

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання практичних робіт  
з дисципліни «**Паливо та основи теорії горіння**»  
**Розрахунки горіння палива**  
Для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»  
(освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика»)  
усіх форм навчання

2023

Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання контрольної роботи з дисципліни «Паливо та основи теорії горіння» «Розрахунки горіння палива» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» (освітня програма «Промислова і комунальна теплоенергетика») усіх форм навчання./Укл.: Кузьменко А.А., Каюков Ю.М., Назаренко І.А., Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. 41 с.

Укладачі: Кузьменко А.А., старш. викладач;  
Каюков Ю.М., доц. канд.техн.наук;  
Назаренко І.А., доц. канд.техн.наук.

Відповідальний  
за випуск Лапкіна С.О., асист.

Затверджено на засіданні  
кафедри «Електричні машини»  
Протокол №7 від 16.02.2023

Рекомендовано до видання  
НМК Електротехнічного факультету  
Протокол №6 від 23.02.2023

## ЗМІСТ

Словник термінів.....	4
1 Розрахунки палива, визначення об'ємів повітря та продуктів згоряння, підрахунок ентальпій.....	5
1.1 Розрахунки палива. Послідовність виконання розрахунків при спалюванні твердих та рідких палив.....	5
1.2. Розрахунки палива. Послідовність виконання розрахунків при спалюванні газоподібних палив.....	7
1.3 Об'єм повітря та продуктів згоряння палива.....	8
1.4 Ентальпії повітря та продуктів згоряння.....	9
1.5 Примітки до першого розділу.....	12
1.6 Зразок послідовності викладання тексту при розрахунках палива.....	14
2 Тепловий баланс котельної установки і визначення витрати палива.....	21
2.1 Наявне тепло одиниці маси (об'єму) палива, втрати тепла і коефіцієнт корисної дії котельної установки.....	21
2.2 Тепло, яке використовується корисно, і витрата палива котельною установкою.....	25
2.3 Примітки до другого розділу.....	26
2.4 Зразок послідовності викладання тексту при розрахунках теплового балансу котельної установки.....	28
3 Вибір та розрахунки пальників.....	32
3.1 Визначення теплопродуктивності пальника.....	32
3.2 Технічні характеристики пальників.....	32
3.3 Рекомендації щодо кількості пальників та розміщення їх на стінах топки.....	36
Перелік посилань.....	38
Додаток А.....	39

**СЛОВНИК ТЕРМІНІВ**

вміст	содержание
водень	водород
витрата	расход
вуглець	углерод
дане, наявне	располагаемое
деревинний	древесный
довжина	длина
кисень	кислород
копальні	ископаемые
недопал	недожог
обшиття	обшивка
паливо	топливо
первинний	первичный
переважно	предпочтительно
перетин	сечение
питома	удельная
повітря	воздух
поживна	питательная
проміжне	промежуточное
прямоточний	прямоточный
рідина	жидкость
розрядження	разряжение
сірка	сера
спалима	сгорающая
сушарка	сушилка
тиск	давление
теплоємність	теплоемкость
шар	слой
шлаковидалення	шлакоудаление
цегла	кирпич
чавун	чугун

## **1 РОЗРАХУНКИ ПАЛИВА, ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМІВ ПОВІТРЯ ТА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ, ПІДРАХУНОК ЕНТАЛЬПІЙ**

Якщо завданням на проектування передбачено спалювання твердого палива, вказується його марка та клас, родовище, елементарний склад, зольність та вологість робочого палива, теплота згоряння, вихід летючих газів та температурні характеристики золи.

У тому випадку, коли завданням на проектування передбачено спалювання мазуту, вказується його сірчаність та марка, додається елементарний склад, зольність та вологість робочого палива і теплота згоряння. Для газоподібного палива вказується джерело генерації чи родовище, склад сухого газу в об'ємних відсотках, вміст пилу, вологості та теплота згоряння компонентів, які складають паливо.

Вихідні дані елементарного складу і теплоту згоряння твердих та рідких палив найкраще брати з тих літературних джерел, в яких вони розраховані на горючу чи суху масу. Склад палива та теплоту згоряння перераховують на робочий склад за допомогою вологості та зольності робочого палива. Подальші розрахунки ведуться за складом робочого палива.

Наступний етап розрахунку - визначення об'єму повітря, теоретично необхідного для горіння та об'ємів продуктів згоряння палива. Розрахунки виконують для усіх газоходів котельних установок, враховуючи величини надлишку повітряв кожному з них. В розрахунковій записці розрахунки не показують, додаються лише кінцеві результати розрахунків (таблиця 1.1).

Ентальпії повітря та продуктів згоряння підраховують для усіх газоходів котельних установок згідно з прийнятими надлишками повітря та можливими температурами (у розрахунковій записці надають лише підсумки розрахунків, таблиця 1.2).

### **1.1 Розрахунки палива. Послідовність виконання розрахунків при спалюванні твердих та рідких палив**

1.1.1 Надається найменування палива, його марка, клас та родовище. Для проміжних продуктів визначається марка вугілля, що збагачується, та спосіб збагачення; при спалюванні мазуту - група за

вмістом сірки та марка. Розрахункові характеристики беруться з таблиці А.1 Додатку А та з завдання на проектування.

1.1.2 Випишується елементарний вміст горючої маси палива у відсотках до одиниці маси, %:

- вуглець  $C^c =$
- водень  $H^c =$
- сірка  $S^c_{op+k} =$
- азот  $N^c =$
- кисень  $O^c =$

[4, с.120, табл.4-4; 6, с.40].

1.1.3 Вказується вологість робочого палива, %

$W^p =$

[3 завдання на проектування].

1.1.4 Наводиться зольність робочого палива<sup>1</sup>, %

$A^p =$

[3 завдання на проектування].

1.1.5 Випишується теплота згоряння у бомбі, що перерахована на горючу масу<sup>2</sup>, МДж/кг

$Q_{\sigma}^c =$

[1, с.152, табл.1; 4, с.120, табл. 4-4].

1.1.6 Випишується вихід летючих, що підрахований на горючу масу палива<sup>3</sup>, %

$V^c =$

[1, с.152, табл.1; 4, с.120, табл. 4-4; 6, с.40].

1.1.7 Випишуються температурні характеристики золи<sup>4</sup>, °С:

- температура початку деформації  $t_1 =$
- температура початку розм'якшування  $t_2 =$
- температура початку рідкоплавкого стану  $t_3 =$

[3 тих самих джерел, що для  $V^c$ ].

1.1.8 Підраховується коефіцієнт перерахунку горючої маси на роботу

$k =$

[1, с.8, табл. 2-1; 4, с.116, табл. 4-2; 6, с.52].

1.1.9 Розраховується елементарний склад спалимої частини робочого палива, %:

- вуглець  $C^p = k \cdot C^c =$
- водень  $H^p = k \cdot H^c =$
- сірка  $S^p_{op+k} = k \cdot S^c_{op+k} =$

- азот  $N^p = k \cdot N^c =$

- кисень  $O^p = k \cdot O^c =$

1.1.10 Підраховується вища теплота згоряння горючої маси палива, МДж/кг

$Q_{в}^z =$

[1, с.7, п. 2-02; 4, с.115, форм. 4-5].

1.1.11 Підраховується нижча теплота згоряння горючої маси палива, МДж/кг

$Q_{н}^z =$

[1, с.8, п. 2-07; 4, с.116, форм. 4-7].

1.1.12 Знаходиться нижча теплота згоряння робочого палива, МДж/кг

$Q_{н}^p =$

[1, с.8, п. 2-07; 4, с.116, форм. 4-9].

## 1.2. Розрахунки палива. Послідовність виконання розрахунків при спалюванні газоподібних палив

1.2.1 Вказується найменування родовища чи газопроводу, з якого передбачено подання палива. Розрахункові характеристики беруться з таблиці Б.1 Додатку Б та з завдання на проектування.

1.2.2 Випишується склад сухого газу в об'ємних відсотках та теплота згоряння сухих компонентів, %, МДж/м<sup>3</sup>

- метан  $CH_4 = Q_{CH_4}^C$

- етан  $C_2H_6 = Q_{C_2H_6}^C$

- ...

- ...

- ...

- азот  $N_2 =$

- вуглекислота  $CO_2$  -

[1, с.168, табл.ІІ, с.23, табл. 2-4; 4, с.132, табл.4-7, 4-8; 6, с.54].

1.2.3 Вказується вологовміст газу, г/м<sup>3</sup>

$d_2 =$

1.2.4 Вказується вміст пилу в газі, г/м<sup>3</sup>

$a_2 =$

1.2.5 Підраховується теплота згоряння сухого газу, МДж/м<sup>3</sup>

$Q_{н}^c =$

[1, с.10, п. 2-19; 3, с.39;4, с.117, форм. 4-14].

### 1.3 Об'єм повітря та продуктів згоряння палива

Послідовність розрахунків та кількість розрахункових операцій в даному підрозділі однакові в розрахунках горіння твердих, рідких та газоподібних палив.

1.3.1 Підраховується об'єм повітря, теоретично необхідного для повного згоряння палива, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{в}}^0 =$$

[1, с.16, п. 4-02; 2, с.51;3, с.40; 5,с.331, форм. 6-1].

1.3.2 Визначаються об'єми продуктів згоряння, що утворюються під час горіння палива з теоретичним об'ємом повітря, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

а) трьохатомних газів  $V_{RO_2} =$

б) азоту  $V_{N_2}^0 =$

в) водяної пари  $V_{H_2O}^0 =$

[1, с.16, п. 4-02; 2, с.51; 3, с.41; 5,с.331, форм. 6-2,6-3,6-4].

1.3.3 Вказується, передбачається чи ні застосування парового дуття.

1.3.4 Наводиться формула підрахунку об'єму водяної пари в продуктах згоряння при горінні палива з надлишком повітря, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{H_2O} =$$

[З тих самих джерел, що для  $V_{H_2O}^0$ ].

1.3.5 Наводиться формула для підрахунку об'єму продуктів згоряння при горінні палива з надлишком повітря із урахуванням присосів, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_2 =$$

[З тих самих джерел, що для  $V_{H_2O}$ ].

Вказується, що числові значення об'ємів водяної пари та газоподібних продуктів згоряння, які підраховані за наданими формулами, об'ємні доли трьохатомних газів та водяної пари, що підраховані як відношення, зведені в таблицю 1.1:

$$r_{RO_2} = \quad r_{H_2O} =$$

[1, с.16, п. 4-07; 6, с.331].

1.3.6 При спалюванні кам'яного вугілля та сланців приймається доля золи, що унесена в газоходи котельної установки

$$a_{yn} =$$

[1, с.17, п. 4-07; 2, с.52; 3, с.42; 5, с.331].

1.3.7 Приводиться формула для підрахунку концентрації золи в продуктах згоряння, г/м<sup>3</sup>

$$\mu_{зл} =$$

[2, с.52; 5, с.331, форм.6-10].

Вказується, що числові значення концентрацій, підрахованих за наведеною формулою, дані в таблиці 1.1.

1.3.8 Приймається надлишок повітря в кінці топки

$$\alpha_m =$$

[1, с.19, п. 4-14; 2, с.58, табл.7-1; 3, с.182, табл.11-1, с.190, табл.11-3, 11-4; с.184, табл.11-5, с.186, табл.11-6; 5, с.348, табл.6-7, с.363, табл.6-12, 6-13, с.407, табл.6-37].

1.3.9 Вказується, яке конструктивне виконання водяного економайзера та повітропідігрівача приймається в котельній установці, яка розраховується<sup>6</sup>.

1.3.10 Приймаються присоси повітря в газоходи:

- в газохід фестона  $\Delta\alpha_{\phi} =$

- в газохід пароперегрівача  $\Delta\alpha_{n.n.} =$

- в газохід водяного економайзера  $\Delta\alpha_{в.е.} =$

- в газохід повітропідігрівача  $\Delta\alpha_{в.н.} =$

[Додаток В, табл.В.1; 1, с.19, п. 4-16, с.198, табл.ХVI; 2, с.52, табл.6-1; 5, с.430, табл.7-10].

1.3.11 Підраховуються надлишки повітря за газоходами:

- за газоходом фестона (чи котельного пучка)  $\alpha''_{\phi} =$

- за газоходом пароперегрівача  $\alpha''_{n.n.} =$

- за газоходом водяного економайзера  $\alpha''_{в.е.} =$

- за газоходом повітропідігрівача, у відхідних газах  $\alpha''_{в.н.} =$

1.3.12 Вказується, що числові значення величин (табл. 1.1) підраховані за середніми величинами надлишку повітря, що знайдені як середнє арифметичне

$$\alpha_{ср} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}.$$

## 1.4 Ентальпії повітря та продуктів згоряння

Ентальпію повітря при спалюванні усіх видів палива підраховують за однаковою формулою. Ентальпії продуктів згоряння

торфу, деревинного палива, мазуту та усіх видів газоподібного палива підраховують також за однаковою формулою. При спалюванні багатозольного кам'яного вугілля та бурого вугілля необхідно враховувати ентальпію золи<sup>7</sup>.

1.4.1 Наводиться формула, яку використовують для підрахунку ентальпії повітря, необхідного для теоретичного процесу горіння, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I'_6 =$$

[1, с.17, п. 4-06; 2, с.53; 3, с.43; 5, с.333].

1.4.2 Приводиться формула для підрахунку ентальпій продуктів згоряння, які утворюються при горінні палива з теоретичним об'ємом повітря, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I'_c =$$

[1, с.17, п. 4-06; 2, с.53; 3, с.43; 5, с.333, форм. 6-33].

Після формули дається пояснення, що в розрахунках питома ентальпія трьохатомних газів дорівнює ентальпії вуглекислоти.

1.4.3 Приводиться формула, за якою підраховують ентальпію золи, яку уносять продукти згоряння, МДж/кг

$$I_{zl} =$$

[1, с.17, п. 4-07; 2, с.53, форм. 6-35; 3, с.43; 5, с.333, форм. 6-35].

Вказується, що числові значення ентальпій повітря, газоподібних продуктів згоряння та золи для температур від 0°C до 2200°C зведені в таблицю 1.2.

1.4.4 Приводиться формула, за якою підраховані ентальпії продуктів згоряння при горінні палива з надлишком повітря, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I_c =$$

[1, с.17, п. 4-06; 2, с.53, форм. 6-14; 3, с.43; 5, с.333, форм. 6-32].

Числові значення величин, підрахованих за наведеною формулою в інтервалі температур, що можливі в газозодах, зведені в таблицю 1.2. Величини  $\Delta I$ , які підраховують і записують в таблицю, становлять різницю значень ентальпій в інтервалі зміни температур.

Таблиця 1.1 – Об’ємні характеристики продуктів згоряння в поверхнях нагріву

Найменування величин та розрахункові формули	Газоходи котельної установки			
	Топка та фєстон	Паро-перегрївач	Водяний економайзер	Повітро-підгрївач
1. Коефіцієнт надлишку повітря до поверхні нагрівання $\alpha'$				
2. Присос повітря в поверхню нагрівання $\Delta\alpha$				
3. Коефіцієнт надлишку повітря за поверхнею нагрівання $\alpha''$				
4. Середній коефіцієнт надлишку повітря в поверхні нагрівання $\alpha_{cp} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}$				
5. Об’єм водяної пари в продуктах згоряння, м <sup>3</sup> /кг, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 (\alpha_{cp} - 1) V_6^0$				
6. Повний об’єм продуктів згоряння, м <sup>3</sup> /кг, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> $V_z = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{cp} - 1) V_6^0$				
7. Об’ємна доля трьохатомних газів $r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_z}$				
8. Об’ємна доля водяної пари $r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_z}$				
9. Концентрація пилу в продуктах згоряння, г/м <sup>3</sup> $\mu = \frac{10A^p \alpha_{yn}}{V_z}$				

## 1.5 Примітки до першого розділу

1.5.1 Часто в завданні на проектування дається зольність сухої маси палива  $A^c$ , %. В цьому випадку в п. 1.1.4 записують її значення. Зольність робочого палива підраховують після п. 1.1.7, тобто перед визначенням коефіцієнту перерахунку  $k$  (п. 1.1.8), %

$$A^p =$$

[1, с.8, табл. 2-1; 4, с.116, табл. 4-2; 6, с.52].

1.5.2. Дозволяється за вихідний елементарний склад палива приймати табличні значення, підраховані на робочу масу.

[1, с.182, табл. 1].

В цьому випадку в п. 1.1.2 виписується елементарний склад робочого палива. Якщо зольність та вологість, що передбачені завданням на проектування, співпадають з табличними, то взяті з таблиць значення робочого складу приймаються як розрахункові. В іншому випадку розрахунковий склад знаходиться помноженням на відповідні перерахункові коефіцієнти.

[2, с.23; 4, с.115, форм. 4-1].

Якщо за вихідний береться робочий склад палива, то в п. 1.1.8 підраховується коефіцієнт перерахунку з робочої маси на горючу, а в п. 1.1.9 дається підрахунок вмісту сірки та водню у горючій масі палива.

Теплота згоряння мазуту в таблицях палива дається у перерахунку на суху масу. Тому в розрахунковій записці в п. 1.1.5 виписують значення  $Q_H^c$ , МДж/кг. Пункти 1.1.10 та 1.1.11 будуть відсутні, а підрахунок нижчої теплоти згоряння робочого палива, МДж/кг

$$Q_H^p = Q_H^c \frac{100 - W^p}{100} - 0,025 W^p.$$

При підрахунку теплоти згоряння необхідно пам'ятати, що формули в [1], надані для випадку виміру теплоти у кілокалоріях. При використанні одиниць СІ формули мають інші числові значення коефіцієнтів, МДж/кг

$$Q_{\sigma}^p = Q_{\sigma}^c - 0,094 S_{op+\kappa}^c - 0,0015 Q_{\sigma}^c;$$

$$Q_n^c = Q_g^c - 0,226H^p;$$

$$Q_n^p = Q_n^r \frac{100 - (A^p + W^p)}{100} - 0,025W^p.$$

1.5.3. Вихід летючих газів є характеристикою твердого палива. При розрахунках спалювання мазуту п. 1.1.6 випускається.

1.5.4. Температурні характеристики золи – характеристики копальних твердих палив. При визначенні спалювання деревинного палива та мазуту п. 1.1.7 випускається.

1.5.5. Доля золи, яку уносить в газоходи котельної установки, враховують лише при спалюванні усіх видів кам'яних вугілля та горючих сланців. При підрахунку спалювання деревинного палива пункти 1.2.6 та 1.2.7 випускаються.

1.5.6. В п. 1.2.9 перераховані (в послідовності їх розташування) газоходи котельної установки з одноступеневою компоновкою. При розрахунках котельних установок ДКВР-4-13; ДКВР-6, 5-13; ДКВР-10-13 послідовність газоходів після топки така: газохід камери догорання, газохід пароперегрівача, газохід котельного пучка, газохід водяного економайзера.

В перерахованих котельних установках при спалюванні високоволоного палива (бурого вугілля, торфу, деревинних відходів) замість водяного економайзера необхідно встановлювати повітропідігрівач.

З двоступеневим компонованням конвективних (хвостових) поверхонь нагріву послідовність газоходів після топки така: газохід фестона, газохід пароперегрівача, газохід другої ступені економайзера, газохід другої ступені повітропідігрівача, газохід першої ступені водяного економайзера, газохід першої ступені повітропідігрівача.

1.5.7. Якщо при спалюванні твердого палива виконується нерівність  $(a_{yn}A^p)/Q_n^p < 1,43$ , ентальпію золи можна не враховувати. Про це роблять запис в пункті, наступному за п. 1.3.2.

1.5.8. При визначенні спалювання мазуту та газоподібних палив п. 1.3.3 випускається, тому що  $(a_{yn}A^p)$  дуже мале.

Таблиця 1.2 – Залежність ентальпій повітря та продуктів згоряння від температури, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

θ, °C	I <sub>e</sub> <sup>0</sup>	I <sub>B</sub> <sup>0</sup>	I <sub>зл</sub>	α'' <sub>m</sub> = α'' <sub>φ</sub>		α'' <sub>n.n.</sub> =		α'' <sub>в.з.</sub> =		α'' <sub>в.п.</sub> =	
				I <sub>e</sub>	ΔI	I <sub>e</sub>	ΔI	I <sub>e</sub>	ΔI	I <sub>e</sub>	ΔI
100	x	x	x							x	
200	x	x	x					x		x	
300	x	x	x					x			
400	x	x	x					x			
500	x	x	x					x			
600	x	x	x		x			x			
700	x	x	x		x						
800	x	x	x		x						
900	x	x	x	x	x						
1000	x	x	x	x	x						
1100	x	x	x	x	x						
1200	x	x	x	x	x						
1300	x	x	x	x							
1400	x	x	x	x							
1500	x	x	x	x							
1600	x	x	x	x							
1700	x	x	x	x							
1800	x	x	x	x							
1900	x	x	x	x							
2000	x	x	x	x							
2100	x	x	x	x							
2200	x	x	x	x							

## 1.6 Зразок послідовності викладання тексту при розрахунках палива

1.6.1 Розрахунки палива, підрахунок об'ємів та ентальпій повітря та продуктів згоряння (за відповідними пунктами)

1.6.1.1 Характеристики якості палива. Паливо-горючі сланці розрізу №1 «Сіргала» Естонії.

1.6.1.2 Середній елементарний склад горючої маси палива, % :

- вуглець  $C^c=74,0$ ;
- водень  $H^c=9,5$ ;
- сірка  $S^c_{op+k}=4,9$ ;
- азот  $N^c=0,3$ ;
- кисень  $O^c=11,3$ .

1.6.1.3 Вологість робочого палива, %  $W^p=12,5$ .

1.6.1.4 Зольність сухої маси палива, %  $A^c=49,0$ .

1.6.1.5 Вміст вуглекислоти карбонатів у перерахунку на суху масу палива, %  $(CO_2)_k^c=21,0$ .

1.6.1.6 Теплота згоряння в бомбі, що підраховується на горючу масу палива, МДж/кг  $Q_{e^c}=37,26$ .

1.6.1.7 Вихід летючих у перерахунку на горючу масу, %  $V^e=90$ .

1.6.1.8 Температурні характеристики золи, °С:

- початок деформації  $t_1=1400$ ;
- початок розм'якшування  $t_2=1500$ ;
- початок рідкоплавкого стану  $t_3$  – не визначається.

1.6.1.9 Зольність у перерахунку на робочу масу палива, %

$$A^p = A^c \frac{100 - W^p}{100} = 49,0 \frac{100 - 12,5}{100} = 42,9.$$

1.6.1.10 Вміст вуглекислоти карбонатів у перерахунку на робочу масу палива, %

$$(CO_2)_k^p = (CO_2)_k^c \frac{100 - W^p}{100} = 21,0 \frac{100 - 12,5}{100} = 18,4.$$

1.6.1.11 Виправлена зольність робочої маси палива, %

$$A_{\text{випр}}^p = A^p - 2 \frac{100 - W^p}{100} = 42,9 - 2 \left( \frac{100 - 12,5}{100} \right) = 41,2.$$

1.6.1.12 Коефіцієнт перерахунку складу палива з горючої маси на робочу

$$k = \frac{100 - A_{\text{випр}}^p - W^p - (CO_2)_k^p}{100} = \frac{100 - 41,2 - 12,5 - 18,4}{100} = 0,279.$$

1.6.1.13 Елементарний склад спалимої частини робочого палива, %:

- вуглець  $C^p = k \cdot C^c = 0,279 \cdot 74,0 = 20,6$ ;
- водень  $H^p = k \cdot H^c = 0,279 \cdot 9,5 = 2,7$ ;
- сірка  $S_{\text{оп+к}}^p = k \cdot S_{\text{оп+к}}^c = 0,279 \cdot 4,9 = 1,4$ ;
- азот  $N^p = k \cdot N^c = 0,279 \cdot 0,3 = 0,1$ ;
- кисень  $O^p = k \cdot O^c = 0,279 \cdot 11,3 = 3,1$ .

1.6.1.14 Вища теплота згоряння горючої маси палива, МДж/кг

$$Q_{\text{в}}^c = Q_{\text{б}}^c - 0,094 \cdot S_{\text{оп+к}}^c - 0,015 Q_{\text{б}}^c = 37,26 - 0,094 \cdot 4,9 - 0,015 \cdot 37,26 = 36,24.$$

1.6.1.15 Нижча теплота згоряння горючої маси палива, МДж/кг

$$Q_{\text{н}}^c = Q_{\text{в}}^c - 0,226 \cdot H^c = 36,24 - 0,226 \cdot 9,5 = 34,1.$$

1.6.1.16 Нижча теплота згоряння робочого палива, МДж/кг

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^p &= Q_{\text{н}}^c \frac{100 - A_{\text{випр}}^p - W^p - (CO_2)_k^p}{100} - 0,025 W^p = Q_{\text{н}}^c \cdot k - 0,025 W^p \\ &= \\ &= 34,1 \cdot 0,279 - 0,025 \cdot 12,5 = 9,32. \end{aligned}$$

1.6.2 Об'єми повітря та продуктів згоряння палива

1.6.2.1 Об'єм повітря, теоретично необхідного для повного згоряння палива, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{\text{в}}^o = 0,0889(C^p + 0,375 \cdot S_{\text{оп+к}}^p) + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p =$$

$$= 0,0889(20,6+0,375 \cdot 1,4)+0,265 \cdot 2,7-0,0333 \cdot 3,1 = 2,490.$$

1.6.2.2 Об'єм продуктів згоряння, що утворюються під час горіння палива з теоретичним об'ємом повітря, м<sup>3</sup>/кг:

а) трьохатомних газів

$$\begin{aligned} V_{RO_2} &= 0,01856(C^p + 0,375 \cdot S_{op+k}^p) + 0,509 \frac{(CO_2)_k}{100} k_{CO_2} = \\ &= 0,01856(20,6 + 0,375 \cdot 1,4) + 0,509 \frac{18,4}{100} \cdot 1,0 = 0,488; \end{aligned}$$

б) азоту

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,8 \frac{N^p}{100} = 0,79 \cdot 2,49 + 0,8 \frac{0,1}{100} = 1,970;$$

в) водяної пари

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 0,111H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161V_B^0 = \\ &= 0,111 \cdot 2,7 + 0,0124 \cdot 12,5 + 0,0161 \cdot 2,49 = 0,495. \end{aligned}$$

1.6.2.3 В котельній установці, що розраховується, форсуночне дуттяне передбачене.

1.6.2.4 Об'єм водяної пари в продуктах згоряння під час горіння палива з надлишком повітря, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{cp} - 1) \cdot V_B^0.$$

1.6.2.5 Об'єм продуктів згоряння при горінні палива з надлишком повітря, м<sup>3</sup>/кг

$$V_z = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{cp} - 1) \cdot V_B^0.$$

Числові значення об'ємів водяної пари і повних об'ємів продуктів згоряння, підрахованих за цими формулами при надлишках повітря у газоходах, зведені в таблицю 1.3. Підрахунок виконано за

середніми надлишками повітря в газоходах, що знайдені як середнє арифметичне з величин на вході в газохід і на виході з нього.

В таблицю 1.3 зведені також об'ємні доли водяної пари і трьохатомних газів в продуктах згоряння у вигляді відношень:

$$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_2; r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_2.$$

1.6.2.6 Доля золи, що унесена в конвективні газоходи котельної установки, прийнята

$$a_{yn} = 0,95.$$

1.6.2.7 Концентрація золи в продуктах згоряння, г/нм<sup>3</sup>

$$\mu_{zl} = \frac{10A^p \alpha_{yn}}{V_r}.$$

Числові значення величин, що одержані підрахунком за попередньою формулою, зведені в таблицю 1.3.

1.6.2.8 Надлишок повітря в кінці топки прийнято [1]  $\alpha_m = 1,2$ .

В котельній установці, що розраховується, передбачено встановлення сталевого змішувального економайзера та трубчастого рекуперативного повітропідігрівача. Компонівка цих поверхонь прийнята одноступеневою.

1.6.2.9 Для прийнятої конструкції та компоновки поверхонь нагріву використовують присоси повітря в газоходи:

- котельного пучка (фестона)  $\Delta\alpha_{к.н.} = 0$ ;
- пароперегрівача  $\Delta\alpha_{н.н.} = 0,05$ ;
- водяного економайзера  $\Delta\alpha_{в.е.} = 0,03$ ;
- повітропідігрівача  $\Delta\alpha_{в.п.} = 0,05$ .

1.6.2.10 У відповідності до прийнятих присосів надлишки повітря за газоходами наступні:

- за котельним пучком  $\alpha''_{к.н.} = \alpha''_m = 1,20$ ;
- за пароперегрівачем  $\alpha''_{н.н.} = \alpha''_{к.н.} + \Delta\alpha_{н.н.} = 1,25$ ;
- за водяним економайзером  $\alpha''_{в.е.} = \alpha''_{н.н.} + \Delta\alpha_{в.е.} = 1,28$ .
- за газоходом повітропідігрівача, у відхідних газах

$$\alpha''_{в.п.} = \alpha''_{в.е.} + \Delta\alpha_{в.п.} = 1,33.$$

1.6.3 Підрахунок ентальпій повітря та продуктів згоряння

1.6.3.1 Ентальпії теоретичного об'єму повітря в інтервалі температур від 0 °С до 2200 °С, що можливі у газоходах котельної установки, МДж/кг

$$I_{\epsilon}^0 = (c \cdot \vartheta)_{\epsilon} \cdot V_{\text{B}}^0 \cdot 10^{-3}.$$

1.6.3.2 Ентальпіїгазоподібних продуктів згоряння палива при горінні з теоретичним об'ємом повітря в інтервалі тих самих температур підраховуємо за формулою, МДж/кг

$$I_{\epsilon}^0 = [(c\vartheta)_{RO_2} V_{RO_2} + (c\vartheta)_{N_2} V_{N_2}^0 + (c\vartheta)_{H_2O} V_{H_2O}^0] 10^{-3}.$$

1.6.3.3 Ентальпії золи в продуктах згоряння, МДж/кг

$$I_{\text{зл}} = (c\vartheta)_{\text{зл}} \frac{A^p}{100} \cdot \alpha_{\text{ун}} \cdot 10^{-3}.$$

1.6.3.4 Ентальпії продуктів згоряння, що утворюються при горінні палива з надлишком повітря в інтервалі тих самих температур, підраховуємо як суму, МДж/кг

$$I_{\epsilon} = I_{\epsilon}^0 + (\alpha'' - 1) \cdot I_{\epsilon}^0 + I_{\text{зл}}.$$

Таблиця 1.3 – Об’ємні характеристики продуктів згоряння в газоходах котельної установки

Найменування величини та розрахункові формули	Газоходи котельної установки			
	Топка та фестон	Паро-перегрівач	Водяний економайзер	Повітро-підігрівач
Коефіцієнт надлишку повітря до поверхні нагрівання $\alpha'$	1,15	1,2	1,25	1,28
Присос повітря в поверхню нагрівання $\Delta\alpha$	0,05-для топки	0,05	0,03	0,05
Коефіцієнт надлишку повітря за поверхнею нагрівання $\alpha''$	1,2	1,25	1,28	1,33
Середній коефіцієнт надлишку повітря в поверхні нагрівання $\alpha_{cp}$	1,175	1,225	1,265	1,305
Об’єм водяної пари в продуктах згоряння, м <sup>3</sup> /кг $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{cp} - 1)V_B^0$	0,993	1,068	1,142	1,242
Повний об’єм продуктів згоряння, м <sup>3</sup> /кг $V_r = V_{R O_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{cp} - 1)V_B^0$	3,941	4,091	4,239	4,439
Об’ємна доля трьохатомних газів $r_{R O_2} = \frac{V_{R O_2}}{V_r}$	0,252	0,261	0,269	0,280
Об’ємна доля водяної пари $r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r}$	0,124	0,119	0,115	0,110
Концентрація пилу в продуктах згоряння, г/м <sup>3</sup> $\mu = \frac{10A^p \alpha_{yh}}{V_r}$	103,4	99,6	96,1	91,8

## 2 ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ І ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА

В цьому розділі приведені обчислення наявного тепла одиниці маси або одиниці об'єму, підраховані втрати тепла з відхідними газами, значення втрати тепла від хімічної неповноти згоряння та механічного недопалу, втрати тепла до навколишнього середовища та зі шлаком. За знайденими величинами втрат тепла підраховують коефіцієнт корисної дії котельної установки.

Після зазначених підрахунків визначають витрату води в продукву, виписують ентальпії перегрітої пари, поживної та котлової води і підраховують кількість тепла, яке використовують в котельній установці корисно, далі – фактичні та розрахункові витрати палива.

Увесь матеріал розділу переважно викладати у формі двох підрозділів. Приблизний порядок пунктів кожного підрозділу надається далі.

### 2.1 Наявне тепло одиниці маси (об'єму) палива, втрати тепла і коефіцієнт корисної дії котельної установки

2.1.1 Виписується значення нижчої теплоти згоряння палива, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$Q_n^p =$$

2.1.2 Вказується температура палива при подаванні його для спалювання<sup>1</sup>, °С

$$t_{mn} =$$

[1, с.20, п. 5-04; 2, с.59].

2.1.3 Знаходиться теплоємність сухої маси палива<sup>2</sup>, кДж/(кг·К)

$$C_{mn}^c =$$

[1, с.15, табл. 3-1; 2, с.59; 3, с.46, табл. 3-1].

2.1.4 Підраховується теплоємність робочого палива, кДж/(кг·К)

$$C_{mn}^p =$$

[1, с.13, п. 3-13; 2, с.59; форм. 7-5; 3, с.46].

2.1.5 Підраховується фізичне тепло палива, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{mn} =$$

[1, с.20, п. 5-04; 2, с.59; 3, с.46].

Таблиця 2.1 – Ентальпії повітря та продуктів згоряння в газозодах котельної установки

θ, °C	$I_c^0$ , МДж/кг	$I_B^0$ , МДж/кг	$I_{зл}$ , МДж/кг	$\alpha''_m = \alpha''_{\phi} = 1,20$		$\alpha''_{n.n.} = 1,25$	
				$I_c$ , МДж/кг	$\Delta I$ , МДж/кг	$I_c$ , МДж/кг	$\Delta I$ , МДж/кг
100	0,419	0,329	0,032				
200	0,837	0,663	0,068				
300	1,274	1,002	0,106				
400	1,723	1,349	0,146				
500	2,186	1,704	0,187				
600	2,662	2,066	0,231			3,410	0,619
700	3,149	2,436	0,271			4,029	0,635
800	3,647	2,813	0,314			4,664	0,649
900	4,154	3,196	0,360	5,135	0,644	5,313	
1000	4,670	3,584	0,410	5,797	0,653		
1100	5,194	3,987	0,460	6,450	0,664		
1200	5,725	4,375	0,514	7,114	0,676		
1300	6,253	4,775	0,582	7,790	0,697		
1400	6,805	5,179	0,646	8,487	0,707		
1500	7,352	5,585	0,725	9,194	0,717		
1600	7,904	5,993	0,789	9,911	0,725		
1700	8,506	6,403	0,849	10,636	0,736		
1800	9,103	6,823	0,904	11,372	0,744		
1900	9,699	7,228	0,971	12,116	0,755		
2000	10,323	7,636	1,021	12,871	0,765		
2100	10,940	8,136	1,069	13,636	0,821		
2200	11,626	8,566	1,118	14,457			

Таблиця 2.2 – Ентальпії повітря та продуктів згоряння в газозодах котельної установки

θ, °C	$I_c^0$ , МДж/кг	$I_B^0$ , МДж/кг	$I_{зл}$ , МДж/кг	$\alpha''_{в.з.} = 1,28$		$\alpha''_{в.л.} = 1,33$	
				$I_c$ , МДж/кг	$\Delta I$ , МДж/кг	$I_c$ , МДж/кг	$\Delta I$ , МДж/кг
100	0,419	0,329	0,032			0,560	0,564
200	0,837	0,663	0,068			1,124	0,587
300	1,274	1,002	0,106	1,661	0,586	1,711	
400	1,723	1,349	0,146	2,247	0,603		
500	2,186	1,704	0,187	2,850	0,621		
600	2,662	2,066	0,231	3,471			

2.1.6 Вказується температура холодного повітря, °С

$$t_{хв} =$$

[1, с.20, п. 5-03; 2, с.59].

2.1.7 Знаходиться ентальпія повітря при температурі холодного повітря, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I^0_{хв} =$$

[Власний розрахунок, табл.1.2].

2.1.8 Вказується температура повітря на вході у повітропідігрівач, якщо передбачений його підігрів поза котельною установкою<sup>3</sup>, °С

$$t'_{в.п.} =$$

[З завдання на проектування].

2.1.9 Знаходиться ентальпія повітря при температурі підігрітого повітря, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I^0_{в.вни} =$$

[Власний розрахунок, табл.1.2].

2.1.10 Вказується коефіцієнт надлишку повітря на вході у повітропідігрівач

$$\beta'_{в.п.} =$$

[1, с.19, п. 4-17; 2, с.59, форм. 7-9].

2.1.11 Підраховується тепло, яке вносить повітря в котельну установку при підігріві у калориферах, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$Q_{в.вни} =$$

[1, с.20, п. 5-05; 2, с.59; форм. 7-8;3, с.45, форм. 3-2].

2.1.12 Приймається витрата пари на розпилювання мазуту, кг/кг

$$M_{\phi} =$$

[1, с.70, п.16; 3, с.46].

2.1.13 Знаходиться ентальпія пари, що використовується для розпилю<sup>4</sup>, кДж/кг

$$h_{\phi} =$$

[1, с.204, табл. XIII;7 с. 19, табл.П].

2.1.14 Підраховується тепло, яке вносить пара, що використана на розпилювання мазуту, МДж/кг

$$Q_{\phi} =$$

[1, с.20, п.5-05; 3, с.46].

2.1.15 Випикується вміст вуглекислоти карбонатів у паливі<sup>5</sup>, %

$$(\text{CO}_2)_{\text{к}}^{\text{р}} =$$

[1, с.164, табл. 1, виноска 5].

2.1.16 Приймається коефіцієнт розкладання карбонатів

$$k_{\text{CO}_2} =$$

[1, с.18, п. 4-11].

2.1.17 Підраховується тепло, що витрачається на розкладання карбонатів, МДж/кг

$$Q_k =$$

[1, с.20, п.5-06;3, с.46].

2.1.18 Підраховується наявне тепло одиниці маси (одиниці об'єму) палива, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$Q_p^p =$$

[1, с.20, п. 5-02; 2, с.59; форм. 7-7;3, с.45, форм. 3-1].

2.1.19 Приймаються втрати тепла від механічного недопалу, %

$$q_4 =$$

[1, с.200-203, табл.ХVІІ-ХХІ;2 с.58, табл.7-1;5, с.363, табл.6-12, с.407, табл.6-37].

2.1.20 Приймаються втрати тепла від хімічного недопалу, %

$$q_3 =$$

[Там де  $q_4$ ].

2.1.21 Приймається температура холодного повітря<sup>6</sup>, °С

$$t_{x.v.} =$$

[1, с.20, п. 5-03; 2, с.59].

2.1.22 Підраховується ентальпія холодного повітря, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I_{x.v.}^0 =$$

[Власний розрахунок, табл.1.2].

2.1.23 Вказується температура відхідних газів, °С

$$g_{yx} =$$

[З завдання на проектування].

2.1.24 Підраховується ентальпія продуктів згоряння при цій температурі, МДж/кг, МДж/м<sup>3</sup>

$$I_{yx} =$$

[Власний розрахунок, табл.1.2].

2.1.25 Підраховуються втрати тепла відхідними газами, %

$$q_2 =$$

[1, с.20, п. 5-07; 2, с.59; форм. 7-4;5, с.428, форм. 7-3].

2.1.26 Визначаються втрати тепла до навколишнього середовища, %

$$q_5 =$$

[1, с.21, рис.5-1;2,с.49,рис.3-1;5,с.422, рис. 7-1].

2.1.27 Підраховуються втрати фізичного тепла зі шлаком<sup>8</sup>, %

$$q_{5\text{шл}} =$$

[1, с.21, п. 5-11;2, с.57; форм. 7-3;3, с.48;5, с. 430, форм. 7-6].

2.1.28 Визначаються втрати тепла із водою, яка використовується для охолодження балок та панелей<sup>9</sup>, %

$$q_{6\text{охл}} =$$

[1, с.21, п. 5-12;3,с. 49].

2.1.29 Підраховується сума теплових втрат, %

$$\Sigma q_{\text{ном}} =$$

2.1.30 Знаходиться коефіцієнт корисної дії котельної установки, %

$$\Pi_{\text{к.у.}} =$$

[1, с.22, п. 5-13;2, с.57; форм. 7-1;3, с.49].

## 2.2 Тепло, яке використовується корисно, і витрата палива котельною установкою

2.2.1 Знаходиться ентальпія перегрітої пари при тиску  $P_{\text{н.п.}}$  і температурі  $t_{\text{н.п.}}$ , кДж/кг

$$h_{\text{нп}} =$$

[1, с.209,табл. XXV;7, с.26, табл.ІІІ].

2.2.2 Знаходиться ентальпія поживної води при тиску  $P_{\text{н.в.}}=1,1P_{\sigma}$  і температурі  $t_{\text{н.в.}}$ , кДж/кг

$$h_{\text{н.в.}} =$$

[1, с.209,табл. XXV;7, с.26, табл. ІІІ].

2.2.3 Підраховується витрата котлової води в продувку<sup>10</sup>, кг/с

$$D_{\text{пр}} =$$

2.2.4 Знаходиться ентальпія котлової води при тиску в барабані, кДж/кг

$$h_{\text{к.в.}} =$$

[1, с.204,табл. XXІІІ;7,с.19,табл.ІІ].

2.2.5 Підраховується тепло, яке використане в котельній установці корисно, МВт

$$Q_{к.у.} =$$

[1, с. 22, п. 5-14;3, с. 45].

2.2.6 Знаходиться фактична витрата палива котельною установкою, кг/с

$$B =$$

[1, с.22, п. 5-15;2, с.60; форм. 7-10;3, с.49;5, с. 430, форм. 7-9].

2.2.7 Підраховується розрахункова витрата палива (яке повністю згоріло), кг/с

$$B^p =$$

[1, с.22, п. 5-16;2, с.60; форм. 7-11;3, с.50;5, с. 431, форм. 7-10].

## 2.3 Примітки до другого розділу

2.3.1. При спалюванні твердого палива його фізичне тепло враховується у випадку, коли передбачено сушіння палива в парових сушарках і по незамкненому типу. В замкнених системах пилоприготування фізичне тепло палива рекомендується враховувати при спалюванні високовологих палив, коли

$$W^p > 1,6 Q_{н.р.}$$

При спалюванні мазуту температура перегріву приймається такою, щоб в'язкість мазуту була не вище 2,5 °УВ. Числові значення знаходять із графіка залежності в'язкості від температури.

[1, с. 15, рис. 3-2, с. 70, п. 16;2, с. 358, рис. 6-27].

2.3.2. Теплоємність мазуту підраховується за формулою лінійної залежності від температури.

[1, с. 13, п. 3-14;2, с. 59;3, с. 46].

При спалюванні газоподібного палива теплоємність підраховується за формулою змішування.

[1, с. 13, п. 3-13;3, с. 46].

Температура газоподібного палива приведена в завданні на проектування. Якщо підігрів газоподібного палива не передбачено, фізичне тепло палива приймається рівним нулю.

2.3.3. Якщо підігрів повітря поза котельною установкою не передбачено, про це робиться запис в п.2.1.6 замість наведеного. Пункти (2.1.7...2.1.11) випускаються.

2.3.4. Для розпилу мазуту використовується насичена пара. Тоді приймають  $h_{\phi}=h''$ , кДж/кг, при тиску в барабані. Ентальпію пари в продуктах згоряння приймають  $h=2510$  кДж/кг.

У випадку застосування пальникового обладнання з форсунками механічного розпилювання, тепло форсуночного дуття відсутнє. Про це робиться запис у п. 2.1.12. Приведений текст запису пунктів (2.1.12... 2.1.14) випускається.

2.3.5. Тепло, що витрачене на розкладання карбонатів, обчислюється лише при спалюванні сланців. При спалюванні інших видів палива наявність пунктів (2.1.15... 2.1.17) випускається, а замість них в розрахунковій записці окремим пунктом робиться запис про відсутність вуглекислоти карбонатів.

2.3.6. Якщо температура холодного повітря обговорена при підрахунку тепла  $Q_{в.внш}$ , то повторювати її, а також ентальпію  $I_{хв.у}^0$  розрахунковій записці не треба і пункти 2.1.21 і 2.1.22 випускаються.

2.3.7. Підрахунок виконується інтерполюванням значень, підрахованих при 100 °С і 200 °С, що приведені в таблиці 1.2 у графі  $\alpha''_{в.п.}$  (або  $\alpha''_{в.е.}$ , якщо останньою за ходом поверхнею виявляється водяний економайзер).

2.3.8. Втрати тепла зі шлаком враховуються при шаровому спалюванні всіх видів копалинних твердих палив і при факельному спалюванні твердого палива, якщо видалення шлаку відбувається в розплавленому стані (при рідкому шлаковидаленні). При факельному спалюванні палива і видаленні шлаку в гранульованому стані (сухе шлаковидалення) втрати тепла зі шлаком враховуються лише у випадках, коли  $A^p \geq 2,4Q_n^p$ . Якщо вони не враховуються, в п.2.1.27 робиться запис, що обґрунтовує прийняте рішення.

2.3.9. Втрати тепла  $q_{бокл}$  підраховуються лише в тих котельних установках, де в наявності є деталі, що охолоджуються потоками води, які не містяться в контурі циркуляції. При відсутності таких деталей втрати тепла  $q_{бокл} = 0$ , про що робиться запис, який відповідає п. 2.1.28.

2.3.10. Витрата води в продувку, кг/с

$$D_{пр} = \frac{P_{пр}}{100} \cdot D,$$

де  $R_{\text{пр}}$  - величина продувки, що передбачена завданням на проектування. В тому випадку, якщо  $R_{\text{пр}} < 2\%$ , допускається не враховувати тепло води продувки. Про це робиться запис у п.2.2.3 і не визначається ентальпія котлової води.

## 2.4 Зразок послідовності викладання тексту при розрахунках теплового балансу котельної установки

2.4.1 Тепловий баланс котельної установки. Витрата палива  
Наявне тепло одиниці маси палива

2.4.1.1 Теплота згоряння паливанижча, МДж/кг  $Q_n^p = 9,2$ .

2.4.1.2 Фізичне тепло палива не враховане, тому що

$$W^p < 1,6Q_n^p; \quad Q_{\text{мл}} = 0.$$

2.4.1.3 Підігрів повітря перед подачею в повітропідігрівач не передбачений

$$Q_{\text{в.внш.}} = 0.$$

2.4.1.4 Форсуночне дуття не передбачено

$$Q_{\phi} = 0.$$

2.4.1.5 Наявність вуглекислоти карбонатів в робочому паливі, %

$$(CO_2)_k = 18,4.$$

2.4.1.6 Коефіцієнт розкладання карбонатів прийнятий  $k_{CO_2} = 1,0$ .

2.4.1.7 Тепло, яке витрачається на розкладання карбонатів,  
МДж/кг

$$Q_k = 0,04(CO_2)_k \cdot k_{CO_2} = 0,04 \cdot 18,4 \cdot 1,0 = 0,736.$$

2.4.1.8 Наявне тепло одиниці маси робочого палива, МДж/кг

$$Q_p^p = Q_n^p + Q_{\text{мл}} + Q_{\text{в.внш.}} + Q_{\phi} - Q_k = 9,2 - 0,736 = 8,464.$$

2.4.2 Втрати тепла та коефіцієнт корисної дії котельної установки

2.4.2.1 Втрати тепла від механічного недопалу [1], %

$$q_4 = 1,0.$$

2.4.2.2 Втрати тепла від хімічної неповноти згоряння [1], %

$$q_3 = 0,5.$$

2.4.2.3 Температура холодного повітря, °С

$$t_{х.в.} = 30.$$

2.4.2.4 Ентальпія теоретично необхідного повітря при цій температурі, МДж/кг

$$I_{х.в.}^0 = 0,099.$$

2.4.2.5 Температура відхідних газів за завданням на проектування, °С

$$t_{yx} = 160.$$

2.4.2.6 Ентальпія продуктів згоряння при цій температурі, МДж/кг

$$I_{yx} = 0,898.$$

2.4.2.7 Рециркуляція продуктів згоряння із конвективних газоходів в топку відсутня

$$r_{rec} = 0.$$

2.4.2.8 Коефіцієнт надлишку повітря у відхідних газах

$$\alpha_{yx} = 1,33.$$

2.4.2.9 Втрати тепла з відхідними газами, %

$$q_2 = \frac{(I_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{х.в.}^0)}{Q_p^p} (100 - q_4) = \frac{(0,898 - 1,33 \cdot 0,099)}{8,464} (100 - 1) = 8,96.$$

2.4.2.10 Втрати тепла котельною установкою до навколишнього середовища, %

$$q_5 = 1,0.$$

2.4.2.11 Температура шлаку, що видаляється [1], °С

$$\vartheta_{\text{шл}} = 600.$$

2.4.2.12 Ентальпія шлаку при цій температурі [1], МДж/кг

$$(c \cdot \vartheta)_{\text{шл}} = 0,561.$$

2.4.2.13 Втрати тепла зі шлаком, що видаляється, %

$$Q_{6\text{шл}} = \frac{(1 - \alpha_{\text{ун}}) A^p (c\vartheta)_{\text{шл}}}{Q_p^p} = \frac{(1 - 0,95) \cdot 42,9 \cdot 0,561}{8,464} = 0,14.$$

2.4.2.14 В котельній установці не передбачається встановлення деталей, що охолоджуються проточною водою, тому

$$q_{6\text{охл}} = 0.$$

2.4.2.15 Сума втрат тепла, %

$$\Sigma q_{\text{ном}} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_{6\text{шл}} + q_{6\text{охл}} = 8,8 + 0,5 + 1,0 + 1,0 + 0,14 = 11,44.$$

2.4.2.16 Коефіцієнт корисної дії котельної установки, %

$$\Pi_{\text{к.у.}} = 100 - \Sigma q_{\text{ном}} = 100 - 11,44 = 88,56.$$

2.4.3 Тепло, яке використовується корисно, і витрата палива

2.4.3.1 Паропродуктивність котельної установки визначена завданням на проектування і дорівнює, кг/с

$$D = 13,9.$$

2.4.3.2 Ентальпія перегрітої пари при  $P_{\text{н.п.}} = 3,92$  МПа та температурі

$$t_{\text{н.п.}} = 440 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ кДж/кг}$$

$$h_{\text{н.п.}} = 3174.$$

2.4.3.3 Ентальпія поживної води при  $P_{\text{в.}} = 4,80$  МПа та температурі

$$t_{\text{н.в.}} = 145 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ кДж/кг}$$

$$h_{\text{н.в.}} = 613.$$

2.4.3.4 Величина продувки за завданням, %

$$P_{пр} = 2.$$

2.4.3.5 Витрата води в продувку, кг/с

$$D_{пр} = \frac{P_{пр}}{100} D = \frac{2}{100} 13,9 = 0,28.$$

2.4.3.6 Ентальпія котлової води при тиску в барабані  $P_{б.} = 4,32$  МПа, кДж/кг

$$h_{к.в.} = 1109.$$

2.4.3.7 Тепло, яке використовується в котельній установці корисно, МВт

$$\begin{aligned} Q_{к.у.} &= D(h_{п.п.} - h_{п.в.}) + D_{пр}(h_{к.в.} - h_{п.в.}) = \\ &= [13,9(3174 - 613) + 0,28(1109 - 613)] \cdot 10^{-3} = 35,84. \end{aligned}$$

2.4.3.8 Витрата палива котельною установкою, кг/с

$$B = \frac{Q_{к.у.}}{Q_p^p} \cdot \frac{100}{\eta_{к.у.}} = \frac{35,84 \cdot 100}{8,46488,56} = 1,78.$$

2.4.3.9 Розрахункова витрата палива, кг/с

$$B^p = B \frac{100 - q_4}{100} = 1,78 \frac{100 - 1}{100} = 1,73.$$

## 3 ВИБІР ТА РОЗРАХУНКИ ПАЛЬНИКІВ

### 3.1 Визначення теплопродуктивності пальника

Згідно опису котельної установки [8], для якої розраховується горіння палива, рекомендована кількість пальників та місце їх розташування. Теплопродуктивність пальника визначається, МВт

$$Q_{\Gamma} = 1,45 \frac{B^p \cdot Q_{\text{H}}^p}{n} \cdot 10^{-3},$$

де  $B^p$  - розрахункова витрата палива, кг/с; м<sup>3</sup>/с;

$Q_{\text{H}}^p$  ( $Q_{\text{H}}^c$  – для газоподібного палива) – теплота згоряння палива, кДж/кг; кДж/м<sup>3</sup>;

$n$  – кількість пальників, шт..

### 3.2 Технічні характеристики пальників

В пиловугільних топках котельних установок застосовуються круглі вихрові пальники ТКЗ-ЦКТИ [Додаток Г, рис. Г.1] та ОРГРЕС [Додаток Г, рис.Г.2].

Пальники типу ГУ-І конструкції ТКЗ – ЦКТИ призначені для спалювання пилу всіх видів вугілля, окрім АШ і Т. Внутрішня та середня труби на виході пальників мають циліндричні насадки. Розпалювальна мазутна форсунка встановлюється у внутрішній трубі.

Пальники типу ГУ-ІІ конструкції ТКЗ-ЦКТИ призначені для спалювання вугілля АШ і Т.

Пальники типу ГО конструкції ОРГРЕС призначені для спалювання всіх видів вугілля. Первинне повітря подається аксіально, без закручування. Розкриття потоку первинного повітря досягається за допомогою спеціального конуса, який встановлено на валу.

Пальники кожного типу бувають правими і лівими в залежності від напряму закручування повітря.

Газомазутні пальники ГМГ призначені для спалювання газоподібного палива та мазуту [Додаток Г, рис.Г.3]. Регістри вторинного та первинного повітря представляють собою лопаткові апарати з прямими лопатками, що встановлені під кутом 45 град., і

служать для закрутки потоків повітря. Ці реєстри бувають лівого і правого обертання.

Технічні характеристики пиловугільних круглих пальників ТКЗ – ЦКТІ (пальники типу ГУ) приведені в таблиці 3.3; ОРГ РЕС (пальники типу ГО) – в таблиці 3.1.

Габаритні та приєднувальні розміри пальників ГМГ вказані в таблиці 3.2. Технічні характеристики пальників ГМГ приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики пиловугільних круглих пальників ОРГРЕС (пальники типу ГО)

№ пал ник а	Первинне повітря		Вторинне повітря		Діа ме тр ам бра - зу ри $D$ , мм	Довжи на паль ника $L$ , мм	Розмі ри плити $П \times П$ , мм	Орієн товна тепло проду к тивніс ть $Q_r$ , МВт
	діамет р вхідно го перети ну $d$ , мм	вихі д ний пер е тин, $m^2$	розмір и вхідно го перети ну $axb$ , мм	вихід ний перети н, $m^2$				
3	310	0,17	700x 350	0,31	715	3067	1100x 1100	17... 26
2	390	0,27	950x 450	0,42	835	3112	1560x 1560	23... 25
1	430	0,31	1650x 540	0,59	990	3227	1560x 1560	35... 47

Таблиця 3.2 - Габаритні та приєднувальні розміри пальників ГМГ, мм

Тип пальника	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$L$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$h_1$	$h_2$
ГМГ-1/1,5	244	108	276	942	310	195	300	520	180	250
ГМГ-2	265	108	276	933	301	195	300	520	180	250
ГМГ-4	365	363	375	1161	428	255	417	600	235	360
ГМГ-5,5/7	420	420	432	1291	525	285	495	600	260	427

Таблиця 3.3–Технічні характеристики пиловугільних круглих пальників ТКЗ – ЦКТІ (пальники типу ГУ)

№ пальника	Первинне повітря		Вторинне повітря		Діаметр, мм		Довжина пальника, мм	Розміри плити $l \times l$ , мм	Орієнтовна теплопродуктивність $Q_T$ , МВт
	Розміри вхідного перетину $vxz$ , мм	вихідний перетин, $m^2$	розміри вхідного перетину $axb$ , мм	вихідний перетин, $m^2$	центральної труби $d$	амбразури $D$			
<b>Тип ГУ-I- Л (ОН-124-59), ГУ-I -П (ОН-125-59)</b>									
11	350x230	0,065	700x350	0,220	325	700	1966	1100x1100	12...17
10	370x250	0,094	700x350	0,350	219	800	1986	1560x1560	14...19
9	370x250	0,073	700x350	0,350	273	800	1986	1560x1560	14...19
8	450x330	0,113	700x350	0,282	325	800	2066	1560x1560	17...23
7	450x330	0,158	700x350	0,282	219	800	2066	1560x1560	17...23
6	450x330	0,183	950x450	0,256	219	800	2316	1560x1560	21...26
5	370x250	0,094	950x450	0,484	219	900	2236	1560x1560	23...29
4	370x250	0,073	950x450	0,484	273	900	2236	1560x1560	23...29
3	450x330	0,158	950x450	0,415	219	900	2316	1560x1560	29...35
2	450x280	0,113	950x450	0,415	325	900	2316	1560x1560	29...35
1	450x330	0,158	1050x540	0,564	219	1000	2416	1560x1560	35...41
<b>Тип ГУ-II- Л (ОН-126-59), ГУ-II -П (ОН-127-59)</b>									
4	350x230	0,062	700x350	0,185	219	580	1966	1100 x1100	12...17
3	370x250	0,111	700x350	0,330	219	760	1986	1560x1560	17...23
2	450x330	0,186	1050x540	0,530	219	950	2416	1560x1560	23...25
1	450x330	0,229	1050x540	0,682	219	1070	2416	1560x1560	35...47

Таблиця 3.4- Технічні характеристики пальників ГМГ

Характеристика	Один. вимір у	ГМГ-1/1,5		ГМГ -2	ГМ Г-4	ГМГ-5,5/7	
		I	II			I	II
Номінальна теплопродуктивність	МВт	1	1,6	2,3	4,7	6,5	8,1
Діапазон регулювання відносно номінальної теплопродуктивності	%	30... 100	30 ... 100	20 ... 100	20 ... 100	15 ... 100	15 ... 100
Тиск повітря: -первинного	даПа	35	35	120	120	120	120
-вторинного	даПа	40	85	120	120	80	120
Витрата повітря	м <sup>3</sup> /год	1200	1700	2700	5400	800	10000
В'язкість мазуту перед форсункою	°IV	3 ...4	3 ...4	3 ...4	3 ...4	3 ...4	3 ...4
Тиск мазуту при номінальній теплопродуктивності	МПа	0,6	1,2	2	2	3	3
Тиск газу з теплою згоряння 36 МДж/м <sup>3</sup>	даПа	150	300	300	300	200	300
Тиск пари, що розпилює	МПа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1 ... 0,2	0,1 ... 0,2

### 3.3 Рекомендації щодо кількості пальників та розміщення їх на стінах топки

Кількість основних вихрових пальників, що встановлюються в котельній установці, залежить від її паропродуктивності та способу розміщення пальників на стінах топки.

В агрегатах паропродуктивністю  $D < 50$  т/год. пальники зазвичай розміщують на фронтівій стіні топки в один ряд чи по трикутнику. В агрегатах паропродуктивністю  $D \geq 50$  т/год. крім фронтального використовується зустрічне розміщення пальників на бічних стінах топки.

В таблиці 3.6 надані рекомендації по вибору кількості основних вихрових пальників та способу їх розміщення на стінах топки. Рекомендації по розміщенню пальників на стінах топки надані в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розміщення вихрових пиловугільних та газомазутних пальників на стінах топки

Обумовлені розміри	Шлаковидалення в топці	Відносна відстань, $l/d_a^1$
1	2	3
1. Від вісі нижнього ряду пальників до початку скату воронки: - при однорядному та дворядному розміщеннях пальників	тверде	2...2,5
	рідке	1,8...2,0
- при розміщенні пальників по трикутнику вершиною вниз	тверде	2,0...2,5
	рідке	0,8...1,0
2. Від вісі крайніх пальників до прилеглих стін: - при однорядному розміщенні пальників	тверде	2,2...2,4
	рідке	1,6...1,8
- при дворядному	тверде	3,0...3,5
	рідке	2,0...2,2

Продрвження таблиці 3.5

1	2	3
3. Між вісями пальників по горизонталі: - при однорядному розміщенні пальників	тверде	2,2...2,4
	рідке	2,2...2,4
- при дворядному	тверде	3,0...3,5
	рідке	2,5...3,0
4. Між вісями пальників по вертикалі: - при дворядному розміщенні пальників	тверде	3,0...3,5
	рідке	2,5...3,0
- при розміщенні пальників по трикутнику вершиною вниз	тверде	2,0...2,5
	рідке	1,5...1,7

Таблиця 3.6 – Кількість основних вихровихпиловугільних тагазомазутних пальників

Паропродуктивність агрегату $D$ , т/год.	Розміщення пальників	Кількість пальників, шт.	
		пиловугільних	газомазутних
< 20	Однорядне	-	2...3
	По трикутнику	-	3
20...35	Однорядне	2	2...3
	По трикутнику	-	3
	Дворядне	-	4
	Зустрічне	2...4	2...4 <sup>2</sup>
50...75	Однорядне	2...4	3...4
	По трикутнику	3	3
	Дворядне	4	4...6
	Зустрічне	4	4...6

<sup>1</sup> $l$  - відстань, мм;

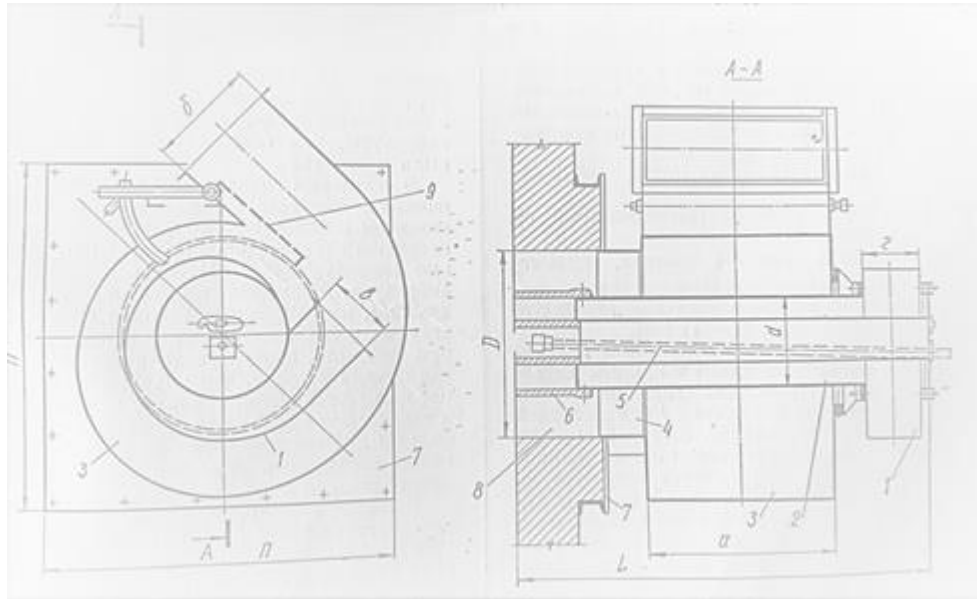
$d_a$  - діаметр амбразури пальника, мм.

<sup>2</sup>В агрегаті Е-25 по одному пальнику на бічних стінах

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

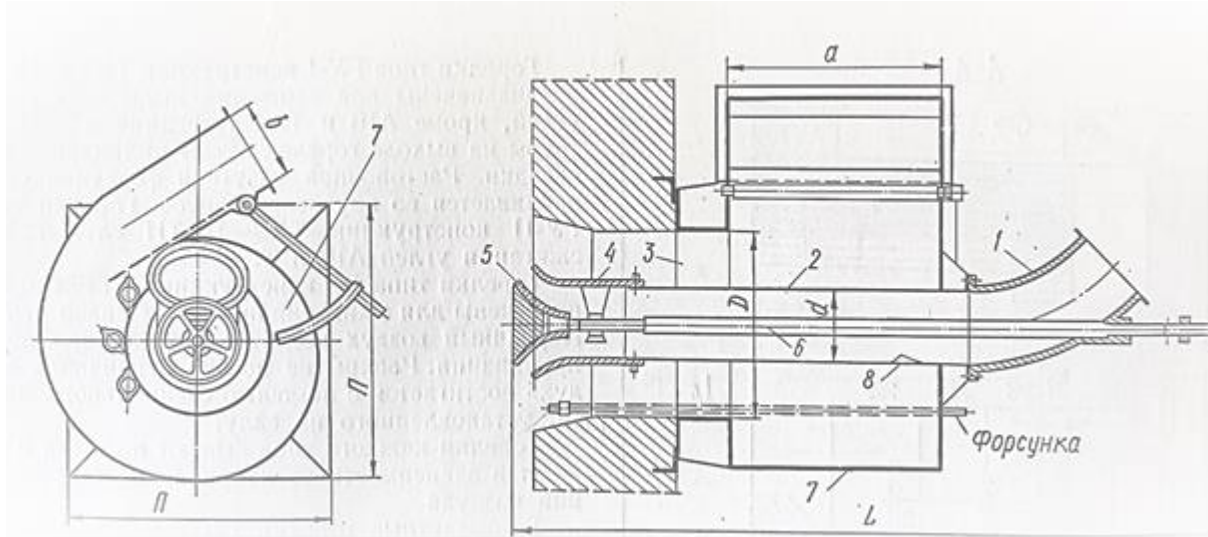
1. Тепловой расчет промышленных парогенераторов: учеб. пособие / Частухин В.И., Заречанский Е.Л., Константинов С.М. и др.; под. общ. ред. В.И. Частухина. Киев: Вища школа. 1980. 184 с., илл.
2. Частухин В.И., Частухин В.В. Топливо и теория горения. Киев: Вища школа, 1989. 223 с.
3. Прокоф'єв О.І., Шмаль Т.М. та ін. Посібник з теорії горіння. Львів: НУ «ЛП», 2002. 108 с.
4. Мисак І.С., Гнатишин Я.М., Івасик Я.Ф. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив. Львів: НУ «ЛП», 2002. 98 с.
5. Костюк О.П. Паливо та обладнання для його спалювання: навч. посібн. Рівне: НУВГП, 2011. 121 с.
6. Пономаренко С.М. Основи фізики горіння: навч. посібн. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 85 с.
7. Павловський В.Г. Термодинаміка фізико-енергетичних процесів: навч. посібн. Харків: НТУ «ХПІ», 2009. 332 с.

## Додаток А



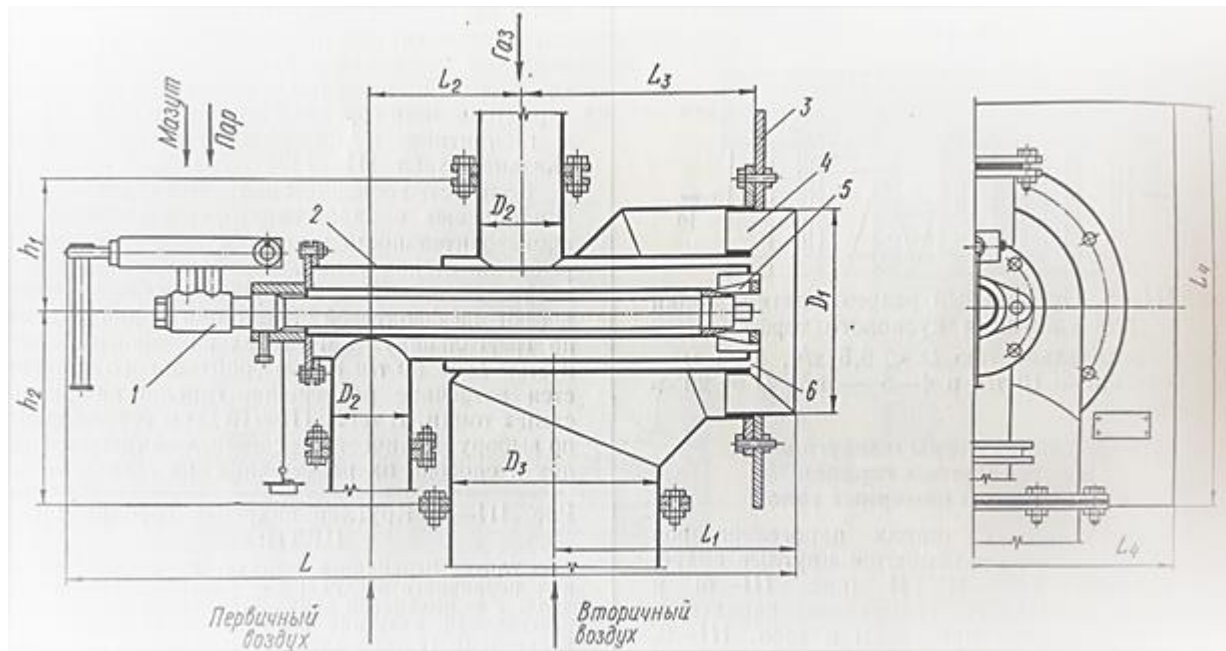
1-равлик первинного повітря; 2-кільцевий канал первинного повітря; 3-равлик вторинного повітря; 4-кільцевий канал вторинного повітря; 5-розпалювальна мазутна форсунка; 6-жаростійкий наконечник труби пилоповітряної суміші; 7-опорна плита; 8-амбразура пальника; 9-шибер.

Рисунок А.1- Круглий вихровий пальник ТКЗ-ЦКТП



1-вхідний патрубок пилоповітряної суміші; 2-труба пилоповітряної суміші; 3-кільцевий канал вторинного повітря; 4-чавунний наконечник; 5-конус; 6-шпindel конуса; 7-равлик вторинного повітря; 8-поріг.

Рисунок А.2- Круглий вихровий пальник ОРГРЕС



1-паромеханічна форсунка; 2-газоповітряна частина; 3-монтажна плита; 4-регістр вторинного повітря; 5-регістр первинного повітря; 6-отвори для виходу газу.

Рисунок А.3—Газомазутний пальник ГМГ

