зміниться втрата тепла крізь ізолювану стінку паропроводу (див. задачу 7), якщо ізоляційні шари поміняти місцями?

Відповідь:  $q = 208 \text{ Вт}/\text{м}$ ,  $\Delta q = 20,6 \%$ .

## 2.2 Теплопередача

Кількість тепла, що передається від одного теплоносія до іншого крізь розділову стінку за одиницю часу, визначається рівнянням:

$$Q = k(t_{f1} - t_{f2})F, \text{ Вт}, \quad (2.12)$$

де  $k$  – коефіцієнт теплопередачі,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

$t_{f1}$  та  $t_{f2}$  – температури теплоносіїв,  $^\circ\text{C}$ ;

$F$  – площа розділової поверхні,  $\text{м}^2$ .

При теплопередачі крізь плоску однорідну стінку коефіцієнт теплопередачі визначається за рівнянням:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.13)$$

де  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі на поверхнях стінки, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  
 $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м · °С);  
 $\delta$  – товщина стінки, м.

Для багатошарової стінки коефіцієнт теплопередачі визначається за рівнянням:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.14)$$

де  $\delta_i$  та  $\lambda_i$  – товщина та теплопровідність шарів стінки.

Температури поверхонь стінки визначаємо за рівняннями:

$$t_{w1} = t_{f1} - q \frac{1}{\alpha_1}; \quad (2.15)$$

$$t_{w2} = t_{f2} + q \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.16)$$

При теплопередачі крізь циліндричну стінку кількість тепла коефіцієнт теплопередачі визначаються відповідно за такими рівняннями:

$$Q = \pi k_\ell (t_{f1} - t_{f2}) \ell, \text{ Вм}; \quad (2.17)$$

$$k_\ell = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (2.18)$$

де  $k_\ell$  - коефіцієнт теплопередачі віднесений до одиниці довжини труби;  
 $\ell$  - довжина труби, м.

Температура на внутрішній і зовнішній поверхнях труби визначаються за рівняннями:

$$t_{w1} = t_{f1} - \frac{q_\ell}{\pi} \frac{1}{\alpha_1 d_1}; \quad (2.19)$$

$$t_{w2} = t_{f2} + \frac{q_\ell}{\pi} \frac{1}{\alpha_2 d_2}. \quad (2.20)$$

За допомогою вищенаведеного теоретичного матеріалу можна розв'язати наступні задачі.

**Задача 9.** Визначити щільність теплового потоку крізь плоску стінку топ-ки парового котла та температури на поверхні стінки, якщо задані температура топочних газів 1200° С, температура води в котлі 200° С, коефіцієнти тепловіддачі відповідно - 45 Вт/(м<sup>2</sup> · °С) та 6000 Вт/(м<sup>2</sup> · °С), товщина стінки 14 мм та коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки - 58 Вт/(м · °С).

Відповідь:  $q = 44100$  Вт/м<sup>2</sup>,  $t_{w1} = 220$ °С,  $t_{w2} = 207,35$ °С.

**Задача 10.** Щільність теплового потоку крізь плоску стінку котла при температурі газів  $t_{f1} = 1100$ °С та температурі води у котлі  $t_{f2} = 180$ °С складає 50000 Вт/м<sup>2</sup>. Коефіцієнт тепловіддачі з боку води складає 5700 Вт/(м<sup>2</sup> · °С).

Визначити коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт тепловіддачі з боку газів та температуру поверхонь стінки котла, якщо її товщина 12 мм, а коефіцієнт теплопровідності металу - 56 Вт/(м · °С).

Відповідь:  $k = 54,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ,  $\alpha_1 = 55,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ ,  $t_{w1} = 200^\circ\text{С}$ ,  $t_{w2} = 187,7^\circ\text{С}$ .

**Задача 11** Знайти тепловий потік і температури поверхонь нагріву парового котла, якщо задані такі величини:

- температура димових газів  $t_{f1} = 1000^\circ\text{С}$ ;
- температура киплячої води  $t_{f2} = 150^\circ\text{С}$ ;
- коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до стінки  $\alpha_1 = 30 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С})$ ;
- коефіцієнт тепловіддачі від стіни до киплячої води  $\alpha_2 = 5000 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С})$ ;
- коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки  $\lambda = 50 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С})$ ;
- товщина стінки  $\delta = 10 \text{ мм}$ .

Розрахунок провести в одиницях системи СІ.

Відповідь:  $q = 28985 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ,  $t_{w1} = 160^\circ\text{С}$ ,  $t_{w2} = 155^\circ\text{С}$ .

**Задача 12.** Розв'язати задачу 11, якщо поверхня нагріву котла покрита сажею на боці димових газів (товщина шару  $\delta_1 = 1 \text{ мм}$ , коефіцієнт теплопровідності сажі  $\lambda_1 = 0,08 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С})$ ), а на сбоці киплячої води утворився шар накипу (товщина шару  $\delta_3 = 5 \text{ мм}$ ,  $\lambda_3 = 0,8 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{С})$ ).

Знайти тепловий потік крізь забруднену поверхню нагріву, обчислити температури на поверхнях стінки та на стиках шарів стінки, зобразити розподіл температур у стінці. Результати порівняти з відповіддю задачі 11. Розрахунок вести в одиницях системи СІ.

Відповідь:  $q = 18674 \text{ Вт}/\text{м}^2$ , що складає 64 % від теплового потоку чистої поверхні нагріву (див. відповідь до задачі 11),  $t_{w1} = 465^\circ\text{С}$ ,  $t_{w2} = 264^\circ\text{С}$ ,  $t_{w3} = 253^\circ\text{С}$ ,  $t_{w4} = 153^\circ\text{С}$ .

**Задача 13.** Визначити втрату тепла  $q$  крізь цегляну обмурівку котла, товщина якої дорівнює 250 мм, якщо температура димових газів  $t_{f1} = 600^\circ\text{С}$ , температура повітря в котельні  $t_{f2} = 30^\circ\text{С}$ , коефіцієнт тепловіддачі від димових газів до обмурівки  $\alpha_1 = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ , коефіцієнт тепловіддачі від обмурівки до повітря  $\alpha_2 = 9,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  та коефіцієнт теплопровідності цегли  $\lambda = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ .

Відповідь:  $q = 1122 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

**Задача 14.** Обмурівка печі виконана з шару вогнетривкої цегли (товщина  $\delta_1 = 250 \text{ мм}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_1 = 0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ) та шару червоної цегли (товщина  $\delta_2 = 250 \text{ мм}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2 = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ ).

Визначити втрати тепла  $q$  крізь обмурівку та температуру у площині контакту шарів, якщо температура газів у печі дорівнює  $1300^\circ\text{С}$ , температура повітря у приміщенні котельні -  $30^\circ\text{С}$ , коефіцієнт тепловіддачі від газів до обмурівки  $\alpha_1 = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ , коефіцієнт тепловіддачі від обмурівки до навколишнього повітря  $\alpha_2 = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

Відповідь:  $q = 1071 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ,  $t_{w2} = 505^\circ\text{С}$ .

**Задача 15.** Визначити втрату тепла з поверхні одного метра неізолюваного трубопроводу гарячого водопостачання, якщо його діаметр – 76 мм, товщина стінки - 3мм, коефіцієнт теплопровідності матеріалу труб  $50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ . Температура води -  $95^\circ\text{С}$ , зовнішня температура  $15^\circ\text{С}$ . Коефіцієнт тепловіддачі від води до стінки труби  $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$  і від труби до повітря  $15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ .

Відповідь:  $q_\ell = 308 \text{ Вт}$ .

**Задача 16.** Визначити за умовами попередньої задачі, у скільки разів зменшиться втрата тепла, якщо трубовід ізолювати шаром ізоляції завтовщини 20 мм. Коефіцієнт теплопровідності ізоляції -  $0,0975 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$ .

Відповідь:  $q_{\ell} = 120,3$  Вт, тепловтрати зменшаться у 2,56 разів.

**Задача 17.** Паропровід внутрішнім діаметром 200 мм має шар ізоляції завтовшки 100 мм. Товщина стінки пароводу - 6мм. Визначити температуру на внутрішній поверхні пароводу, якщо температура пари -  $250^{\circ}\text{C}$ , температура зовнішнього повітря  $30^{\circ}\text{C}$ , коефіцієнт теплопровідності ізоляції  $0,11$  Вт/(м  $\cdot^{\circ}\text{C}$ ), коефіцієнт тепловіддачі від пари до труби  $100$  Вт/(м<sup>2</sup>  $\cdot^{\circ}\text{C}$ ) і від ізоляції до зовнішнього повітря -  $9,5$  Вт/(м<sup>2</sup>  $\cdot^{\circ}\text{C}$ ). Визначити також лінійну щільність теплового потоку. Термічним опором стінки труби знехтувати.

Відповідь:  $q_{\ell} = 208$  Вт/м,  $t_{w1} = 247^{\circ}\text{C}$ .

### 3. ПАЛИВО ТА ЙОГО СПАЛЮВАННЯ

Зараз головним джерелом отримання енергії для побутових і технологічних потреб є паливо.

**Паливом** є речовина, що виділяє за певних умов велику кількість теплової енергії, яку залежно від технічних і економічних показників використовують у різних галузях народного господарства. У теплоенергетичних установках теплова енергія, що виділяється з палива, використовується для отримання робочого тіла – водної пари або гарячої води, які використовуються далі в технологічних і опалювальних установках, а також для виробництва електричної енергії.

#### 3.1 Елементарний склад палива

**Паливо** - це вуглецеві з'єднання, при згорянні яких виділяється велика кількість тепла.

До складу палива входять горючі (вуглець  $C$ , водень  $H$ , горюча сірка  $S$ ) та негорючі (кисень  $O$ , азот  $N$ , вологість  $W$ , зола  $A$ ) елементи. Склад палива може бути заданий робочою, сухою, горючою й органічною масами складників у відсотках на 1 кг маси палива.

**Робочим є паливо**, яке потрапляє до споживача (у котельню і т.д.). Відповідно маса речовин (у відсотках), з яких складається робоче паливо, становить **робочу масу**:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S_t^r + A^r + W^r = 100 \%. \quad (3.1)$$

Маса палива, у якому повністю відсутня вологість, є **сухою** та відображається рівнянням (у відсотках)

$$C^d + H^d + O^d + N^d + S_t^d + A^d = 100 \%. \quad (3.2)$$

Умовна маса палива, у якій відсутні вологість, зола та сульфатна сірка, є **горючою** та відображається рівнянням (у відсотках)

$$C^{daf} + H^{daf} + O^{daf} + N^{daf} + S_c^{daf} = 100 \%. \quad (3.3)$$

**Органічна маса** палива – це умовний склад палива без вмісту вологи та мінеральної маси, що відображається рівнянням (у відсотках):

$$C^o + H^o + O^o + N^o + S_o^o = 100 \%. \quad (3.4)$$

Вологість  $W^r$  і мінеральні домішки, які переходять при горінні у золу  $A^r$ , складають **баласт палива** ( $W^r + A^r$ ).

Перерахунок елементарного складу палива з однієї маси на іншу здійснюється за формулами типу:

$$C^r = C^{daf} \cdot K; \quad H^r = H^{daf} \cdot K \quad \text{і т.д.}, \quad (3.5)$$

де  $K$  – перевідний коефіцієнт.

Перевідні коефіцієнти для перерахунку елементарного складу палива з однієї маси на іншу наведені в таблиці 3.1.

**Теплотою згоряння палива** є кількість тепла, що виділяється при повному згорянні одиниці маси (1кг твердого або рідкого палива) або об'єму (1м<sup>3</sup> газоподібного палива). Прийняті такі одиниці вимірювання теплоти згоряння: кДж/кг (кДж/м<sup>3</sup>) або МДж/кг (МДж/м<sup>3</sup>). Теплота згоряння палива є найважливішою характеристикою робочої маси палива.

Розрізняють вищу та нижчу теплоту згоряння.

**Вища теплота згоряння** ( $Q_v^r$ ) - та, яка виділяється при повному згорянні 1кг твердого або рідкого палива або 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива за умови, що водна пара, яка утворюється при згорянні, конденсується та повертається як теплота конденсації (використовується в конденсаційних котлах).

**Нижча теплота згоряння** ( $Q_n^r$ ) та, яка виділяється при повному згорянні 1 кг твердого або рідкого палива або 1 м<sup>3</sup> газоподібного палива, але теплота конденсації при цьому не враховується (використовується у звичайних парових і водонагрівальних котлах, де продукти згоряння не охолоджуються до температури конденсації парів).

У практичних розрахунках частіше користуються нижчою теплотою згоряння палива. Співвідношення вищої та нижчої теплоти згоряння:

$$Q_v^r - Q_n^r = 224 H^r + 25W^r, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}. \quad (3.6)$$

Нижчу теплоту згоряння твердого та рідкого палива визначають за формулою

$$Q_n^r = 338C^r + 1025H^r - 108,5(O^r - S^r) - 25W^r, \text{ кДж/кг}. \quad (3.7)$$

Для газоподібного палива нижчу теплоту згоряння визначають за формулою

$$Q_n^d = 0,108H_2 + 0,126CO + 0,234H_2S + 0,358CH_4 + 0,638C_2H_6 + \\ + 0,913C_3H_8 + 1,187C_4H_{10} + 1,461C_5H_{12} + \\ + 0,591C_2H_4 + 0,86C_3H_6 + 1,135C_4H_8, \text{ МДж/м}^3. \quad (3.8)$$

Для складання норм витрат, планів потреб палива, порівняння теплової цінності різних видів палива користуються поняттям «умовне паливо».

**Умовне паливо** – це таке паливо, яке має постійну теплоту згоряння, що дорівнює 29,308МДж/кг (7000 ккал/кг).

Поняття умовного палива потрібне для розрахунків при заміні одного виду палива іншим. Перерахунок витрат натурального палива на умовне здійснюється за допомогою теплового еквівалента палива:

$$B_y = B_p \cdot \mathcal{E}, \text{ кг} \quad (3.9)$$

де  $B_y$  та  $B_p$  – витрати відповідно умовного та робочого палива, кг.

$\mathcal{E}$  – **тепловий еквівалент палива**, кг у.п./кг, який визначається як частка від ділення теплоти згоряння натурального палива на теплоту згоряння умовного палива:

$$\mathcal{E} = \frac{Q_n^r}{29,308}, \text{ якщо } Q_n^r \text{ в МДж/кг}, \quad (3.10)$$

$$\mathcal{E} = \frac{Q_n^r}{7000}, \text{ якщо } Q_n^r \text{ в ккал/кг}. \quad (3.11)$$

За допомогою вищенаведеного теоретичного матеріалу можна розв'язати наступні задачі.

Таблиця 3.1– Перевідні коефіцієнти для перерахунку складу палива

Задана маса палива	Маса палива, для якої робиться перерахунок			
	Робоча	Суха	Горюча	Органічна
Робоча	1	$\frac{100}{100-W^r}$	$\frac{100}{100-(A^r+W^r)}$	$\frac{100}{100-(S_t^r+A^r+W^r)}$
Суха	$\frac{100-W^r}{100}$	1	$\frac{100}{100-A^d}$	$\frac{100}{100-(S_t^r+A^d)}$
Горюча	$\frac{100-(A^r+W^r)}{100}$	$\frac{100-A^d}{100}$	1	$\frac{100}{100-S_c^{daf}}$
Органічна	$\frac{100-(S_t^r+A^r+W^r)}{100}$	$\frac{100-(S_t^d+A^d)}{100}$	$\frac{100-S_c^{daf}}{100}$	1

**Задача 1.** Визначити нижчу теплоту згоряння робочої маси палива наступного елементарного складу, який задано горючою масою:  $C^{daf} = 93,5\%$ ;  $H^{daf} = 1,8\%$ ;  $O^{daf} = 1,7\%$ ;  $N^{daf} = 1,0\%$ ;  $S_t^{daf} = 2\%$ ;  $A^r = 13,3\%$ ;  $W^r = 5\%$ .

Відповідь:  $Q_H^r = 27231$  кДж/кг.

**Задача 2.** Паливо задано елементарним составом горючої маси. Визначити коефіцієнт перерахунку на робочу масу, якщо відомі величини:

$$A^r = 18,2\% \text{ та } W^r = 32\% .$$

Відповідь:  $K = 0,498$ .

**Задача 3.** Визначити коефіцієнт перерахунку зольності з сухої маси на робочу, якщо задані такі величини:  $A^d = 13,5\%$  та  $W^r = 9,2\%$ .

Відповідь:  $K = 0,908$ .

**Задача 4.** Визначити робочий склад палива за відомим складом горючої маси:  $C^{daf} = 80,0\%$ ;  $H^{daf} = 5,6\%$ ;  $O^{daf} = 5,1\%$ ;  $N^{daf} = 1,2\%$ ;  $S_t^{daf} = 8,1\%$ ;  $A^d = 27,5\%$  та  $W^r = 4\%$ .

Відповідь:  $C^r = 55,68\%$ ;  $H^r = 3,9\%$ ;  $O^r = 3,55\%$ ;  $N^r = 0,83\%$ ;  $S_t^r = 5,64\%$  та  $A^r = 26,4\%$ .

**Задача 5.** Визначити нижчу теплоту згоряння робочої маси палива за заданим елементарним складом палива:  $C^r = 45,5\%$ ;  $H^r = 3,1\%$ ;  $O^r = 8,4\%$ ;  $N^r = 0,8\%$ ;  $S_t^r = 3,7\%$ ;  $A^r = 13,5\%$ ;  $W^r = 25\%$ .

Відповідь:  $Q_H^r = 17422$  кДж/кг.

**Задача 6.** Визначити нижчу теплоту згоряння хвойної деревини, якщо при вологості  $W^r = 45\%$  та зольності  $A^d = 1\%$  елементарний склад горючої маси характеризується такими величинами:

$$C^{daf} = 51\% ; H^{daf} = 6,15\% ; O^{daf} = 42,25\% ; N^{daf} = 0,6\% .$$

Відповідь:  $Q_H^r = 9188$  кДж/кг.

**Задача 7.** Визначити нижчу теплоту згоряння палива та вищу теплоту робочої маси, якщо відомий такий елементарний склад палива:  $C^r = 60,8\%$ ;  $H^r = 4,3\%$ ;  $O^r = 11,5\%$ ;  $N^r = 0,9\%$ ;  $S_t^r = 0,5\%$ ;  $A^r = 10\%$ ;  $W^r = 12\%$ .

Відповідь:  $Q_H^r = 23,5$  МДж/кг,  $Q_B^r = 24,7$  МДж/кг.



**Задача 8.** Визначити нижчу теплоту згоряння робочої маси мазуту такого елементарного складу:  $C^r = 85,3 \%$ ;  $H^r = 10,2 \%$ ;  $(O^r + N^r) = 0,7 \%$ ;  $O^r = 0,5 \%$ ;  $S^r_t = 0,5 \%$ ;  $A^r = 0,3 \%$ ;  $W^r = 3 \%$ .

Відповідь:  $Q^r_n = 39211$  кДж/кг.

**Задача 9.** Визначити теплоту згоряння сухого природного газу такого елементарного складу:  $C_2H_6 = 4,5 \%$ ;  $C_3H_8 = 1,7 \%$ ;  $H_2S = 1,0 \%$ ;  $CH_4 = 76,7\%$ ;  $CO_2 = 0,2 \%$ ;  $C_4H_{10} = 0,8 \%$ ;  $C_5H_{12} = 0,6\%$ ;  $N_2 = 14,5 \%$ .

Відповідь:  $Q^d_n = 33940$  кДж/м<sup>3</sup>.

**Задача 10.** Визначити теплоту згоряння сухого генераторного газу, яку отримали з донецького антрациту. Склад газу характеризується такими даними:  $H_2 = 13,5 \%$ ;  $CO = 27,5 \%$ ;  $H_2S = 0,2 \%$ ;  $CH_4 = 0,5 \%$ ;  $CO_2 = 5,5 \%$ ;  $O_2 = 0,2 \%$ ;  $N_2 = 52,6 \%$ .

Відповідь:  $Q^d_n = 5150$  кДж/м<sup>3</sup>.

**Задача 11.** Визначити теплоту згоряння сухого газоподібного палива такого об'ємного складу:  $CO_2 = 0,1 \%$ ;  $CH_4 = 97,9 \%$ ;  $C_2H_6 = 0,5 \%$ ;  $C_3H_8 = 0,2 \%$ ;  $C_4H_{10} = 0,1 \%$ ;  $N_2 = 1,3 \%$ .

Відповідь:  $Q^d_n = 35,67$  МДж/м<sup>3</sup>.

**Задача 12.** На електростанції за рік витратили  $2,0 \cdot 10^9$  кг натурального палива з нижчою теплотою згоряння робочої маси  $Q^r_n = 16750$  кДж/кг. Визначити річні витрати умовного палива на електростанції.

Відповідь:  $B_y = 1,144 \cdot 10^9$  кг у.п.

**Задача 13.** Визначити тепловий еквівалент природного газу, який має теплоту згоряння  $Q^d_n = 34000$  кДж/м<sup>3</sup>.

Відповідь:  $\mathcal{E} = 1,16$ .

**Задача 14.** Визначити тепловий еквівалент генераторного газу з теплотою згоряння  $Q^d_n = 5500$  кДж/м<sup>3</sup>.

Відповідь:  $\mathcal{E} = 0,188$ .

**Задача 15.** На складі електростанції створили запас бурого вугілля в кількості 25000т та антрацитового штибу в кількості 1500т. Елементарний склад бурого вугілля:  $C^r = 34,8 \%$ ;  $H^r = 2,4 \%$ ;  $O^r = 9,4 \%$ ;  $N^r = 0,7 \%$ ;  $S^r_t = 2,5 \%$ ;  $A^r = 18,2 \%$ ;  $W^r = 32 \%$

Елементарний склад антрацитового штибу:  $C^r = 71,4 \%$ ;  $H^r = 1,4 \%$ ;  $O^r = 1,4 \%$ ;  $N^r = 0,9 \%$ ;  $S^r_t = 1,5 \%$ ;  $A^r = 16,0 \%$ ;  $W^r = 7,4 \%$ .

Визначити сумарний запас палива на складі в тоннах умовного палива.

Відповідь:  $\sum B_y = 12125$  т.у.п.

**Задача 16** У котельні за добу спалюється 240т натурального палива з теплотою згоряння  $Q^r_n = 17200$  кДж/кг. Визначити годинні витрати в тоннах умовного палива.

Відповідь:  $B_y = 5,87$  т.у.п./год.

### 3.2 Процес горіння палива

**Горіння палива** – це хімічний процес з'єднання горючих речовин палива з киснем повітря, який супроводжується інтенсивним виділенням тепла. Горіння палива може бути повним або неповним.

Горіння буде повним, якщо воно здійснюється при достатній кількості окислювача та завершується повним окисленням горючих елементів палива. Газоподібні продукти згоряння при цьому складаються переважно з  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{N}_2$ .

При неповному згорянні у продуктах згоряння, крім перерахованих сполучень, міститься  $\text{CO}$ .

Теоретична кількість повітря, яке потрібне для згоряння 1 кг твердого або рідкого палива за нормальних умов, визначається за формулою:

$$L^o = \frac{2,67C^r + 8H^r + S_t^r - O^r}{100 \cdot 0,23}, \text{ кг повітря /кг палива.} \quad (3.12)$$

За нормальних умов густина повітря  $\rho_g = 1,293 \text{ кг/м}^3$ , тому об'ємні витрати повітря  $V^o$  для згоряння 1 кг палива визначаються за формулою:

$$V^o = \frac{L^o}{1,293}, \text{ м}^3 \text{ повітря /кг палива.} \quad (3.13)$$

Визначити теоретичний об'єм повітря для згоряння 1кг твердого або рідкого палива за нормальних умовах можна ще за такою формулою:

$$V^o = 0,089C^r + 0,266H^r + 0,033(S_t^r - O^r), \text{ м}^3 \text{ повітря/кг палива,} \quad (3.14)$$

де  $C^r$ ,  $H^r$ ,  $S_t^r$  та  $O^r$  – елементарний склад палива за робочою масою у відсотках.

Для газоподібного палива теоретичний об'єм повітря для згоряння  $1\text{м}^3$  сухого газу визначається за формулою:

$$V^o = 0,0478 [ 0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 1,5\text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \sum(m + n/4) \cdot C_m\text{H}_n - O_2 ], \text{ м}^3 \text{ повітря /м}^3 \text{ газу,} \quad (3.15)$$

де  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  і т.д. – уміст окремих газів у газоподібному паливі у відсотках;

$m$  – кількість атомів вуглецю;

$n$  – кількість атомів водню.

Дійсна кількість повітря, яка потрібна для згоряння палива, більша ніж теоретична. Число, яке показує наскільки дійсна кількість повітря відрізняється від теоретично потрібної, є **коефіцієнтом надлишку повітря** та визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{V_\partial}{V^o}. \quad (3.16)$$

Дійсний об'єм повітря  $V_\partial$  для згоряння палива визначається за формулою:

$$V_\partial = \alpha \cdot V^o. \quad (3.17)$$

Теоретичний об'єм продуктів згоряння (димових газів)  $V_G^o$ , що утворюються у процесі згоряння палива при  $\alpha = 1$  та теоретичного об'єму повітря визначається за формулою:

$$V_G^o = V_{C.G.}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (3.18)$$

де  $V_{C.G.}^o$  – теоретичний об'єм сухих газів,  $\text{м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3)$ ;

$V_{H_2O}^o$  – теоретичний об'єм водних парів у продуктах згоряння,  $\text{м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3)$ .

$$\text{При цьому} \quad V_{C.G.}^o = V_{RO_2} + V_{N_2}^o, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (3.19)$$

де  $V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}$  – об'єм сухих триатомних газів (діоксиду вуглецю та сірчистого газу);

$V_{N_2}^o$  – теоретичний об'єм азоту у продуктах згоряння.

Теоретичний об'єм продуктів згоряння можна визначити ще за загальною формулою:

$$V_{\Gamma}^o = V_{RO_2} + V_{N_2}^o + V_{H_2O}^o, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (3.20)$$

Об'єм сухих триатомних газів у продуктах згоряння при спалюванні твердого та рідкого палива визначається за формулою:

$$V_{RO_2} = 1,866 \frac{C^r + 0,375S_t^r}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.21)$$

Об'єм сухих триатомних газів у продуктах згоряння при спалюванні газоподібного палива визначається за формулою:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + CH_4 + 2C_2H_4), \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.22)$$

Теоретичний об'єм азоту у продуктах згоряння при спалюванні твердого та рідкого палива визначається за формулою:

$$V_{N_2}^o = 0,79V^o + 0,8 \frac{N^r}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.23)$$

Теоретичний об'єм азоту у продуктах згоряння при спалюванні газоподібного палива визначається за формулою:

$$V_{N_2}^o = 0,79V^o + \frac{N_2}{100}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (3.24)$$

Теоретичний об'єм водних парів у продуктах згоряння при спалюванні твердого та рідкого палива визначається за формулою:

$$V_{H_2O}^o = 0,111H^r + 0,0124W^r + 0,0161V^o, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (3.25)$$

Теоретичний об'єм водних парів у продуктах згоряння при спалюванні газоподібного палива визначається за формулою:

$$V_{H_2O}^o = 0,01(H_2S + H_2 + 2CH_4 + 2C_2H_4 + 0,124 d_2) + 0,0161V, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (3.26)$$

де  $d_2$  – вологовміст газоподібного палива,  $\text{г}/\text{м}^3$ .

Потрібно звертати увагу на кількість повітря, яка бере участь у процесі горіння. Якщо дійсний об'єм повітря більше ніж теоретичний ( $\alpha > 1$ ), то додаткова кількість повітря буде впливати на збільшення в об'ємі продуктів згоряння водних парів та двоатомних газів, а об'єм триатомних газів не змінюється.

Дійсний об'єм продуктів згоряння (димових газів) підраховується за формулою:

$$V_{\Gamma} = V_{C.\Gamma.} + V_{H_2O}, \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (3.27)$$

де  $V_{C.\Gamma.}$  – дійсний об'єм сухих газів у продуктах згоряння,  $\text{м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3)$ ;

$V_{H_2O}$  – дійсний об'єм водних парів у продуктах згоряння,  $\text{м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3)$ .

При цьому 
$$V_{C.G.} = V_{RO_2} + V_{R_2}, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3), \quad (3.28)$$

де  $V_{R_2}$  – дійсний об'єм двоатомних газів у продуктах згоряння,  $\text{м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3)$ , який визначається за формулою:

$$V_{R_2} = V_{N_2}^o + (\alpha - 1)V^o, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (3.29)$$

Дійсний об'єм водних парів у продуктах згоряння визначається за формулою:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^o + 0,0161(\alpha - 1)V^o, \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (3.30)$$

При атмосферному тиску та температурі повітря  $t$  об'єм газів визначається за формулою:

$$V_{\Gamma}^t = V_{\Gamma}(1 + \frac{t}{273}), \text{ м}^3/\text{кг}(\text{м}^3/\text{м}^3). \quad (3.31)$$

Кількість теплоти, яка міститься в повітрі або продуктах згоряння, є **ентальпією** (тепловмістом) **повітря** або **продуктів згоряння**.

Ентальпія продуктів згоряння  $I$  визначається як сума ентальпій газів  $I_{\Gamma}$  і повітря  $I_n$ .

Потрібно враховувати, що при збільшенні кількості повітря від теоретично потрібного для процесу згоряння палива до дійсного об'єму, збільшується й ентальпія продуктів згоряння.

Ентальпія теоретичного об'єму повітря для здійснення процесу спалювання будь-якого палива визначається за формулою:

$$I_n^o = V^o \cdot (c\vartheta)_n, \text{ кДж/м}^3, \quad (3.32)$$

де  $(c\vartheta)_n$  – ентальпія  $1\text{ м}^3$  повітря (див. табл. 3.2),  $\text{кДж/м}^3$ .

Ентальпія теоретичного об'єму продуктів згоряння визначається за формулою:

$$I_{\Gamma}^o = I_{C.G.}^o + I_{H_2O}^o, \text{ кДж/м}^3, \quad (3.33)$$

де  $I_{C.G.}^o$  – ентальпія теоретичного об'єму сухих газів у продуктах згоряння;

$I_{H_2O}^o$  – ентальпія теоретичного об'єму водних парів у продуктах згоряння.

Ентальпія теоретичного об'єму сухих газів у продуктах згоряння визначається за формулою:

$$I_{C.G.}^o = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^o \cdot (c\vartheta)_{N_2}, \text{ кДж/м}^3, \quad (3.34)$$

де  $(c\vartheta)_{RO_2}$  – ентальпія  $1\text{ м}^3$  триатомних газів (див. табл. 3.2),  $\text{кДж/м}^3$ ;

$(c\vartheta)_{N_2}$  – ентальпія  $1\text{ м}^3$  теоретичного об'єму азоту (див. табл. 3.2),  $\text{кДж/м}^3$ .

Ентальпія теоретичного об'єму водних парів у продуктах згоряння визначається за формулою:

$$I_{H_2O}^o = V_{H_2O}^o \cdot (c\vartheta)_{H_2O}, \text{ кДж/м}^3, \quad (3.35)$$

де  $(c\vartheta)_{H_2O}$  – ентальпія  $1\text{ м}^3$  водяних парів (див. табл. 3.2),  $\text{кДж/м}^3$ .

Визначити ентальпію теоретичного об'єму продуктів згорання (при  $\alpha = 1$ ) можна за загальною формулою:

$$I_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O}, \text{ кДж/м}^3. \quad (3.36)$$

Збільшення об'єму повітря до дійсного його значення ( $\alpha > 1$ ) змінює ентальпію повітря, яку можна обчислити за формулою:

$$I_n = (\alpha - 1)I_n^0, \text{ кДж/м}^3. \quad (3.37)$$

Ураховуючи це, ентальпія продуктів згорання при  $\alpha > 1$  визначається за формулою:

$$I_{\Gamma} = I_{\Gamma}^0 + I_n, \text{ кДж/м}^3. \quad (3.38)$$

Таблиця 3.2 – Ентальпії  $1\text{ м}^3$  повітря та  $1\text{ м}^3$  складових продуктів згорання

Температура $\vartheta, ^\circ\text{C}$	Ентальпії, кДж/м <sup>3</sup>				
	Триатомних газів ( $c\vartheta$ ) <sub>RO<sub>2</sub></sub>	Азоту ( $c\vartheta$ ) <sub>N<sub>2</sub></sub>	Кисню ( $c\vartheta$ ) <sub>O<sub>2</sub></sub>	Водяних парів ( $c\vartheta$ ) <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Повітря ( $c\vartheta$ ) <sub>n</sub>
100	170	130	132	151	133
200	359	261	268	305	267
300	561	393	408	464	404
400	774	528	553	628	543
500	999	666	701	797	686
600	1226	806	852	970	832
700	1466	949	1008	1151	982
800	1709	1096	1163	1340	1134
900	1957	1247	1323	1529	1285
1000	2209	1398	1482	1730	1440
1100	2465	1550	1642	1932	1600
1200	2726	1701	1806	2138	1760
1300	2986	1856	1970	2352	1919
1400	3251	2016	2133	2566	2083
1500	3515	2171	2301	2789	2247
1600	3780	2331	2469	3011	2411
1700	4049	2490	2637	3238	2574
1800	4317	2650	2805	3469	2738
1900	4586	2814	2978	3700	2906
2000	4859	2973	3150	3939	3074
2100	5132	3137	3318	4175	3242
2200	5405	3301	3494	4414	3410

За допомогою вищенаведеного теоретичного матеріалу можна розв'язати наступні задачі.

**Задача 17** Визначити об'єм і ентальпію продуктів згоряння на виході з топки, а також теоретичну та дійсну кількість повітря, яке потрібно подати для згоряння  $1\text{ м}^3$  природного газу такого складу:  $\text{CO}_2 = 0,2\%$ ;  $\text{CH}_4 = 97,9\%$ ;  $\text{N}_2 = 1,8\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_4 = 0,1\%$ . Вологовміст газу  $d_2 = 0$ . Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,1$ . Температура газів на виході з топки  $1000^\circ\text{C}$ .

Відповідь:  $V^o = 9,37\text{ м}^3$  повітря/  $\text{м}^3$  газу;  $V_o = 10,31\text{ м}^3$  повітря/  $\text{м}^3$  газу;  $V_{\Gamma} = 11,464\text{ м}^3/\text{м}^3$ ;  $I_{\Gamma} = 17,54 \cdot 10^3\text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ .

**Задача 18.** Визначити теоретично потрібну кількість повітря для згоряння  $1\text{ м}^3$  газу, склад якого такий:  $\text{CO}_2 = 0,1\%$ ;  $\text{CH}_4 = 97,9\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,5\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,2\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 1,3\%$ .

Відповідь:  $V^o = 9,5\text{ м}^3$  повітря/  $\text{м}^3$  газу.

**Задача 19.** Визначити теоретично потрібну та дійсну кількість повітря для згоряння антрациту такого елементарного складу:  $\text{W}^r = 5\%$ ;  $\text{A}^r = 13,3\%$ ;  $\text{S}_t^r = 1,7\%$ ;  $\text{C}^r = 76,4\%$ ;  $\text{H}^r = 1,5\%$ ;  $\text{N}^r = 0,8\%$ ;  $\text{O}^r = 1,3\%$ . Коефіцієнт  $\alpha = 1,2$ .

Відповідь:  $V^o = 7,2\text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_o = 8,65\text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 20.** Визначити теоретичну кількість повітря, яка потрібна для згоряння палива такого елементарного складу:  $\text{W}^r = 13\%$ ;  $\text{A}^r = 10,4\%$ ;  $\text{S}_t^r = 0,6\%$ ;  $\text{C}^r = 67,9\%$ ;  $\text{H}^r = 4,8\%$ ;  $\text{N}^r = 1,9\%$ ;  $\text{O}^r = 1,4\%$ .

Відповідь:  $V^o = 7,29\text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 21.** Визначити дійсну кількість повітря для згоряння  $1\text{ м}^3$  газу, якщо коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,1$ , а теоретично потрібна кількість повітря  $V^o = 9,51\text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Відповідь:  $V_o = 10,461\text{ м}^3/\text{м}^3$ .

**Задача 22.** Визначити теоретично потрібну кількість повітря для згоряння  $1\text{ м}^3$  газу такого складу:  $\text{CO}_2 = 0,3\%$ ;  $\text{O}_2 = 0,2\%$ ;  $\text{CH}_4 = 89,9\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,1\%$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,9\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4\%$ ;  $\text{N}_2 = 5,2\%$ .

Відповідь:  $V^o = 9,44\text{ м}^3/\text{м}^3$ .

**Задача 23.** Визначити дійсну кількість повітря для згоряння  $1\text{ м}^3$  газу такого складу:  $\text{CH}_4 = 92,2\%$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,8\%$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,1\%$ ;  $\text{N}_2 = 6,9\%$ . Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha = 1,1$ .

Відповідь:  $V_o = 9,88\text{ м}^3/\text{м}^3$ .

**Задача 24.** Визначити дійсну кількість повітря для згоряння  $1\text{ м}^3$  газу, якщо відомі:  $V^o = 9,0\text{ м}^3/\text{м}^3$  та  $\alpha = 1,15$ .

Відповідь:  $V_o = 10,35\text{ м}^3/\text{м}^3$ .

**Задача 25.** Визначити об'єм сухих газів та об'єм водяних парів при згорянні палива такого елементарного складу:  $\text{W}^r = 26\%$ ;  $\text{A}^r = 17\%$ ;  $\text{S}_t^r = 0,6\%$ ;  $\text{C}^r = 41,9\%$ ;  $\text{H}^r = 2,7\%$ ;  $\text{N}^r = 0,5\%$ ;  $\text{O}^r = 11,3\%$ . Коефіцієнт надлишку повітря прийняти рівний  $\alpha = 1,25$ .

Відповідь:  $V_{C,\Gamma} = 5,056\text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,692\text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 26.** Визначити об'єм сухих газів та об'єм водяних парів при  $\alpha = 1$  для палива, яке має такий елементарний склад:  $\text{W}^r = 37\%$ ;  $\text{A}^r = 9,5\%$ ;  $\text{S}_t^r = 0,2\%$ ;  $\text{C}^r = 37,8\%$ ;  $\text{H}^r = 2,3\%$ ;  $\text{N}^r = 0,5\%$ ;  $\text{O}^r = 12,7\%$ .

Відповідь:  $V_{C.F.}^o = 3,523 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $V_{H_2O}^o = 0,77 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 27.** Теоретично потрібна кількість повітря для згоряння 1кг палива за нормальних умов дорівнює  $V^o = 9,35 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Визначити дійсний об'єм повітря при коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha = 1,15$  та температурі повітря  $25^\circ \text{C}$ .

Відповідь:  $V_{\partial}^t = 11,73 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

### 3.3 Топкове обладнання

За призначенням топкове обладнання поділяють на теплове, силове та технологічне.

**Теплове топкове обладнання** – це обладнання, у якому здійснюється перетворення хімічної енергії палива на фізичну теплоту високотемпературних газів для подальшого передавання теплоти цих газів крізь поверхні нагріву котла воді або парі.

Вони, у свою чергу, поділяються на шарові, призначені для спалювання твердого палива, та камерні – для спалювання рідкого та газоподібного палива.

**Технологічне топкове обладнання** – це обладнання, у якому спалювання палива поєднується з використанням в елементах котла тепла, що виділяється.

**Силові топкові обладнання** – це обладнання, у якому здійснюється отримання продуктів згоряння не лише з високою температурою, а й з підвищеним тиском.

Топкове обладнання для спалювання твердого палива в шарі поділяється на топки з щільним шаром і топки з киплячим шаром.

Колосникова решітка в топці потрібна для підтримки твердого палива.

Площа колосникової решітки, на якій здійснюється спалювання палива, є **активною її частиною**. Цей майданчик є також **дзеркалом горіння**, тому що на ньому здійснюється горіння палива від стадії запалювання до вигорання коксу.

Основними тепловими характеристиками шарових топок є теплова напруга дзеркала горіння та теплова напруга топкового об'єму.

**Теплова напруга дзеркала горіння**,  $\text{кВт}/\text{м}^2$ , – це та кількість теплоти, яка може виділятися паливом при згорянні на кожному квадратному метрі колосникової решітки за одну годину.

**Питома теплова напруга дзеркала горіння** (теплова напруга дзеркала горіння віднесена до площі колосникової решітки) визначається за формулою:

$$q_{\text{дз.г.}} = \frac{Q}{R} = \frac{B \cdot Q_H^r}{R}, \text{ кВт}/\text{м}^2, \quad (3.39)$$

де  $B$  – витрати палива,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$Q_H^r$  – нижча теплота згоряння палива,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;

$R$  – площа колосникової решітки,  $\text{м}^2$ .

**Теплова напруга топкового об'єму** – це кількість теплоти, яка виділяється у топці при спалюванні палива протягом 1 години на кожен  $1\text{ м}^3$  її об'єму.

**Питома теплова напруга топкового об'єму** (теплова напруга віднесена до об'єму топки) обчислюється за формулою:

$$q_{m.o.} = \frac{Q}{V_m} = \frac{B \cdot Q_n^r}{V_m}, \text{ кВт/м}^3, \quad (3.40)$$

де  $V_m$  – об'єм топочного простору, м<sup>3</sup>.

За допомогою вищенаведеного теоретичного матеріалу можна розв'язати наступні задачі.

**Задача 28.** У топці парового котла з шаровим спалюванням палива на ланцюговій решітці витрачається 6500 кг/год палива з нижчою теплотою згоряння  $Q_n^r = 10700$  кДж/кг. Визначити активну площу ланцюгової решітки та об'єм топкової камери, якщо допустима теплова напруга дзеркала горіння  $q_{дз.г.} = \frac{Q}{R} = 1167$  кВт/м<sup>2</sup>; напруга топкового простору  $q_{m.o.} = \frac{Q}{V_m} = 293$  кВт/м<sup>3</sup>.

Відповідь:  $R = 16,6$  м<sup>2</sup>,  $V_m = 66$  м<sup>3</sup>.

**Задача 29.** У топці парового котла спалюється 6000 кг/год палива з нижчою теплотою згоряння  $Q_n^r = 21000$  кДж/кг. Визначити питому теплову напругу дзеркала горіння та топкового об'єму, якщо  $R = 33,1$  м<sup>2</sup>,  $V_m = 130$  м<sup>3</sup>.

Відповідь:  $q_{дз.г.} = \frac{Q}{R} = 1057$  кВт/м<sup>2</sup>;  $q_{m.o.} = \frac{Q}{V_m} = 270$  кВт/м<sup>3</sup>.

**Задача 30.** Визначити, яка кількість палива за годину може бути спалена на колосниковій решітці площею 26,2 м<sup>2</sup>, якщо  $Q_n^r = 12000$  кДж/кг, а допустима теплова напруга дзеркала горіння  $q_{дз.г.} = \frac{Q}{R} = 930$  кВт/м<sup>2</sup>.

Відповідь:  $B = 7300$  кг/год.

## 4 КОТЕЛЬНІ УСТАНОВКИ

Комплекс обладнання, який розташований у спеціальному приміщенні та призначений для отримання теплової енергії у вигляді пари або гарячої води, називається **котельною установкою**.

За призначенням їх поділяють на опалювальні, виробничі, виробничо-опалювальні й енергетичні, а за масштабами обслуговування – на індивідуальні (місцеві), групові, квартальні та районні.

Котельні установки складаються з котлоагрегатів і допоміжного устаткування. У свою чергу, котлоагрегат складається з топкового обладнання, котла, пароперегрівника, водного економайзера, повітрянагрівача, арматури, гарнітури, каркаса й обмурівки.

### 4.1 Тепловий баланс і ККД котельного агрегата

Співвідношення, що пов'язує надходження та витрати теплоти в теплогенераторі, складає його тепловий баланс. **Тепловим балансом котельної установки** є розподіл теплоти, яка вноситься до котлоагрегата при спалюванні палива (частина, що надходить), на корисно витрачену теплоту та теплові втрати (витратна частина).



Якщо прийняти кількість тепла, що надходить до топки, рівною теплоті згоряння 1кг (1м<sup>3</sup>) палива, тоді рівняння теплового балансу котельного агрегата можна записати в такому вигляді:

$$Q_H^r = Q_1 + \sum Q_{втр}, \text{ кДж/кг (кДж/м}^3\text{)}, \quad (4.1)$$

де  $Q_H^r$  – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_1$  – тепло, що корисно використане (на отримання пари або гарячої води), кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>);

$\sum Q_{втр}$  – сума всіх теплових втрат у котельному агрегаті, кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>).

Теплові втрати в котельному агрегаті визначаються, як сума:

$$\sum Q_{втр} = Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \text{ кДж/кг( кДж/м}^3\text{)}, \quad (4.2)$$

де  $Q_2$  – утрати тепла з відхідними газами, кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_3$  – утрати тепла від хімічної неповноти згоряння, кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_4$  – утрати тепла від механічної неповноти згоряння, кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>);

$Q_5$  – утрати тепла до навколишнього середовища, кДж/кг( кДж/м<sup>3</sup>).

Теплові втрати можуть бути віднесені до теплоти згоряння 1кг (1м<sup>3</sup>) палива, що спалюється, і тоді рівняння теплового балансу матиме вигляд:

$$I = q_1 + \sum q_{втр}. \quad (4.3)$$

А сумарні теплові втрати у відносних значеннях можна визначити за рівнянням:

$$\sum q_{втр} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5, \quad (4.4)$$

де  $q_1 = \frac{Q_1}{Q_H^r}$  – корисно використана теплота;

$q_2 = \frac{Q_2}{Q_H^r}$  – утрати тепла з відхідними газами;

$q_3 = \frac{Q_3}{Q_H^r}$  – утрати тепла від хімічної неповноти згоряння;

$q_4 = \frac{Q_4}{Q_H^r}$  – утрати тепла від механічної неповноти згоряння;

$q_5 = \frac{Q_5}{Q_H^r}$  – утрати тепла до навколишнього середовища.

Або у відсотках рівняння теплового балансу буде мати такий вигляд:

$$100 \% = q_1 + \sum q_{втр}, \quad (4.5)$$

де  $q_1 = \frac{Q_1}{Q_H^r} \cdot 100\%$  – корисно використана теплота;

$q_2 = \frac{Q_2}{Q_H^r} \cdot 100\%$  – утрати тепла з відхідними газами;

$q_3 = \frac{Q_3}{Q_H^r} \cdot 100\%$  – утрати тепла від хімічної неповноти згоряння;

$q_4 = \frac{Q_4}{Q_H^r} \cdot 100\%$  – утрати тепла від механічної неповноти згоряння;

$q_5 = \frac{Q_5}{Q_H^r} \cdot 100\%$  – утрати тепла до навколишнього середовища.

Корисно використане тепло палива в котельному агрегаті можна визначати двома способами:

1) як різницю між теплом палива та сумою всіх утрат тепла:

$$Q_1 = Q_H^r - \sum Q_{втр}, \text{ кДж/кг}; \quad (4.6)$$

2) за рівнянням теплового балансу:

$$B_{год} \cdot Q_1 = D_{год} \cdot (i_{n.n} - i_{жв}), \text{ кДж/кг}, \quad (4.7)$$

звідки 
$$Q_1 = \frac{D_{год} (i_{n.n} - i_{жв})}{B_{год}}, \text{ кДж/кг}, \quad (4.8)$$

де  $B_{год}$  – годинні витрати палива, кг/год;

$D_{год}$  – годинна кількість отриманої пари, кг/год;

$i_{n.n}$  – ентальпія пари, кДж/кг;

$i_{жв}$  – ентальпія живильної води, кДж/кг.

Ентальпію пари, живильної води, повітря, відхідних газів можна підрахувати як добуток середньої теплоємності ( $c$ ) та температури ( $t$ ) за формулами

$$i_{n.n} = c_{n.n} \cdot t_{n.n}, \text{ кДж/кг}; \quad (4.9)$$

$$i_{ж.в} = c_{ж.в} \cdot t_{ж.в}, \text{ кДж/кг}; \quad (4.10)$$

$$i_n = c_n \cdot t_n, \text{ кДж/м}^3; \quad (4.11)$$

$$i_{відх.г} = c_{відх.г} \cdot t_{відх.г}, \text{ кДж/м}^3, \quad (4.12)$$

де  $c_{n.n}$  – середня масова теплоємність пари при  $t_{n.n}$ , кДж/(кг $\cdot$ °С);

$c_{ж.в}$  – середня масова теплоємність живильної води при  $t_{ж.в}$ , кДж/(кг $\cdot$ °С);

$c_n$  – середня об'ємна теплоємність повітря, при  $t_n$ , кДж/(м $^3$  $\cdot$ °С);

$c_{відх.г}$  – середня об'ємна теплоємність відхідних газів при  $t_{відх.г}$ , кДж/(м $^3$  $\cdot$ °С);

$t_{nn}$  – температура пари, °С;

$t_{ж.в}$  – температура живильної води, °С;

$t_n$  – температура повітря у котельні, °С;

$t_{відх.г}$  – температура димових газів на виході з останнього газоходу котла.

Середню теплоємність перегрітої пари можна визначити за номограмою в додатку Б. Середню масову теплоємність живильної води можна для розрахунків приймати рівною 4,19 кДж/(кг $\cdot$ °С).

**Коефіцієнт корисної дії котельного агрегата (ККД)** – це відношення корисної теплоти до витраченого тепла палива:

$$\eta_{к.а.} = \frac{Q_1}{Q_H^r} \cdot 100\%. \quad (4.13)$$

Або його можна отримати за рівнянням теплового балансу:

$$\eta_{к.а.} = q_1 = 100 - \sum q_{втр}, \%. \quad (4.14)$$

Якщо відома паропроодуктивність котельного агрегата, параметри пари та живильної води, тоді ККД котельного агрегата можна визначити за виразом:

$$\eta_{к.а.} = \frac{D_{год} \cdot (i_n - i_{жв})}{B_{год} \cdot Q_H^r} \cdot 100\%. \quad (4.15)$$

Утрати тепла з відхідними газами  $Q_2$  визначаються як різниця між ентальпією відхідних газів та ентальпією повітря, яке бере участь у процесі горіння та потрапляє через нещільності обмурівки котла:

$$Q_2 = V_{\text{відх.г.}} \cdot i_{\text{відх.г.}} - \alpha_{\text{відх.г.}} \cdot V^0 \cdot i_n, \text{ кДж/кг}, \quad (4.16)$$

де  $V_{\text{відх.г.}}$  – об'єм димових газів на виході з останнього газоходу котла, м<sup>3</sup>/кг;  
 $i_{\text{відх.г.}}$  – ентальпія відхідних газів, кДж/м<sup>3</sup>;  
 $\alpha_{\text{відх.г.}}$  – коефіцієнт надлишку повітря на виході з котлоагрегата;  
 $V^0$  – теоретична кількість повітря для спалювання 1 кг палива, м<sup>3</sup>/кг(м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>);  
 $i_n$  – ентальпія повітря, кДж/м<sup>3</sup>;  
 $t_n$  – температура повітря в котельні, °С.

Якщо втрати тепла з відхідними газами визначаються з урахуванням поправки на механічний недопал палива, тоді підрахунок потрібно вести за формулою:

$$q_2 = \frac{Q_2(100 - q_4)}{Q_H^r}. \quad (4.17)$$

Утрати тепла від хімічної неповноти згоряння палива підраховують за формулою:

$$Q_3 = 237K^r \frac{CO}{RO_2 + CO}, \text{ кДж/кг}, \quad (4.18)$$

де  $K^r$  – зведений вміст вуглецю в паливі, що визначається за формулою (3.19);  
 $CO$  – вміст окису вуглецю у відхідних газах, %;  
 $RO_2$  – вміст ( $CO_2 + SO_2$ ) у відхідних газах, %.

Зведений вміст вуглецю в паливі можна підрахувати за формулою:

$$K^r = C^r + 0,375S_t^r. \quad (4.19)$$

Утрати тепла від механічного недопалу  $Q_4$  зумовлені тим, що окремі частинки палива повністю не згоряють у топковому просторі, та підраховуються за формулою:

$$Q_4 = Q_4^{\text{шл}} + Q_4^{\text{пр}} + Q_4^{\text{вин}}, \text{ кДж/кг}, \quad (4.20)$$

де  $Q_4^{\text{шл}}$  – утрати тепла зі шлаком, кДж/кг;  
 $Q_4^{\text{пр}}$  – утрати з провалом палива, кДж/кг;  
 $Q_4^{\text{вин}}$  – утрати з виносом часток палива в газоходи котла, кДж/кг.

Втрати тепла в навколишнє середовище  $Q_5$  є наслідком тепловіддачі зовнішніх поверхонь обмурівки та металевих частин котлоагрегата, які мають більш високу температуру, ніж температура навколишнього середовища.

У розрахунках утрати тепла у навколишнє середовище  $Q_5$  приймаються за нормативними даними, а при проведенні іспитів котельних агрегатів визначаються з рівняння теплового балансу:

$$Q_5 = Q_H^r - (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4), \text{ кДж/кг}. \quad (4.21)$$

За допомогою вище наведеного теоретичного матеріалу можна вирішити наступні задачі.

**Задача 1.** Скласти тепловий баланс, підрахувати ККД і витрати палива для котельного агрегата з такими вихідними даними:

- паропродуктивність котла  $D_{\text{год}} = 230$  т/год;
- тиск пари в барабані котла  $P_k = 10$  кгс/см<sup>2</sup>;
- температура перегрітої пари  $t_{\text{пр}} = 400^\circ\text{C}$ ;
- температура живильної води  $t_{\text{жв}} = 115^\circ\text{C}$ ;

– паливо Донецького басейну з теплою згоряння  $Q_H^r = 15300$  кДж/кг, спалюється в камерній топці в пиловидному стані.

Теоретично потрібна кількість повітря для згоряння 1кг палива  $V^o = 4,15 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Коефіцієнт надлишку повітря на виході з останнього газоходу котла  $\alpha_{\text{відх.г}} = 1,39$ . Об'єм газів на виході з останнього газоходу  $V_{\text{відх.г}} = 6,06 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Температура відхідних газів  $t_{\text{відх.г}} = 160^\circ \text{C}$ .

Середня об'ємна теплоємність продуктів згоряння при  $t_{\text{відх.г}}$  складає  $c_{\text{відх.г}} = 1,415$  кДж/( $\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}$ ). Температура повітря в котельні  $30^\circ \text{C}$ . Об'ємна теплоємність повітря  $1,297$  кДж/( $\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}$ ).

Утрати тепла від хімічної неповноти згоряння  $q_3 = 0,5\%$ , втрати тепла від механічного недопалу  $q_4 = 2,5\%$ , утрати тепла в навколишнє середовище  $q_5 = 0,5\%$ .

Відповідь:  $\eta_{\text{к.а.}} = 89,2\%$ ,  $B_{\text{зод}} = 42170$  кг/год.

**Задача 2.** За умовами попередньої задачі визначити, як підвищиться втрата тепла з відхідними газами, якщо температура відхідних газів підвищиться до  $200^\circ \text{C}$ .

Відповідь:  $q_2 = 9,5\%$ .

**Задача 3.** За умовами задачі 1 визначити розрахункові витрати палива з урахуванням поправки на механічний недопал  $(1 - \frac{q_4}{100})$ .

Відповідь:  $B_p = 40660$  кг/год.

**Задача 4** Визначити сумарні втрати тепла за 1 годину роботи котельного агрегата (паропродуктивність  $D_{\text{зод}} = 640$  т/год) при спалюванні  $166$  т/год палива з теплою згоряння  $13500$  кДж/кг, якщо ККД котла дорівнює  $\eta_{\text{к.а.}} = 91,2\%$ .

Відповідь:  $\sum Q_{\text{втр}} = 197,208$  МДж/год.

**Задача 5.** За умовами задачі 4 визначити годинні витрати палива, яке потрібне буде для покриття сумарних теплових втрат котельного агрегата.

Відповідь:  $B_{\text{втр}} = 14,608$  т/год.

**Задача 6.** Визначити втрати тепла з відхідними газами за такими даними:

- теплота згоряння палива  $Q_H^r = 33000$  кДж/кг;
- об'єм теоретично потрібного повітря  $V^o = 9,32 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha_{\text{відх.г}} = 1,28$ ;
- об'єм відхідних газів  $V_{\text{відх.г}} = 13,11 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ;
- температура відхідних газів  $t_{\text{відх.г}} = 190^\circ \text{C}$ ;
- теплоємність відхідних газів при  $t_{\text{відх.г}}$  -  $c_{\text{відх.г}} = 1,365$  кДж/( $\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}$ );
- температура повітря  $t_n = 30^\circ \text{C}$ ;
- теплоємність повітря  $c_n = 1,297$  кДж/( $\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C}$ ).

Відповідь:  $q_2 = 9\%$ .

**Задача 7.** За проведеним аналізом визначено, що вміст окису вуглецю  $\text{CO}$  у відхідних газах дорівнює  $0,53\%$ , вміст триатомних газів  $\text{RO}_2 = 10,53\%$ . Визначити втрати тепла від хімічного недопалу палива, якщо нижча теплота згоряння палива  $Q_H^r = 26000$  кДж/кг, вміст у паливі вуглецю  $C^r = 72,47\%$ , сірки  $S_t^r = 1,54\%$ .

Відповідь:  $Q_3 = 830$  кДж/кг,  $q_3 = 3,19\%$ .

**Задача 8.** Визначити втрати тепла від механічного недопалу, якщо за цими випробуваннями відомі такі величини:

- утрати тепла зі шлаком  $Q_{4}^{шл} = 125$  кДж/кг;
- утрати з провалом палива  $Q_{4}^{пр} = 200$  кДж/кг ;
- утрати з виносом часток палива у газоходи котла  $Q_{4}^{вн} = 150$  кДж/кг.
- Теплоота згоряння палива  $Q_{H}^{r} = 25000$  кДж/кг.

Відповідь:  $q_4 = 1,9$  % .

**Задача 9.** Визначити втрати тепла в навколишнє середовище, якщо  $q_2 = 6$  %,  $q_3 = 0,5$  %,  $q_4 = 2,0$  % та  $\eta_{к.а.} = 90,5$  %.

Відповідь:  $q_5 = 1,0$  %.

**Задача 10.** Втрати тепла в навколишнє середовище дорівнюють  $q_5 = 1,0$  %, теплоота згоряння палива  $Q_{H}^{r} = 22000$  кДж/кг. Визначити втрати тепла в навколишнє середовище за одну годину праці котла, якщо витрати палива складають  $B_{год} = 10$  т/год.

Відповідь:  $Q_{5год} = 2,2$  ГДж/год.

#### 4.2 Витрати палива. Випарна здатність палива

Розрахункова формула для визначення витрати палива:

$$B_{год} = \frac{D_{год}(i_{н.п} - i_{жсв}) \cdot 100}{Q_{H}^{r} \cdot \eta_{к.а.}}, \text{ кг/ГОД.} \quad (4.22)$$

Витрату умовного палива на вироблення теплоти на ТЕЦ або в районній котельні визначити можна за формулою:

$$B_{у.п.} = b_{у.п.} \cdot Q, \text{ кг,} \quad (4.23)$$

де  $Q$  – кількість відпущеної споживачам теплоти, ГДж;

$b_{у.п.}$  – питомі витрати умовного палива на вироблення теплоти, кг/ГДж.

Питомі витрати умовного палива на вироблення теплоти на ТЕЦ або в районній котельні без урахування втрат теплоти в внутрішніх комунікаціях обличуються за формулою:

$$b_{у.п.} = \frac{10^6}{29300 \cdot \eta_{к}} = \frac{34,1}{\eta_{к}}, \text{ кг/ГДж,} \quad (4.24)$$

де  $\eta_{к}$  – ККД котельні ТЕЦ або районної котельні.

Відношення годинної паровидатності котельної установки до годинної витрати палива є **випарною здатністю палива**:

$$BЗ = \frac{D_{год}}{B_{год}}, \text{ кг пари/кг палива.} \quad (4.25)$$

Якщо відомі нижча теплоота згоряння палива  $Q_{H}^{r}$  та ККД котлоагрегата  $\eta_{к.а.}$ , то випарна здатність може бути визначена за формулою:

$$BЗ = \frac{Q_{H}^{r} \cdot \eta_{к.а.}}{i_{н.п} - i_{жсв}}, \text{ кг пари/ кг палива.} \quad (4.26)$$

За допомогою вищенаведеного теоретичного матеріалу можна розв'язати наступні задачі.

**Задача 11.** Визначити витрати палива котельного агрегата:

паропродуктивністю  $D_{zod} = 500$  т/год, якщо тиск пари, що виробляється,  $p_k = 14$  кгс/см<sup>2</sup> та її температура  $t_n = 400^\circ$  С, температура живильної води  $t_{жв} = 230^\circ$  С, ККД котлоагрегата  $\eta_{к.а} = 92,8$  % , нижча теплота згоряння палива  $Q_H^r = 19500$  кДж/кг.

Відповідь:  $B_{zod} = 66,15$  т/год.

**Задача 12.** Визначити витрати газоподібного палива котельного агрегата, якщо відомі такі величини:

- годинна паропродуктивність  $D_{zod} = 15$  т/год;
- витрати тепла на отримання одного кілограма пари  $(i_{nn} - i_{жв}) = 2380$  кДж/кг;
- нижча теплота згоряння палива  $Q_H^r = 35800$  кДж/м<sup>3</sup>;
- ККД котлоагрегата  $\eta_{к.а} = 90,7$  % .

Відповідь:  $B_{zod} = 1100$  м<sup>3</sup>/год.

**Задача 13.** Визначити витрати палива котельного агрегата за умовами задачі 12, якщо ККД котлоагрегата зміниться до величини  $\eta_{к.а} = 85$  % .

Відповідь:  $B_{zod} = 1173$  м<sup>3</sup>/год.

**Задача 14.** Визначити, як зміняться витрати палива після раціоналізації котельні, якщо ККД котлів збільшився з 0,83 до 0,86, а якість палива та його кількість, продуктивність котельні та параметри пари не змінилися.

Відповідь: Витрати палива зменшаться на 3,5 % .

**Задача 15.** На теплопостачання району від місцевих котелень витрачається  $B_m = 50 \cdot 10^3$  т/рік палива. Обчислити на скільки тон скоротяться витрати палива за рік при переході на теплопостачання від центральної котельні, якщо середньо-зважений ККД котельні збільшився з  $\eta_m = 0,65$  до  $\eta_u = 0,85$ , а теплове навантаження залишилося без зміни.

Відповідь:  $\Delta B_{рік} = 11,76 \cdot 10^3$  т/рік.

**Задача 16.** У топці котельного агрегата паропродуктивністю  $D_{zod} = 6,5$  т/год спалюється  $B_{zod} = 1300$  кг/год палива з теплою згоряння  $Q_H^r = 15500$  кДж/кг. Тиск пари, що виробляється котлоагрегатом  $p_{nn} = 14$  кгс/см<sup>2</sup>, а температура  $t_{nn} = 300^\circ$  С. Температура живильної води  $104^\circ$  С. Визначити ККД котлоагрегата.

Відповідь:  $\eta_{к.а} = 84$  % .

**Задача 17.** Визначити ККД котла, якщо розрахунком визначили, що сума втрат тепла становить  $\Delta q_{втр} = 9$  % .

Відповідь:  $\eta_{к.а} = 91$  % .

**Задача 18.** На пром підприємстві були проведені спеціальні роботи й організовано використання теплоти відпрацьованої пари молотів і пресів на потреби опалення та гарячого водопостачання в кількості  $Q = 10^6$  ГДж/рік. До реконструкції підприємства вказані потреби забезпечувались промисловою котельною установкою з ККД  $\eta_k = 0,85$ . Визначити економію умовного палива від використання теплоти вказаних вторинних енергоресурсів.

Відповідь:  $\Delta b = 40,1$  кг/ГДж,  $\Delta B = 40100$  т/рік.

**Задача 19.** Район міста з річним корисним споживанням теплоти у вигляді води  $Q_n = 10 \cdot 10^6$  ГДж/рік від індивідуальних котелень з ККД  $\eta_{к.і} = 0,6$  намічається перевести на теплопостачання від районних котелень з ККД  $\eta_{к.р} = 0,8$  при ККД теплових мереж  $\eta_{т.м} = 0,95$ .

Визначити абсолютну річну, відносну (відносно до витрат палива в індивідуальних котельнях) і питому (на одиницю теплоти, яка виробляється в районній котельні) економію умовного палива.

Відповідь:  $\Delta B = 135 \cdot 10^6$  кг/рік,  $\frac{\Delta B}{B_i} = 0,25$ ,  $\frac{\Delta B}{Q_p} = 13,5$  кг/ГДж.

**Задача 20.** Визначити випарну здатність палива з нижчою теплотою згорання  $Q_H^r = 12000$  кДж/кг, якщо ентальпія котлової пари  $i_m = 3040$  кДж/кг, температура живильної води  $80^\circ\text{C}$ , а ККД котла  $\eta_{ка} = 0,87$ .

Відповідь:  $BЗ = 3,86$  кг/кг.

**Задача 21.** Для умов задачі 20 визначити випарну здатність палива, якщо  $Q_H^r = 29,3$  МДж/кг.

Відповідь:  $BЗ = 9,42$  кг/кг.

**Задача 22.** Визначити витрати палива котельним агрегатом паропродуктивністю  $D_{год} = 20$  т/год, якщо випарна здатність палива  $BЗ = 8$  кг/кг.

Відповідь:  $B_{год} = 2500$  кг/год.

### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Эстеркин Р. И. Котельные установки. Курсовое и дипломное проектирование / Р. И. Эстеркин.. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Тепловой расчёт промышленных парогенераторов/Под ред. В.И.Частухина. - К.: Вища школа, 1980.
3. Делягин Г. Н., Лебедев В. И., Пермяков Б. А. Теплогенерирующие установки / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. – М.: Стройиздат, 1986.
4. Роддатис К. Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности./ К. Ф. Роддатис, А. Н. Полтарецкий. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Ерохин В. Г., Мананько М. Г. Сборник задач по основам теплотехники и гидравлики/ В. Г. Ерохин, М. Г. Мананько. – М.: Энергия, 1972.
6. Вергазов В. С. Устройство и эксплуатация котлов. / В. С. Вергазов. – М.: Стройиздат, 1991.
7. СНиП II-89-80. Котельные установки.– М.: Госстрой СССР, 1980.

## ДОДАТКИ

### ДОДАТОК А

#### Співвідношення між одиницями систем МКГСС і СІ, а також між тепловими одиницями

##### *Одиниці тиску*

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 98066,5 \text{ Па} = 98,1 \text{ кПа} = 0,981 \text{ МПа} = 0,981 \text{ бар};$$

$$1 \text{ мм вод. ст.} = 1 \text{ кгс/м}^2 = 10^{-4} \text{ ат} = 0,981 \cdot 10^{-4} \text{ бар} = 9,81 \text{ Па};$$

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 0,102 \text{ кгс/м}^2 = 0,102 \cdot 10^{-4} \text{ кгс/см}^2 = 10^{-5} \text{ бар} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ ат} = \\ = 0,102 \text{ мм вод. ст.} = 0,0075 \text{ мм рт. ст.};$$

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па} = 102 \text{ кгс/м}^2 = 102 \text{ мм вод. ст.} = 0,0102 \text{ кгс/см}^2 = 0,0102 \text{ ат} = 0,01 \text{ бар};$$

$$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па} = 102 \cdot 10^3 \text{ кгс/м}^2 = 10,2 \text{ кгс/см}^2 = 10,2 \text{ ат} = 10 \text{ бар}.$$

##### *Динамічна в'язкість*

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{с/м}^2 = 9,81 \text{ Н/м}^2 = 9,81 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)} = 9,81 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с/м}^2.$$

##### *Робота й енергія*

$$1 \text{ кал} = 4,187 \text{ Дж} = 4,19 \text{ Дж};$$

$$1 \text{ ккал} = 10^3 \text{ кал} = 4187 \text{ Дж} = 4,187 \text{ кДж} = 4,19 \text{ кДж};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 860 \text{ ккал} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3600 \text{ кДж} = 3,6 \text{ МДж} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ ГДж};$$

$$1 \text{ Гкал} = 10^9 \text{ кал} = 10^6 \text{ ккал} = 1162,8 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1163 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 4,187 \cdot 10^9 \text{ Дж} = \\ = 4,187 \cdot 10^6 \text{ кДж} = 4,187 \text{ ГДж};$$

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 0,2388 \text{ кал} = 0,239 \text{ кал} = 0,278 \cdot 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{год} = \\ = 0,278 \cdot 10^{-6} \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

##### *Теплова потужність, тепловий потік*

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 0,00136 \text{ л.с.} = 0,239 \text{ кал/с} = 860 \text{ кал/год} = 0,860 \\ \text{ккал/год};$$

$$1 \text{ кВт} = 1 \text{ кДж/с} = 3600 \text{ кДж/год} = 102 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 1,36 \text{ л.с.} = 0,239 \text{ ккал/с} = 860 \text{ ккал/год};$$

$$1 \text{ МВт} = 1 \text{ МДж/с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ кДж/год} = 0,86 \cdot 10^6 \text{ ккал/год} = 0,86 \text{ Гкал/год};$$

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м/с} = 9,81 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ кал/с} = 4,187 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ ккал/год} = 1,163 \text{ Вт};$$



$$1 \text{ Гкал/год} = 1,163 \text{ МВт.}$$

### ***Теплові одиниці***

$$1 \text{ ккал/}^\circ\text{C} = 4,19 \text{ кДж/}^\circ\text{C};$$

$$1 \text{ ккал/год} = 0,279 \text{ кал/с} = 1,163 \text{ Дж/с} = 1,163 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ кал/с} = 4,1868 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ Вт} = 0,23885 \text{ кал/с} = 0,859845 \text{ ккал/год};$$

$$1 \text{ кал/(см}^2\cdot\text{с)} = 4,1868 \text{ Вт/см}^2 = 41868 \text{ Вт/м}^2;$$

$$1 \text{ Дж/кг} = 0,2388 \text{ кал/кг} = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/кг} = 239 \cdot 10^{-6} \text{ ккал/кг};$$

$$1 \text{ ккал/кг} = 4,187 \text{ кДж/кг};$$

$$1 \text{ ккал/К} = 4,187 \text{ кДж/К};$$

$$1 \text{ ккал/(м}^2\cdot\text{год)} = 1,163 \text{ Вт/м}^2;$$

$$1 \text{ Вт/м}^2 = 0,23885 \cdot 10^{-4} \text{ кал/(см}^2\cdot\text{с)} = 0,859845 \text{ ккал/(м}^2\cdot\text{год)}.$$

### ***Питома теплоємність***

$$1 \text{ кал/(г} \cdot ^\circ\text{C)} = 1 \text{ ккал/(кг} \cdot ^\circ\text{C)} = 4186,8 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$1 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)} = 0,23885 \cdot 10^{-3} \text{ кал/(г} \cdot ^\circ\text{C)} = 0,23885 \cdot 10^{-3} \text{ ккал/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

### ***Коефіцієнт тепловіддачі, теплопередачі***

$$1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C)} = 1,163 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$1 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C)} = 1,163 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)};$$

$$1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)} = 0,859845 \text{ ккал/(м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

### ***Коефіцієнт теплопровідності***

$$1 \text{ ккал/(м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C)} = 1,163 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$1 \text{ ккал/(м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C)} = 1,163 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$1 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)} = 0,859845 \text{ ккал/(м} \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

### ***Термічний опір***

$$1 \text{ м}^2 \cdot \text{год} \cdot ^\circ\text{C/ ккал} = 0,86 \text{ м}^2 \cdot \text{К/ Вт}.$$

## ДОДАТОК Б

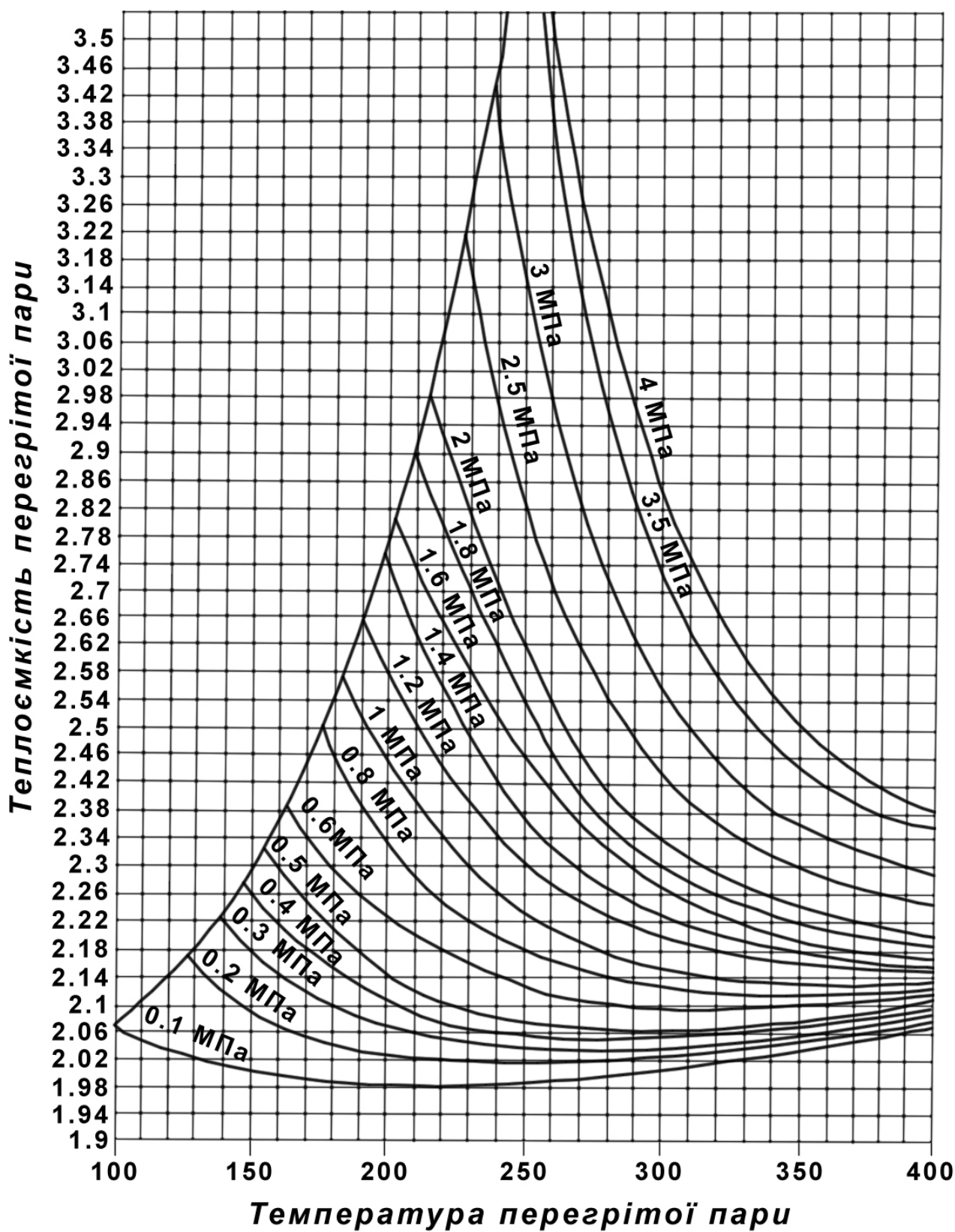


Рис. Б.1 - Графік для визначення теплоємності перегрітої пари  $c_p$ , кДж/(кг °С) при постійному тиску

*Навчальне видання*

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання практичних і самостійних робіт  
з курсу

**«ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧІ УСТАНОВКИ»**

(для студентів 3 курсу денної форми навчання  
напряму підготовки 6.060101 «Будівництво»)

Укладачі: **Ільченко** Борис Самуїлович,  
**Котух** Володимир Григорович

Відповідальний за випуск *І. І. Кацюв*

Редактор *К. В. Дюкар*

Комп'ютерне верстання *Н. В. Зражевська*

План 2012, поз. 127 М

---

Підп. до друку 03.12.2012

Формат 60×84/16

Друк на різнографі.

Ум. друк. арк. 2,0

Зам. №

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rektorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rektorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.