

## 2 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ТА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНСИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВИРОБНИЧИХ АГРЕГАТІВ

Оцінка ефективності використання тепла в установках, незалежно від їх складності, до останнього часу ґрунтувалася на застосуванні першого закону термодинаміки (енергетичний баланс), що відображає кількісну сторону теплових процесів у цих установках.

Діаграма Сенкі є конкретним типом діаграми потоку, в якому амплітуда стрілок малюється в манері, пропорційне величині потоку. Вона зазвичай використовується для позначення передач енергії, матеріалів, витрат або даних в процесі. Приклад діаграми наведено на рисунку 1.4 та рисунку 2.1.

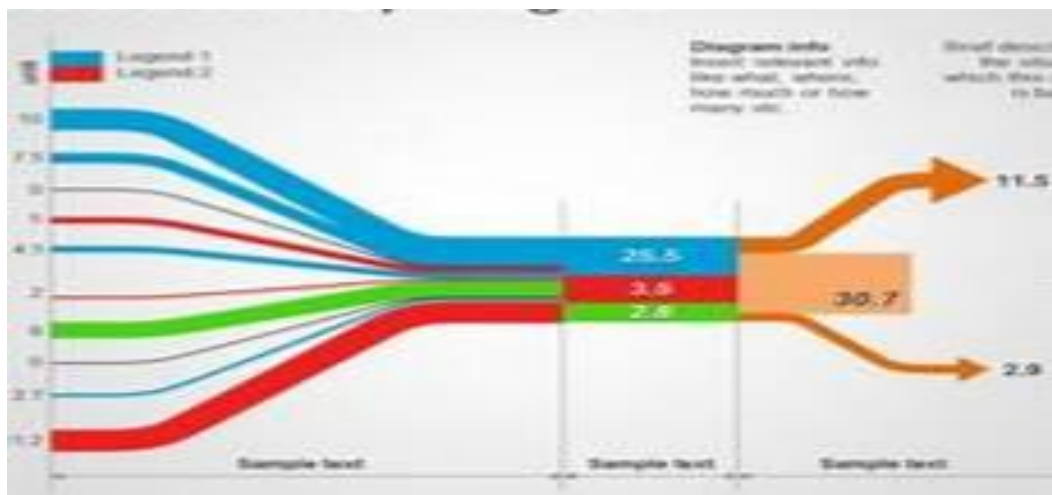


Рисунок 2.1 – Діаграма Сенкі для виробничого процесу

Аналіз роботи тепловикористовуючих установок з урахуванням якісних відмінностей розташовуваних енергоресурсів і незворотності реальних робочих процесів на основі спільного використання першого і другого законів термодинаміки отримав назву ексергетичного. Ексергетичний аналіз враховує не тільки кількісні, а й якісні характеристики наявних енергоресурсів у різних елементах комбінованої установки, ступінь їх досконалості і незворотності окремих процесів, що протікають в цих елементах і в установці в цілому. Під комбінованою установкою розуміємо

установку, що складається з основного технологічного агрегату, що є джерелом виробничих відходів тепла, і елементів, що використовують ці відходи.

Зв'язки, що встановлюються при ексергетичному аналізі між термодинамічними характеристиками і техніко-економічними показниками аналізованої системи, дають можливість оцінити ефективність її роботи, а також визначити шляхи і способи вдосконалення. Об'єктивність одержуваних при такому аналізі оцінок обумовлена тим, що вони засновані на розрахунку мінімально необхідних матеріальних і енергетичних витрат на реалізацію досліджуваного технологічного процесу. В основі ексергетичного аналізу лежить поняття ексергії. Розрізняють два види ексергії: ексергію таких форм енергії, які не визначаються ентропією, і ексергію потоків речовини і енергії, які характеризуються ентропією. До перших відносяться механічні, електричні, електромагнітні та інші види енергії; до других належать форми енергії (наприклад, внутрішня енергія речовини, енергія хімічних зв'язків, теплового потоку).

Ексергія речовини в замкнутому об'ємі з термодинамічними параметрами  $U, S, T, p$  і  $V$  визначається співвідношенням

$$e_v = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0), \quad (3.17)$$

де  $e_v$  - питома (на одиницю маси) ексергія речовини;

$U_c, S_0, T_0, p_0, V_0$  - внутрішня енергія, ентропія, температура, тиск і об'єм речовини при повній рівновазі аналізованої системи з навколишнім середовищем.

Формула виражає ексергію речовини в замкнутому об'ємі в процесі, що завершується вирівнюванням відповідних параметрів системи і середовища. При розрахунках ексергії робочого тіла (носія ексергії) в замкнутій системі в двох різних станах рівняння приводиться до виду:

$$\Delta e_v = \Delta U - T_0 \Delta S + p_0 \Delta V, \quad (3.18)$$

де  $\Delta U, \Delta S, \Delta V$  - зміни параметрів речовинами при переході з одного стану в інший.

Необхідність визначення ексергії в замкнутому об'ємі виникає найчастіше при розрахунках періодичних процесів и установок періодичної дії, в яких робоче тіло не виходить за межі даної системи. Однак на практиці більшість хімічно-технологічних процесів неперервні, стаціонарного та супроводжуються переміщеннями матеріальних та енергетичних потоків. Тому такі завдання пов'язані з визначенням ексергії речовини в потоці. Її термомеханічні складові знаходять за формулою:

$$e_{\tau} = q - T_0(S - S_0), \quad (3.19)$$

$q$  - питомий тепловий потік, який переноситься речовиною;

$S$  - ентропія речовини в потоці.

Для ідеальних газів термомеханічної ексергії визначається виразом

$$e_{\tau} = c_p (T - T_0) - T_0 [c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)] - R \ln\left(\frac{p}{p_0}\right), \quad (3.20)$$

де  $C_p$  - питома теплоємність речовини;

$p$  і  $T$  - тиск і температура речовини в потоці;

$R$  - газова постійна.

Хімічну складову ексергії, пов'язану з термодинамічними параметрами хімічної реакції, розраховують, використовуючи різні напівемпіричні співвідношення. Так, для газів і рідин встановлені співвідношення між їх хімічною ексергією і вищою теплотою згорання наприклад, у процесах випарювання, ректифікації та сушіння ексергію палива знаходять за формулою:

$$e_x = K Q_B^{CF}, \quad (3.21)$$

де коефіцієнт  $K$  дорівнює 0,975 (гази) і 0,95 (рідини), якщо в молекулі речовини міститься більше одного атома С.

Для інших речовин, наприклад газів, можна прийняти наступне значення  $K: 0,97$  (генераторний газ),  $0,98$  (колошниковий газ),  $1,0$  (коксівий газ),  $1,04$  (природний газ).

У випадку твердих палив з урахуванням вмісту вологи  $W$  хім. ексергію можна з достатньою для практичних цілей точністю прийняти рівною їх  $Q_B^{ce}$ , тобто,

$$e_x = (1 - W)Q_B^{ce}. \quad (3.22)$$

Температура палива зазвичай близька до температури навколишнього середовища, тому необхідність брати до уваги в розрахунках їх термомеханічну ексергію не виникає; виняток становить важке рідке паливо (мазут), яке для зниження його в'язкості, як правило, підігрівають до  $70-100$  °С.

**Ексергія теплового потоку.** Функціонування промислових систем виробництва в тій чи іншій мірі обумовлено обміном енергією з навколишнім середовищем. При передачі енергії від одного тіла до іншого або до середовища у формі теплового потоку зменшується його максимально роботоможливість. Якщо приймачем теплоти служить навколишнє середовище з температурою  $T_0$ , питома ексергія теплового потоку, що має температуру  $T$ , становить

$$e = q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right). \quad (3.23)$$

**Ексергетичні діаграми.** Вельми корисні і досить інформативні для аналізу ефективності функціонування промислових систем є ексергетичні діаграми, або діаграми Грассмана, на яких потоки ексергії в системі зображені в певному масштабі по "ширині", пропорційної їх чисельним значенням. Діаграми наочно показують втрати ексергії в системі, місця їх появи і перерозподілу між елементами даного об'єкта. На рисунку 3.2 наведена така діаграма з двома вхідними матеріальними потоками, яким відповідають ексергії  $E'_1$  і  $E'_2$ . У результаті взаємодії цих потоків на виході з системи отримують цільові продукти з ексергією  $E''_2$  і  $E''_3$  і побічний продукт

з ексергією  $E_1'' = \Delta E_{o.c.}''$ . Сума  $E_2'' + E_3''$  менше сумарної ексергією вхідних потоків на величину  $\Delta E_m''$  (обумовлені необоротністю тепло - і масообміну в системі) і зовнішніх втрат  $\Delta E_{o.c.}''$  у навколишнє середовище.

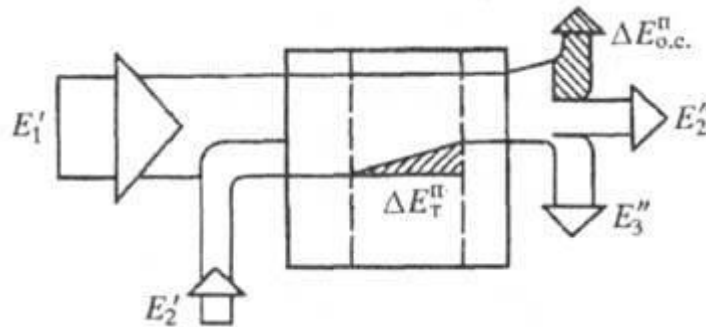


Рисунок 1.2 - Діаграма Грассмана для з двома вхідними матеріальними потоками

Ексергетичний ккд системи. Діаграми Грассмана і безпосередньо ексергетичний баланс у формі рівняння дозволяють знайти кількість, показники ефективності роботи аналізованої ХТМ. Серед цих показників найбільш поширений ексергетичний ккд визначається співвідношенням

$$\eta_e = \sum E_{пз} / \sum E_3 = (\sum E_3 - \sum \Delta E_{o.c.}) / \sum E_3, \quad (3.24)$$

де  $\sum E_{пз}$  - сума потоків ексергії, що відображає корисний ефект від функціонування системи;

$\sum E_3$  - повні витрати ексергією на досягнення заданого ефекту.

Для ідеального, повністю оборотного процесу, в якому втрати  $\Delta E_{o.c.}''$  відсутні,  $\eta_e = 1$ ; якщо підведена ексергія повністю втрачається в процесі, то  $\eta_e = 0$ . У реальних процесах завжди дотримується нерівність:  $0 < \eta_e < 1$ ; при цьому чим вище чисельне значення  $\eta_e$ , тим термодинамічно досконаліше система. З формули випливає також, що різниця між ексергією, які зумовлюють корисний ефект і ексергетичні витрати, завжди дорівнює сумарній втраті ексергії від незворотності що протікають в системі процесів .

Ексергетичний ккд носить узагальнений характер. Конкретне вираження для  $\eta_g$  залежить від призначення і особливостей аналізованого процесу та видів взаємодії потоків.

Рівняння енергетичного балансу,

$$Q_{X.T} + Q_{\phi.M} + Q_{\phi.G} + Q_{ЭКЗ} = Q_{T.П} + Q_{ЭНД} + Q_{T.O} + Q_{O.C} + Q_{ОТХ} + Q_{T.Y}, \quad (3.25)$$

де  $Q_{X.T}$  - хімічно пов'язане тепло палива;

$Q_{\phi.M}$  - фізичне тепло вихідних технологічних матеріалів;

$Q_{\phi.G}$  - фізичне тепло компонентів горіння;

$Q_{ЭКЗ}$  - тепло екзотермічних реакцій завантажуваних матеріалів;

$Q_{T.П}$  - тепло технологічного продукту ;

$Q_{ЭНД}$  - тепло ендотермічних реакцій завантажуваних матеріалів;

$Q_{T.O}$  - тепло технологічних відходів;

$Q_{O.C}$  - відвід тепла в навколишнє середовище ;

$Q_{ОТХ}$  - відведення тепла та відходять продуктами згорання;

$Q_{T.Y}$  - тепло нагріву транспортних пристроїв.

Рівняння ексергетичного балансу,

$$E_T + E_{\phi.K} + E_{\phi.M} + E_{ЭКЗ} = E_M + E_{ЭНД} + E_{T.O} + \\ + E_{ГОР} + E_{O.C} + E_{T/O} + E_{ОТХ}, \quad (3.26)$$

де  $E_T = Ve_T$  - ексергія палива , кДж / с ( $V$  - витрата палива , м<sup>3</sup> / с ( кг / с);

$e_T$  - питома ексергія палива кДж/м<sup>3</sup> (кДж/кг). Наближено  $e_T \cong Q_H^P$  - теплоті згорання палива)

$E_{\phi.K}$  - фізична ексергія компонентів горіння ;

$$E_{\phi.K} = E_{\phi.V3} + E_{\phi.G} = B(V_{V3}e_{\phi.V3} + e_{\phi.G}), \quad (3.27)$$

( $V_{V3}$  - витрата повітря для спалювання одиниці палива , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (м<sup>3</sup>/кг) );

$e_{\phi.B3}$ ,  $e_{\phi.\Gamma}$  - питома ексергія, відповідно, нагрітого повітря і газового палива;  
 $E_{\phi.B3}$ ,  $E_{\phi.\Gamma}$  - фізична ексергія повітря і газового палива відповідно);  
 $E_{\phi.M}$  - фізична ексергія компонентів шихтових матеріалів, що надходять в агрегат.

$$E_{\phi.M} = \sum (G_{M_i} e_{M_i}), \quad (3.28)$$

де  $G_{M_i}$  - масова витрата  $i$ -го компонента шихтових матеріалів, кг/с;

$e_{M_i}$  - питома ексергія  $i$ -го компонента шихтових матеріалів;

$E_{ЭКЗ}$  - ексергія екзотермічних реакцій компонентів шихтових матеріалів;

Рівність  $e_T = Q_H^P$  справедлива лише для вугілля, метану, коксового і світильних газів; для рідкого палива  $e_T = 0,975 Q_H^P$ ; для газів, що мають більше одного атома вуглецю,  $e_T = 0,95 Q_H^P$

$$E_{ЭКЗ} = \sum (G_{M_i} e_{ЭКЗ_i}), \quad (3.29)$$

$e_{ЭКЗ_i}$  - питома ексергія екзотермічної реакції  $i$ -го компонента шихтових матеріалів);

$E_M$  - витрата ексергії для нагріву шихтових матеріалів;

$E_{ЭНД}$  - ексергія ендотермічних реакцій компонентів шихтових матеріалів

$$E_{ЭНД} = \sum (G_{M_i} e_{ЭНД_i}), \quad (3.30)$$

$e_{ЭНД_i}$  - питома ексергія ендотермічної реакції  $i$ -го компонента шихтових матеріалів;

$E_{T.O} = G_{T.O} e_{T.O}$  - витрата ексергії на нагрів технологічних відходів;

$G_{T.O}$  - масова витрата технологічних відходів;

$e_{T.O}$  - питома ексергія технологічних відходів;

$E_{ГОР}$  - втрата ексергії через незворотного процесу горіння палива.

$$E_{ГОР} = B(e_T + V_{B3} e_{\phi.B3} - V_{П.С} e_{П.С}), \quad (3.31)$$

$V_{П.С}$  - витрата продуктів згорання при спалюванні одиниці палива,  $\text{м}^3/\text{м}^3(\text{м}^3/\text{кг})$ ;

$e_{п.с}$  - питома ексергія продуктів згорання , кДж/м<sup>3</sup>;

$E_{o.c}$  - втрата ексергії в камері печі внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем.

$$E_{o.c} = Q_{o.c} \left( 1 - \frac{T_o}{\bar{T}_{п.с}} \right), \quad (3.32)$$

$Q_{o.c}$  - сумарний відвід тепла в навколишнє середовище , приймається з енергетичного балансу , кДж/с;

$T_o$  - температура навколишнього середовища, К;

$\bar{T}_{п.с}$  - середня термодинамічна температура продуктів згорання, К.

$$\bar{T}_{п.с} = \frac{T_{ГОР.Г} - T_{ОТХ}}{\ln \frac{T_{ГОР.Г}}{T_{ОТХ}}}; \quad T_{ГОР.Г} = \frac{Q_H^P + Q_\Phi}{V_{п.с} C_{п.с}}, \quad (3.33)$$

де  $T_{ГОР.Г}$  - температура горіння палива при гарячих компонентах , К;

$T_{ОТХ}$  - температура продуктів згорання на виході з робочої камери печі , К;

$E_{T/O}$  - втрата ексергії внаслідок теплообміну продуктів згорання з нагрівається матеріалом.

$$E_{T/O} = E_{п.с}^{BX} - E_{п.с}^{BЫX} - E_M - E_{o.c} = BV_{п.с} (e_{п.с}^{BX} - e_{п.с}^{BЫX}) - E_M - E_{o.c}, \quad (3.34)$$

$E_{ОТХ}$  - втрата ексергії та відходять продуктами згорання.

Величину  $V_{п.с}$  можемо використовувати тільки в разі розрахунку закритою камерної печі , в якій обсяг продуктів згорання залишається постійним. В інших випадках використовуємо різницю ( $E_{п.с}^{BX} - E_{п.с}^{BЫX}$ ).

$$E_{ОТХ} = BV_{п.с} e_{п.с}^{BЫX}, \quad (3.35)$$



де  $e$  - питома ексергія системи або потоку.

У загальному випадку

$$e = i - i_0 - T_0(s - s_0), \quad (3.36)$$

де  $i$  - ентальпія і  $s$  - ентропія відносяться до параметрів стану системи або потоку; індекс «нуль» позначає стан системи або потоку в рівновазі з навколишнім середовищем;  $T_0 = 273 + (15 - 20)$ , К.

Значення ентропії у формулі приймаються за довідковими матеріалами. При відсутності даних різниця ентропії можна наближено визначити,

$$s - s_0 = C_{P_M} 2,31g \frac{T}{T_0} = C_{P_M} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right), \quad (3.37)$$

де  $C_{P_M}$  - середня ізобарна теплоємність при значенні (  $T - 273$  ) даної речовини, кДж / (м<sup>3</sup> · К).

### Практичне завдання №2

Задача 2.1. Розрахувати енергетичний та ексергетичний баланси прокатної печі для нагрівання сталевих заготовок.

Маса металу, що нагрівається,  $G_M$ , кг/с, його температура: при подаванні  $T'_M = 288$  К, при видачі  $T''_M$ , угар металу  $y$ , %.

Паливо-коксодоменний газ з  $Q_H^P$ , витрата газу  $B = 15,8$  м<sup>3</sup>/с. Склад продуктів згорання ( $y$  % по об'єму): CO<sub>2</sub>=13,2; H<sub>2</sub>O=15; N<sub>2</sub>=70,4; O<sub>2</sub>=1,4. Витрата продуктів згорання  $V_{пс} = 2,442$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, витрата повітря  $V_{вз} = 1,628$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Температура повітря: холодного  $T'_{вз}$ , К, нагрітого  $T''_{вз}$ , К. Витрата охолоджуючої води  $G_в = 83$  кг/с, її температура: на вході  $T'_в = 283$ , К, на виході  $T''_в$ , К. Температура печі  $T_n = 1603$  К, температура внутрішньої поверхні кладки  $T_{кл}$ , К.

### Теоретична частина.

#### *Розрахунок енергетичного балансу.*

Наведемо приклад розрахунку енергетичного балансу.

Печі безперервної дії (наприклад, нагрівальні методичні, кільцеві, секційні) характеризуються постійним у часі температурним режимом. Для таких печей тепловий баланс відноситься до одиниці часу і виражається рівнянням, що зв'язує часовий прихід і витрата теплоти, тобто Для початку запишемо його в загальному вигляді

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}$$

Прихід теплоти складається з наступних статей , МВт :

- хімічної теплоти палива  $Q_{\text{хт}}$  ;
- теплоти , що вноситься підігрітим повітрям  $Q_{\text{ф.в}}$  ;
- теплоти екзотермічних реакцій (окислення металу )  $Q_{\text{екз}}$  ;
- разом прихід теплоти  $Q_{\text{прих}}$  .

Витрата теплоти складається з наступних статей , МВт :

- теплоти , витраченої на нагрів металу (корисна теплота )  $Q_{\text{м}}$ ;
- втрат фізичної теплоти з продуктами горіння , що йдуть з робочого простору печі  $Q_{\text{ух}}$ ;
- втрат теплоти теплопровідністю через кладку  $Q_{\text{кл}}$ ;
- втрат теплоти на нагрів охолоджуючої води  $Q_{\text{охл}}$ ;
- втрат теплоти з окалиною і шлаком  $Q_{\text{то}}$ ;
- разом витрата теплоти  $Q_{\text{расх}}$ ;

Розпишемо для теплоти приходу і витрати їх складові

$$Q_{\text{хт}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{екз}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{то}},$$

де  $Q_{\text{хт}}$  - хімічна теплота палива;

$Q_{\text{фв}}$  - відповідно фізична теплота повітря (вноситься з підігрітим повітрям);

$Q_{\text{екз}}$  - теплота окислення заліза;

$Q_{\text{м}}$  - теплота, витрачена на нагрівання металу (корисна теплота);

$Q_{\text{ух}}$  - втрати теплоти з газами;

$Q_{\text{охл}}$  – втрата теплоти на нагрів охолоджуючої води;

$Q_{кл}$  - відповідно втрати теплоти через кладку;

$Q_{мо}$  - втрата теплоти на нагрів технологічного відходу (окалини).

Розрахунок прибуткової частини теплового балансу

Хімічне тепло палива будемо одно, кВт

$$Q_{хт} = BQ_H^P$$

Фізичне тепло внесене повітрям розрахуємо за формулою, кВт

$$Q_{фв} = BV_{вз}i_{вз},$$

де  $i_{вз}$  - ентальпія повітря при температурі  $T_{вз}''$ , обумовлена з таблиці 2.1.

Таблиця 4.1 – Ентальпії повітря, газів і золи

$\vartheta, ^\circ \text{C}$	$(c\vartheta)_{\text{в}}$	$(c\vartheta)_{\text{CO}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{N}_2}$	$(c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c\vartheta)_{\text{зл}},$ кДж/кг
	кДж/м <sup>3</sup>				
30	39				
100	132	169	130	151	81
200	266	357	260	304	169
300	403	559	392	463	264
400	542	772	527	626	360
500	684	996	664	794	458
600	830	1222	804	967	561
700	979	1461	946	1147	663
800	1130	1704	1093	1335	768
900	1281	1951	1243	1524	874
1000	1436	2202	1394	1725	984
1100	1595	2457	1545	1925	1096
1200	1754	2717	1695	2131	1206
1300	1931	2976	1850	2344	1360
1400	2076	3240	2009	2558	1571
1500	2239	3504	2164	2779	1758
1600	2403	3767	2323	3001	1830
1700	2566	4035	2482	3227	2066
1800	2729	4303	2642	3458	2184
1900	2897	4571	2805	3688	2385
2000	3064	4843	2964	3926	2512

2100	3239	5115	3127	4161	2640
2200	3399	5387	3290	4399	2760

Теплота екзотермічної реакції дорівнює, кВт,

$$Q_{\text{екз}} = 5,65 \cdot G_{\text{м}} \cdot \frac{y}{100},$$

Таким чином маємо, кВт,

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{хт}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{екз}}.$$

Розрахунок видаткової частини теплового балансу  
Теплота, що витрачається на нагрівання металу буде знайдена за формулою, кВт,

$$Q_{\text{м}} = \frac{100-y}{100} G_{\text{м}} (i_{\text{кон.м}} - i_{\text{нач.м}}),$$

де  $i_{\text{кон.м}}$ ,  $i_{\text{нач.м}}$  – відповідно кінцева і початкова ентальпії металу, кДж/кг,

$$i_{\text{кон.м}} = c_{\text{кон.м}} T_{\text{м}}'',$$

$$i_{\text{нач.м}} = c_{\text{нач.м}} T_{\text{м}}',$$

де  $c_{\text{кон.м}}$ ,  $c_{\text{нач.м}}$  - відповідно початкові і кінцеві теплоємності металу, кДж/(кг К), визначаються з таблиці 2.2

Таблиця 4.2 - Теплофізичні властивості сталі 45Х залежно від температури

t, °C	0	200	400	600	800	1000
$\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> К)	44,2	42	37,6	33,1	30	30
c, кДж/(кг К)	-	0,48	0,52	0,571	0,686	0,692
i, кДж/кг	-	95,9	208,1	342,5	548,7	692,4

Деякі значення з таблиць визначаються за допомогою екстраполяції, тобто визначення значення функції за межами відомого діапазону значень аргументів. Вона виражається формулою,

$$y_{\text{иск}} = y_1 - \frac{x_1 - x_{\text{данное}}}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1).$$

Теплота, що відводиться газами, кВт,

$$Q_{\text{ух}} = B i_{\text{ух}} V_{\text{псг}} \cdot 4,19,$$

де  $i_{CO_2}, i_{N_2}, i_{H_2O}, i_{O_2}$  - ентальпії продуктів згорання при температурі відхідних газів ,

4,19 – коефіцієнт для перерахунку ентальпії з ккал / кг в кДж / кг.

$T_{yx}$  - визначається з таблиці задачі 1.1.

$V_{CO_2}, V_{N_2}, V_{H_2O}, V_{O_2}$  – об'ємні частки димових газів, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{CO_2} = \frac{CO_2}{100} V_{\text{пс}}$$

$$V_{N_2} = \frac{N_2}{100} V_{\text{пс}}$$

$$V_{H_2O} = \frac{H_2O}{100} V_{\text{пс}}$$

$$V_{O_2} = \frac{O_2}{100} V_{\text{пс}}$$

Втрати теплоти через кладку при стаціонарному стані, тобто після розігріву печі і при сталому режимі її роботи, можна визначити за такою формулою, кВт

$$Q_{\text{кл}} = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{вз}}}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} F,$$

де  $t_{\text{кл}}$ - середня температура внутрішньої поверхні кладки, обумовлена за відомим температурному режиму печі, °С;

$S$  – товщина відповідного шару, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності шару, Вт/(м К);

$t_{\text{вз}}=14$  °С – температура оточуючого повітря;

$\alpha =20$  Вт/(м<sup>2</sup> К) - – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні кладки в оточуючу середу, (м<sup>2</sup> К)/Вт;

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

Сума термічних опорів кладки, що складається з двох шарів: Матеріал №2 (обирається за  $n_1$ ) ( $\delta_1=0,25$ м) та Азбесту ( $\delta_2=0,1$  м), значення коефіцієнта теплопровідності яких вибираються з таблиці 2.3.

Таблиця 4.3 - Значення коефіцієнта теплопровідності, залежно від матеріалу і температури

$n_l$	Матеріал №1	$\lambda$ , Вт/(м К)
1	Магнезит	$6,15-0,00267t$
2	Дінас	$0,81+0,000755t$
3	Шамот	$0,7+0,00064t$
4	Червона цегла	$0,46+0,00051t$
5	Пористий шамот	$0,23+0,00023t$
6	Трепел	$0,12+0,00012t$
7	Діатомова цегла	$0,1128+0,00023t$
8	Совелітові плити	$0,079+0,00018t$
9	Діатоміт (порошок)	$0,0907+0,00028t$
0	Совеліт	$0,0901+0,00087t$

$$\lambda_{\text{асбеста}} = \lambda_2 = 0,0233 + 0,000186t_{\text{нар}},$$

де  $t = t_{\text{вн}}$  (для розрахунку  $\lambda_1$ ).

$$t_{\text{вн}} = \frac{t_{\text{кл}} + t_{\text{вз}}}{2},$$

$$t_{\text{нар}} = \frac{t_{\text{вн}} + t_{\text{вз}}}{2},$$

Втрати теплоти на нагрів охолоджуючої води, кВт,

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot \Delta T_{\text{в}}.$$

Втрати теплоти з технологічно відходом (окаліною), кВт,

$$Q_{\text{ок}} = m \cdot \frac{y}{100} \cdot G_{\text{м}} \cdot i_{\text{ок}} = m \cdot \frac{y}{100} \cdot G_{\text{м}} \cdot \bar{c}_{\text{ок}} \cdot (t_{\text{м}}'' - t_{\text{м}}'),$$

де  $\bar{c}_{\text{ок}}$  - теплоємність окаліни;  $\bar{c}_{\text{ок}} = 10^{-3}$  МДж/(кг К)

$$m = 1,38.$$

Таким чином, маємо, кВт,

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{то}}.$$

Знаючи значення за прибутковою та витратних частинах енергетичного балансу запишемо,

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}} + Q_{\text{неучт}},$$

$$Q_{\text{неучт}} = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{расх}}.$$

де  $Q_{\text{неучт}}$  – невраховані втрати – втрати тепла в робочому просторі, кВт.

Розрахунок ексергетичного балансу.

Запишемо рівняння енергетичного балансу,

$$E_{\Gamma} + E_{\text{вз}} + E_{\text{экз}} = E_{\text{м}} + E_{\text{ок}} + E_{\text{гор}} + E_{\text{ос}} + E_{\text{т/о}} + E_{\text{отх}}.$$

Розрахунок приходної частини ексергетичного балансу,

$$E_{\text{прих}} = E_{\Gamma} + E_{\text{вз}} + E_{\text{экз}},$$

де  $E_{\Gamma}, E_{\text{вз}}, E_{\text{экз}}$  - відповідно ексергії горіння палива, що підігрівається повітря, екзотермічних реакцій.

Ексергія горіння палива, кВт

$$E_{\Gamma} = B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}.$$

Ексергія підігріваємого повітря, кВт

$$E_{\text{вз}} = B \cdot V_{\text{вз}} \cdot \Delta e_{\text{вз}},$$

де  $\Delta e_{\text{вз}} = \Delta i_{\text{вз}} - T_0 \Delta S$  - різниця ексергій повітря на вході і виході, кДж/кг;

$T_0$  - температура, що дорівнює  $t'_{\text{вз}}$ , К;

$\Delta i_{\text{вз}} = i''_{\text{вз}} - i'_{\text{вз}}$ ;  $i''_{\text{вз}}, i'_{\text{вз}}$  - ентальпії повітря на вході і виході, кДж/кг, які визначаються відповідно за  $t''_{\text{вз}}$  и  $t'_{\text{вз}}$  [1];

$$\Delta S = c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} = c_p \cdot \ln \frac{T''_{\text{вз}}}{T'_{\text{вз}}}$$

$c_p$  - теплоємність повітря при температурі  $T''_{\text{вз}}$ , кДж/м<sup>3</sup> К (визначаємо із таблиці 2.1).

Ексергія екзотермічних реакцій,

$$E_{\text{экз}} = \frac{y}{100} \cdot G_{\text{м}} \cdot e_y,$$

де  $e_y = 5120$  кДж/кг.

Таким чином, ми можемо визначити значення прибуткової частини ексергетичного балансу, кВт

$$E_{\text{прих}} = E_{\Gamma} + E_{\text{вз}} + E_{\text{экз}}.$$

Розрахунок видаткової частини ексергетичного балансу,

$$E_{\text{расх}} = E_{\text{м}} + E_{\text{ок}} + E_{\text{гор}} + E_{\text{ос}} + E_{\text{т/о}} + E_{\text{отх}},$$

де  $E_M, E_{ок}, E_{гор}, E_{ос}, E_{т/о}, E_{отх}$  - відповідно ексергії, що витрачаються на нагрів металу, на нагрів окалини, втрата ексергії через незворотності процесу горіння палива, втрата ексергії в навколишнє середовище, втрата ексергії через незворотності процесу теплообміну продуктів згорання, втрата ексергії та відходять продуктами згорання.

Втрата ексергії на нагрівання металу, кВт

$$E_M = \frac{100-y}{100} \cdot G_M \cdot \Delta i_M,$$

де  $i_M'', i_M'$  - відповідно ентальпії металу при температурах  $T_M'', T_M'$  (табл. 2.2),

$T_0$  - температура, що дорівнює  $t'_{вз}$ , К,

$$\Delta S = c_{кон.м} \cdot \ln \frac{T_M''}{T_M'} - \text{ентропія металу.}$$

Втрата ексергії на нагрів окалини, кВт

$$E_{ок} = G_M \cdot \frac{y}{100} \cdot e_{ок},$$

де  $e_{ок} = 3000$  кДж/кг.

Втрата ексергії через незворотності процесу горіння палива, кВт

$$E_{гор} = B \cdot (e_T + V_{вз} e_{вз} - V_{пс} e_{пс}).$$

Розпишемо кожний доданок цього виразу.

Питома ексергія палива, кДж/м<sup>3</sup>

$$e_T = Q_H^p.$$

Множення питомої ексергії нагрітого повітря на його об'єм ,

$$V_{вз} \cdot e_{вз} = \frac{E_{вз}}{B}.$$

Питома ексергія продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup>

$$e_{пс} = i_{гор} - i_0 - T_0 \cdot \Delta S_{пс},$$

де  $i_{гор} = c_{пс} \cdot t_{гор}$ , кДж/м<sup>3</sup>

$c_{пс}$  - теплоємність продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup> К; приймаємо  $c_{пс} = 1,63$ ,

$T_{гор}$  - температура горіння палива при гарячих компонентах:



$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + \frac{Q_{\text{фв}}}{B}}{c_{\text{пс}} V_{\text{пс}}} + 273,$$

$i_0 = 18$  кДж/м<sup>3</sup> – ентальпія продуктів згорання, які перебувають у стані рівноваги з навколишнім середовищем;

$T_0$  – температура, що дорівнює  $t'_{\text{сз}}$ , К;

$\Delta S_{\text{пс}}$  - ентропія продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup>

$$\Delta S_{\text{пс}} = c_{\text{пс}} \cdot \ln \frac{T_{\text{гор}}}{T_0}.$$

Втрата ексергії внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем, кВт

$$E_{\text{ос}} = Q_{\text{ос}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{пс}}}\right),$$

де  $Q_{\text{ос}} = Q_{\text{расх}} - Q_{\text{м}} - Q_{\text{ух}}$ , кВт – сумарний відведення теплоти в навколишнє середовище, приймається з енергетичного балансу,

$T_0$  – температура, що дорівнює  $t'_{\text{сз}}$ , К,

$\overline{T}_{\text{пс}}$  – середня термодинамічна температура продуктів згорання, К,

$$\overline{T}_{\text{пс}} = \frac{T_{\text{гор}} - T_{\text{ух}}}{\ln \frac{T_{\text{гор}}}{T_{\text{ух}}}},$$

$T_{\text{ух}}$  - температура продуктів згорання на виході з робочої камери печі, К.

Знаючи всі складові ексергії теплообміну з навколишнім середовищем, запишемо, кВт

$$E_{\text{ос}} = Q_{\text{ос}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{\overline{T}_{\text{пс}}}\right).$$

Втрата ексергії через незворотності процесу теплообміну продуктів згорання, кВт

$$E_{\text{т/о}} = B \cdot V_{\text{пс}} \cdot (e_{\text{пс}}^{\text{вх}} - e_{\text{пс}}^{\text{ввих}}) - E_{\text{м}} - E_{\text{ос}},$$

де  $e_{\text{пс}}^{\text{вх}} = e_{\text{пс}} = 2076,11$  кДж/м<sup>3</sup> – питома ексергія продуктів згорання при гарячих компонентах

$e_{\text{пс}}^{\text{ввих}}$  - ексергія відхідних продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup>

$$e_{\text{пс}}^{\text{ВЫХ}} = i_{\text{ух}} - i_0 - T_0 \cdot \Delta S_{\text{пс}},$$

де  $i_{\text{ух}} = \frac{Q_{\text{ух}}}{BV_{\text{пс}}}$ , кДж/м<sup>3</sup> – ентальпія відхідних продуктів згорання,

$$\Delta S_{\text{пс}} = c_{\text{пс}} \cdot \ln \frac{\overline{T}_{\text{пс}}}{T_0} - \text{ексергія продуктів згорання.}$$

Втрату ексергії та відходять продуктами згорання розрахуємо за формулою, кВт

$$E_{\text{отх}} = B \cdot V_{\text{пс}} \cdot e_{\text{пс}}^{\text{ВЫХ}}.$$

Таким чином, ми можемо отримати значення видаткової частини ексергетичного балансу, кВт

$$E_{\text{расх}} = E_{\text{м}} + E_{\text{ок}} + E_{\text{гор}} + E_{\text{ос}} + E_{\text{т/о}} + E_{\text{отх}}.$$

Знаючи значення за прибутковою та витратних частинах ексергетичного балансу запишемо,

$$E_{\text{прих}} = E_{\text{расх}}.$$

Визначимо похибку обчислень, %

$$\Delta = \frac{E_{\text{прих}} - E_{\text{расх}}}{E_{\text{прих}}} \cdot 100$$

Результати розрахунків енергетичного та ексергетичного балансів запишемо у зведені таблиці

### Енергетичний баланс

Прибуткова частина	кДж	%
Хімічне тепло палива, $Q_{\text{х.т}}$		
Фізичне тепло дуття, $Q_{\text{фв}}$		
Екзотермічні реакції, $Q_{\text{экз}}$		
$\Sigma Q_{\text{пр}}$		
Видаткова частина	кДж	%
Втрати тепла на нагрівання металу, $Q_{\text{м}}$		
Тепловідвід з відхідними продуктами згорання, $Q_{\text{ух}}$		
Тепловідвід через кладку продуктами згорання, $Q_{\text{кл}}$		
Тепловідвід з охолодженням елементів печі, $Q_{\text{охл}}$		
Втрати тепла на нагрівання окалини, $Q_{\text{ок}}$		

Невраховані втрати, $Q_{\text{неврах}}$		
$\Sigma Q_{\text{расх}}$		

### Ексергетичний баланс

Прибуткова частина	<i>кДж</i>	<i>%</i>
Ексергія палива, $E_T$		
Ексергія дуття, $E_{вз}$		
Ексергія окислення металу, $E_{\text{экз}}$		
$\Sigma E_{\text{пр}}$		

Видаткова частина	<i>кДж</i>	<i>%</i>
Втрата ексергії на нагрівання металу, $E_M$		
Втрата ексергії на нагрівання окалини, $E_{\text{ок}}$		
Втрата ексергії через незворотність процесу горіння палива, $E_{\text{гор}}$		
Втрата ексергії у камері печі внаслідок незворотності теплообміну продуктів згорання з оточуючою середою, $E_{\text{ос}}$		
Втрата ексергії внаслідок незворотності процесу теплообміну продуктів згорання з металом, що нагрівається, $E_T$		
Втрата ексергії з підходящими продуктами згорання, $E_{\text{отх}}$		
$\Sigma E_{\text{расх}}$		

Приклад рішення:

Вихідні дані для рішення завдання

$$G_M = 37 + 0,1N = 37 + 0,3 = 37,3 \text{ кг/с};$$

$$T_M'' = 1550 + n_1 = 1550 + 2 = 1552 \text{ К};$$

$$y = \begin{cases} 1,5, & N = 2 \cdot k, k \in Z \\ 1, & N = 2 \cdot k + 1, k \in Z \end{cases}$$

$$Q_H^P = 6700 + n_1 n_2 = 6700 + 2 \cdot 4 = 6708 \text{ кВт};$$

$$T_{\text{вз}}' = 283 + n_2 = 283 + 4 = 287 \text{ К};$$

$$T_{\text{вз}}'' = 580 + n_2 = 580 + 4 = 584 \text{ К};$$

$$T_{\text{в}}'' = 320 + n_1 = 320 + 2 = 322 \text{ К};$$

$$T_{\text{кл}} = 1450 + N = 1450 + 3 = 1453 \text{ К};$$

$$F = 60 + N = 60 + 3 = 63 \text{ м}^2;$$

$$T_{\text{ух}} = 1300 + n_1 n_2 = 1300 + 2 \cdot 4 = 1308 \text{ К}.$$

де  $n_1, n_2, N$  – відповідно передостання, остання цифри номера залікової книжки і номер варіанта за списком журналу.

Рішення.

#### 4.1.1 Розрахунок енергетичного балансу

Наведемо приклад розрахунку енергетичного балансу. Спочатку запишемо його в загальному вигляді,

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{расх}}.$$

Розпишемо для теплоти приходу і витрати їх складові,

$$Q_{\text{хт}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{экз}} = Q_M + Q_{\text{ух}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{то}}.$$

де  $Q_{\text{хт}}, Q_{\text{фв}}, Q_{\text{экз}}$  - відповідно хімічне тепло палива, фізичне тепло повітря, теплота екзотермічних реакцій;

$Q_M, Q_{\text{ух}}, Q_{\text{кл}}, Q_{\text{охл}}, Q_{\text{то}}$  - відповідно теплоти витрачаються на нагрів металу, втрати теплоти з газами, що відходять, втрати тепла через кладку, втрата теплоти на нагрів охолоджуючої води, втрата теплоти на нагрів технологічного відходу (окаліни).

##### 4.1.1.1 Розрахунок прибуткової частини теплового балансу

Хімічне тепло палива, кВт

$$Q_{\text{хт}} = B \cdot Q_H^P = 15,8 \cdot 6708 = 105986,4.$$

Фізичне тепло повітря, кВт

$$Q_{\text{фв}} = B \cdot V_{\text{вз}} \cdot i_{\text{вз}} = 15,8 \cdot 1,628 \cdot 418,29 = 10759,4227,$$

де  $i_{\text{вз}}$  – ентальпія повітря при температурі  $T''_{\text{вз}}=584$  К, що визначається за табл. 4.1.

Теплота екзотермічних реакцій, кВт

$$Q_{\text{зкз}} = 5,65 \cdot G_{\text{м}} \cdot \frac{y}{100} = 5,65 \cdot 37,3 \cdot \frac{1}{100} = 2107,45.$$

Таким чином маємо, кВт

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{хт}} + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{зкз}} = 105986,4 + 10759,4227 + 2107,45 = 118853,2727$$

#### 4.1.1.2 Розрахунок видаткової частини теплового балансу

Теплота, що витрачається на нагрівання металу, кВт

$$Q_{\text{м}} = \frac{100-y}{100} G_{\text{м}} (i_{\text{кон.м}} - i_{\text{нач.м}}) =$$

$$\frac{100-1}{100} 37,3(1086,97424 - 127,872) = 35416,76842,$$

де  $i_{\text{кон.м}}$ ,  $i_{\text{нач.м}}$  – відповідно кінцева і початкова ентальпії металу, кДж/кг

$$i_{\text{кон.м}} = c_{\text{кон.м}} T''_{\text{м}} = 0,70037 \cdot 1552 = 1086,97424,$$

$$i_{\text{нач.м}} = c_{\text{нач.м}} T'_{\text{м}} = 0,444 \cdot 288 = 127,872,$$

де  $c_{\text{кон.м}}$ ,  $c_{\text{нач.м}}$  - відповідно початкові і кінцеві теплоємності металу, кДж/(кг К), що визначаються за таблиці 4.2

Теплота, що відводиться газами, кВт

$$Q_{\text{ух}} = B i_{\text{ух}} V_{\text{пс}} \cdot 4,19 = B \cdot (i_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + i_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2} + i_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + i_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}) \cdot 4,19 =$$

$$15,8 \cdot (547,35 \cdot 0,322 + 345,6 \cdot 1,719 + 428,8 \cdot 0,3663 + 366,3 \cdot 0,0342) \cdot 4,19 =$$

$$62225,24586$$

де  $i_{\text{CO}_2}$ ,  $i_{\text{N}_2}$ ,  $i_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $i_{\text{O}_2}$  - ентальпії продуктів згорання при температурі відхідних газів

$T_{\text{ух}}=1320$  К, кДж/м<sup>3</sup>; вони визначаються з таблиці завдання 4.1.

$V_{\text{CO}_2}$ ,  $V_{\text{N}_2}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $V_{\text{O}_2}$  – об'ємні частки димових газів, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{c_{\text{O}_2}}{100} V_{\text{пс}} = \frac{13,2}{100} 2,442 = 0,322,$$

$$V_{N_2} = \frac{N_2}{100} V_{\text{пс}} = \frac{70,4}{100} 2,442 = 1,719,$$

$$V_{H_2O} = \frac{H_2O}{100} V_{\text{пс}} = \frac{15}{100} 2,442 = 0,3663,$$

$$V_{O_2} = \frac{O_2}{100} V_{\text{пс}} = \frac{1,4}{100} 2,442 = 0,034.$$

Втрати теплоти через кладку розрахуємо за формулою, кВт

$$Q_{\text{кл}} = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{вз}}}{\sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}} F = \frac{1180 - 14}{\frac{0,25}{1,260735} + \frac{0,1}{0,080123} + \frac{1}{20}} 92 = 49,090,$$

де  $t_{\text{вз}} = 14$  °С;

$$\alpha = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$$

$F$  – площа поверхні кладки;

$\sum \frac{\delta}{\lambda}$  - сума термічних опорів кладки, що складається з двох шарів:

матеріал №2 ( $\delta_1 = 0,25\text{м}$ ) та азбесту ( $\delta_2 = 0,1 \text{ м}$ ), значення коефіцієнта теплопровідності, які обираються за таблиці 4.3.

$$\lambda_{\text{азбеста}} = \lambda_2 = 0,0233 + 0,000186 t_{\text{нар}}$$

де  $t = t_{\text{вн}}$  (для розрахунку  $\lambda_1$ ),

$$t_{\text{вн}} = \frac{t_{\text{кл}} + t_{\text{вз}}}{2} = \frac{1180 + 14}{2} = 597,$$

$$t_{\text{нар}} = \frac{t_{\text{вн}} + t_{\text{вз}}}{2} = \frac{597 + 14}{2} = 305,5.$$

Тоді розрахуємо коефіцієнт теплопровідності для матеріалу № 2, Вт/(м К)

$$\lambda_1 = 0,81 + 0,000755 \cdot t = 1,260735,$$

і азбесту, Вт/(м К)

$$\lambda_2 = 0,0233 + 0,000186 \cdot 305,5 = 0,0801234.$$

Втрати теплоти на нагрів охолоджуючої води, кВт

$$Q_{\text{охл}} = G_{\text{в}} \cdot c_{\text{рв}} \cdot \Delta T_{\text{в}} = 83 \cdot 4,19 \cdot (49 - 10) = 13563,03.$$

Втрати теплоти з технологічно відходом (окалиною), кВт

$$Q_{ок} = m \cdot \frac{y}{100} \cdot G_M \cdot i_{ок} = m \cdot \frac{y}{100} \cdot G_M \cdot \bar{c}_{ок} \cdot (t_M'' - t_M') =$$

$$1,38 \cdot \frac{1}{100} \cdot 37,3 \cdot 10^{-3} \cdot (1552 - 288) = 650,63136.$$

де  $\bar{c}_{ок}$  - теплоємність окалини;  $\bar{c}_{ок} = 10^{-3}$  МДж/(кг К)

$$m=1,38$$

Таким чином маємо, кВт

$$Q_{расх} = Q_M + Q_{ух} + Q_{кл} + Q_{охл} + Q_{то} = 35416,76842 + 62225,24586 + 49,090 +$$

$$13563,03 + 650,63136 = 111904,7662$$

Знаючи значення за прибутковою та витратною частинах енергетичного балансу запишемо

$$Q_{прих} = Q_{расх} + Q_{неучт}$$

$$Q_{неучт} = Q_{прих} - Q_{расх} = 118853,2727 + 10759,4227 - 111904,7662 =$$

$$6948,5065$$

де  $Q_{неучт}$  - невраховані втрати, кВт.

### 2.1.2 Розрахунок ексергетичного балансу

Запишемо рівняння енергетичного балансу,

$$E_z + E_{вз} + E_{экз} = E_M + E_{ок} + E_{доп} + E_{ос} + E_{т/о} + E_{отх}.$$

#### 2.1.2.1 Розрахунок прибуткової частини ексергетичного балансу,

$$E_{прих} = E_{г} + E_{вз} + E_{экз},$$

де  $E_z, E_{вз}, E_{экз}$  - відповідно ексергії горіння палива, підігріваємого повітря, екзотермічних реакцій.

Ексергія горіння палива, кВт

$$E_{г} = B \cdot Q_H^P = 15,8 \cdot 6708 = 105986,4.$$

Ексергія підігрівається повітря, кВт

$$E_{вз} = B \cdot V_{вз} \cdot \Delta e_{вз},$$

де  $\Delta e_{вз} = \Delta i_{вз} - T_0 \Delta S$  - різниця ексергією повітря на вході і виході, кДж/кг;

$T_0$  – температура, що дорівнює  $t'_{\text{вз}}$ , К;

$\Delta i_{\text{вз}} = i''_{\text{вз}} - i'_{\text{вз}}$ ;  $i''_{\text{вз}}, i'_{\text{вз}}$  - ентальпії повітря на виході і вході, кДж/кг, які визначаються відповідно по  $t''_{\text{вз}}$  и  $t'_{\text{вз}}$  [1];

$$\Delta S = c_p \cdot \ln \frac{T}{T_0} = c_p \cdot \ln \frac{T''_{\text{вз}}}{T'_{\text{вз}}} = 0,71625 \cdot \ln \frac{584}{287} = 0,5088374,$$

$c_p$  - теплоємність повітря при температурі  $T''_{\text{вз}}$ , кДж/м<sup>3</sup> К (визначаємо за табл. 4.1)

Таким чином, значення ексергії для підігріваемого повітря, кВт

$$E_{\text{вз}} = 15,8 \cdot 1,628 \cdot ((418,29 - 39) - 287 \cdot 0,5088374) = 5999,844.$$

Ексергія екзотермічних реакцій,

$$E_{\text{зкз}} = \frac{y}{100} \cdot G_m \cdot e_y = \frac{1}{100} \cdot 37,3 \cdot 5120 = 1909,76,$$

де  $e_y = 5120$  кДж/кг.

Таким чином, ми можемо визначити значення прибуткової частини ексергетичного балансу, кВт

$$E_{\text{прих}} = E_r + E_{\text{вз}} + E_{\text{зкз}} = 105986,4 + 5999,844 + 1909,76 = 113896,004.$$

#### 4.1.2.2 Розрахунок видаткової частини ексергетичного балансу,

$$E_{\text{расх}} = E_m + E_{\text{ок}} + E_{\text{гор}} + E_{\text{ос}} + E_{\text{т/о}} + E_{\text{отх}},$$

де  $E_m, E_{\text{ок}}, E_{\text{гор}}, E_{\text{ос}}, E_{\text{т/о}}, E_{\text{отх}}$  - відповідно ексергії, що витрачаються на нагрів металу, на нагрів окалини, втрата ексергії через незворотності процесу горіння палива, втрата ексергії в навколишнє середовище, втрата ексергії через незворотності процесу теплообміну продуктів згорання, втрата ексергії та відходять продуктами згорання.



Витрата ексергії на нагрів металу, кВт

$$\frac{100-1}{100} \cdot 37,3 \cdot (1086,97424 - 127,872 - 288 \cdot 1,17904) = 22877,70631$$

$$E_M = \frac{100-y}{100} \cdot G_M \cdot \Delta i_M = \frac{100-y}{100} \cdot G_M \cdot (i_M'' - i_M' - T_0 \Delta S)$$

де  $i_M'', i_M'$  - відповідно ентальпії металу при температурах  $T_M'', T_M'$  (табл. 2.2)

$T_0$  - температура, що дорівнює  $t_{\text{вз}}$ , К;

$$\Delta S = c_{\text{кон.м}} \cdot \ln \frac{T_M''}{T_M'} = 0,7 \cdot \ln \frac{1552}{288} = 1,17904 - \text{ентропія металу.}$$

Витрата ексергії на нагрів окалини, кВт

$$E_{\text{ок}} = G_M \cdot \frac{y}{100} \cdot e_{\text{ок}} = 37,3 \cdot \frac{1}{100} \cdot 3000 = 1119,$$

де  $e_{\text{ок}} = 3000$  кДж/кг.

Втрата ексергії через незворотності процесу горіння палива, кВт

$$E_{\text{зоп}} = B \cdot (e_m + V_{\text{вз}} e_{\text{вз}} - V_{\text{нс}} e_{\text{нс}}) =$$

$$15,8 \cdot (6708 + 379,736962 - 2,442 \cdot (3025,79 - 18 - 287 \cdot 3,26095858)) = 32045,08$$

Розпишемо кожен складову цього виразу.

Питома ексергія палива, кДж/м<sup>3</sup>

$$e_T = Q_H^P = 6708.$$

Добуток питомої ексергії нагрітого повітря на його обсяг,

$$V_{\text{вз}} \cdot e_{\text{вз}} = \frac{E_{\text{вз}}}{B} = \frac{5999,844}{15,8} = 379,736962.$$

Питома ексергія продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup>

$$e_{\text{нс}} = i_{\text{гор}} - i_0 - T_0 \cdot \Delta S_{\text{нс}},$$

де  $i_{\text{гор}} = c_{\text{нс}} \cdot t_{\text{гор}} = 1,63 \cdot (2129,3 - 273) = 3025,79$  кДж/м<sup>3</sup>.

$c_{\text{нс}}$  - теплоємність продуктів згорання, кДж/м<sup>3</sup> К; приймаємо  $c_{\text{нс}} = 1,63$ ,

$T_{\text{гор}}$  - температура горіння палива при гарячих компонентах:

$$T_{\text{гор}} = \frac{Q_H^P + \frac{Q_{\text{фв}}}{B}}{c_{\text{нс}} V_{\text{нс}}} + 273 = \frac{6708 + \frac{10759,4227}{15,8}}{1,63 \cdot 2,442} + 273 = 2129,3, \text{ К;}$$

$i_0 = 18 \text{ кДж/м}^3$  – ентальпія продуктів згорання, які перебувають у стані рівноваги з навколишнім середовищем;

$T_0$  – температура, що дорівнює  $t'_{\text{сз}}$ , К;

$\Delta S_{\text{nc}}$  - ентропія продуктів згорання,  $\text{кДж/м}^3$ :

$$\Delta S_{\text{nc}} = c_{\text{nc}} \cdot \ln \frac{T_{\text{гор}}}{T_0} = 1,63 \cdot \ln \frac{2129,3}{288} = 3,26095858$$

Втрата ексергії внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем, кВт

$$E_{\text{oc}} = Q_{\text{oc}} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{nc}}}\right) = 14262,75 \cdot \left(1 - \frac{287}{1685,43}\right) = 11834,04679$$

де

$$Q_{\text{oc}} = Q_{\text{расх}} - Q_{\text{м}} - Q_{\text{ух}} = 111904,7662 - 35416,76842 - 62225,24586 = 14262,75$$

кВт – сумарне відведення теплоти в навколишнє середовище, приймається з енергетичного балансу.

$T_0$  – температура, що дорівнює  $t'_{\text{сз}}$ , К;

$\overline{T}_{\text{nc}}$  – середня термодинамічна температура продуктів згорання, К.

$$\overline{T}_{\text{nc}} = \frac{T_{\text{гор}} - T_{\text{ух}}}{\ln \frac{T_{\text{гор}}}{T_{\text{ух}}}} = \frac{2129,3 - 1308}{\ln \frac{2129,3}{1308}} = 1685,43,$$

$T_{\text{ух}}$  - температура продуктів згорання на виході з робочої камери печі, К.

Втрата ексергії через незворотності процесу теплообміну продуктів згорання, кВт

$$E_{\tau/o} = B \cdot V_{\text{nc}} \cdot (e_{\text{nc}}^{\text{вх}} - e_{\text{nc}}^{\text{вих}}) - E_{\text{м}} - E_{\text{oc}} = 15,8 \cdot 2,442 \cdot (2076,11 - 766,456) - 22877,70631 - 11834,04679 = 15819,413$$

де  $e_{\text{nc}}^{\text{вх}} = e_{\text{nc}} = 2076,11 \text{ кДж/м}^3$  – питома ексергія продуктів згорання при гарячих компонентах

$e_{\text{nc}}^{\text{вих}}$  - ексергія вихідних продуктів згорання,  $\text{кДж/м}^3$

$$e_{\text{nc}}^{\text{вих}} = i_{\text{ух}} - i_0 - T_0 \cdot \Delta S_{\text{nc}} = 1612,738 - 18 - 287 \cdot 2,886 = 766,456,$$

де  $i_{yx} = \frac{Q_{yx}}{BV_{nc}} = \frac{62225,24586}{15,8 \cdot 2,442} = 1612,738$  кДж/м<sup>3</sup> – ентальпія відхідних продуктів згорання;

$\Delta S_{nc} = c_{nc} \cdot \ln \frac{\overline{T}_{nc}}{T_0} = 1,63 \cdot \ln \frac{1685,43}{287} = 2,886$  - ексергія вихідних продуктів згорання.

Втрату ексергії з продуктами згорання, що відходять, розрахуємо за формулою, кВт

$$E_{отх} = B \cdot V_{nc} \cdot e_{nc}^{свих} = 15,8 \cdot 2,442 \cdot 766,456 = 29572,63172.$$

Таким чином, ми можемо отримати значення видаткової частини ексергетичного балансу, кВт

$$E_{расх} = E_M + E_{ок} + E_{гор} + E_{ос} + E_{т/о} + E_{отх}$$

$$E_{расх} = 22877,70631 + 1119 + 32045,08 + 11834,04679 + 15819,413 + 29572,63172 = 113267,8778$$

Знаючи значення за прибутковою та витратних частинах ексергетичного балансу запишемо,

$$E_{прих} = E_{расх},$$

$$113896,004 \approx 113267,8778.$$

Визначимо похибку обчислень, %

$$\Delta = \frac{E_{прих} - E_{расх}}{E_{прих}} \cdot 100 = \frac{113896,004 - 113267,8778}{113896,004} \cdot 100 = 0,55.$$

Результати розрахунків енергетичного та ексергетичного балансів:

#### Енергетичний баланс

	Прибуткова частина	кДж	%
Хімічне тепло палива, $Q_{х.т}$		105986,4	89,17
Фізичне тепло дуття, $Q_{фв}$		10759,4227	9,1
Екзотермічні реакції, $Q_{екз}$		2107,45	1,73
$\Sigma Q_{пр}$		118853,2727	100
	Вихідна частина	кДж	%

Витрата тепла на нагрів металу, $Q_m$	35416,76842	29,8
Тепловідведення з продуктами згорання, що відходять, $Q_{yx}$	62225,24586	52,35
Тепловідведення через кладку продуктами згорання, $Q_{кл}$	49,090	0,04
Тепловідведення з охолодженням елементів печі, $Q_{охл}$	13563,03	11,4
Витрата тепла на нагрів окалини, $Q_{ок}$	650,63136	0,55
Невраховані витрати, $Q_{неучт}$	6948,51	5,86
$\Sigma Q_{расх}$	118853,2727	100

### Ексергетичний баланс

	<i>Прибуткова частина</i>	<i>кДж</i>	<i>%</i>
Ексергія палива, $E_T$		105986,4	93,1
Ексергія дуття, $E_{вз}$		5999,844	5,27
Ексергія окислення металу, $E_{окз}$		1909,76	1,63
$\Sigma E_{пр}$		113896,004	100
	<i>Вихідна частина</i>	<i>кДж</i>	<i>%</i>
Витрата ексергії на нагрів металу, $E_m$		22877,70631	20,2
Витрата ексергії на нагрів окалини, $E_{ок}$		1119	0,99
Втрата ексергії через незворотності процесу горіння палива, $E_{гор}$		32045,08	28,3
Втрата ексергії в камері печі внаслідок незворотності теплообміну продуктів згорання з навколишнім середовищем, $E_{ос}$		11834,04679	10,45
Втрата ексергії внаслідок незворотності процесу теплообміну продуктів згорання з нагрівається металом, $E_T$		15819,413	13,41
Втрата ексергії та відходять продуктами згорання, $E_{отх}$		113267,8778	26,65
$\Sigma E_{расх}$		113267,8778	100

Задача 2.2. Розрахувати ексергетичний та енергетичний баланси котельної установки. Котельна установка задається для кожного індивідуально. У прикладі розрахунку будемо розглядати котельну установку К-50-40/14, з конструктивними характеристиками якої можна ознайомитись в [2]. Паливо - кам'яне вугілля марки Д(Р) - Інтінське родовище, з особливостями якого можна ознайомитись в [3].

#### Розв'язання

2.2.1 Прибуткова частина ексергетичного балансу котельної установки,

$$e_{прих} = e_m,$$

де  $e_m$  – питома ексергія палива, кДж/кг.

Розрахуємо її за формулою, кДж/кг,

$$e_m = kQ_n^P = 1 \cdot 18310 = 18310,$$

де  $k$  – коефіцієнт, який враховує вид спалюваного палива; для кам'яного вугілля  $k = 1$ .

Прибуткова частина ексергетичного балансу складає, кДж/кг

$$e_{прих} = 18310.$$

2.2.2 Видаткова частина ексергетичного балансу котельної установки,

$$e_{расх} = e_{nn} + e_{\varepsilon\varepsilon_2} + e_{\varepsilon\varepsilon_1} + e_{кп} + de_{nn}^{m/o} + de_{\varepsilon\varepsilon_2}^{m/o} + de_{\varepsilon\varepsilon_1}^{m/o} + de_{кп}^{m/o} + de_{\varepsilon n_2}^{m/o} + de_{\varepsilon n_1}^{m/o} + e_{ух} + \Delta e_{zop},$$

де  $e_{nn}, e_{\varepsilon\varepsilon_2}, e_{\varepsilon\varepsilon_1}, e_{кп}, de_{nn}^{m/o}, de_{\varepsilon\varepsilon_2}^{m/o}, de_{\varepsilon\varepsilon_1}^{m/o}, de_{кп}^{m/o}, de_{\varepsilon n_2}^{m/o}, de_{\varepsilon n_1}^{m/o}, e_{ух}, \Delta e_{zop}$  - питомі ексергії відповідно пароперегрівача, водяного економайзера 2-го ступеня, водяного економайзера 1-го ступеня, котельного пучка, втрати ексергії в результаті незворотності процесів теплообміну в пароперегрівачі, водяного економайзері 2-го ступеня, водяному економайзері 1-го ступеня, котельному пучку, повітропідігрівачі 2-го ступеня, повітропідігрівачі 1-го ступеня, ексергія відхідних продуктів згорання, ексергія горіння палива.

Ексергія продуктів згорання в пароперегрівачі так само як і в інших поверхнях нагріву визначатиметься наступним чином: спочатку знаходимо ексергію продуктів згорання в даній поверхні нагрівання, а потім знаходимо ексергію, яка «сприйнялася» тим чи іншим теплоносієм в даній поверхні нагрівання, яка чисельно повинна бути менше. Обчисливши різницю цих величин, отримаємо значення ексергії, яка витрачається через незворотність процесів теплообміну, тобто ця енергія сприймається самою конструкцією котельної установки (нагрівання балок, перекриттів і т.д.)

Ексергію топки розрахуємо за формулою, кДж/кг

$$e_m^z = \left[ I_z' - I_z'' - T_0 \left( \frac{I_z'}{T_z' V_{nc}} \ln \frac{T_z'}{T_0} - \frac{I_z''}{T_z'' V_{nc}} \ln \frac{T_z''}{T_0} \right) \right],$$

$$e_m^z = \left[ 20486 - 11506 - 303 \left( \frac{20486}{2171 \cdot 6,214} \ln \frac{2171}{303} - \frac{11506}{1407 \cdot 6,214} \ln \frac{1407}{303} \right) \right]$$

$$= 7886,164,$$

де  $I'_2, I''_2$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з топки, кДж/кг;

$V_{nc}$  - об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегату);

$T'_2, T''_2$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з пароперегрівача, К. Аналогічним чином вважаються всі інші поверхні нагрівання, в яких використовуються лише інші чисельні значення ентальпій, ентропій, температур води або повітря. Ці значення вже є в розрахунку котельної установки.

Ексергія фестона дорівнює, кДж/кг

$$e_{\phi}^z = \left[ I'_2 - I''_2 - T_0 \left( \frac{I'_2}{T'_2 V_{nc}} \ln \frac{T'_2}{T_0} - \frac{I''_2}{T''_2 V_{nc}} \ln \frac{T''_2}{T_0} \right) \right],$$

Ексергія пароперегрівача знайдемо за формулою, кДж/кг

$$e_{nn} = \frac{D}{B} [(I_{nn} - I_{кс}) - T_{oc} (S_{nn} - S_{кс})],$$

де  $D$  - паропроодуктивність котельної установки, кг/с;

$B$  - витрати палива, кг/с;

$I_{nn}, I_{кс}$  - відповідно ентальпії перегрітого пара і котельної води, кДж/кг (з розрахунку котлоагрегата);

$S_{nn}, S_{кс}$  - відповідно ентропії перегрітої пари і котельної води, кДж/(кг С) [1];

$T_{oc}$  - температура зовнішнього повітря, К.

Знайдемо ексергію перегрівача пара, кДж/кг

$$\begin{aligned} e_{nn} &= \frac{D}{B} [(I_{nn} - I_{кс}) - T_{oc} (S_{nn} - S_{кс})] \\ &= \frac{13,9}{2,064} [(2928,44 - 2789,7) - 303(6,744 - 6,4614)] = 357,68. \end{aligned}$$

Ексергія димових газів в пароперегрівачі, кДж/кг

$$e_{nn}^z = [I'_2 - I''_2 - T_0 (S'_2 - S''_2)] = \left[ I'_2 - I''_2 - T_0 \left( \frac{I'_2}{T'_2 V_{nc}} \ln \frac{T'_2}{T_0} - \frac{I''_2}{T''_2 V_{nc}} \ln \frac{T''_2}{T_0} \right) \right],$$

де  $I_2', I_2''$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з пароперегрівача, кДж/кг;

$S_2', S_2''$  - відповідно ентропії димових газів на вході і виході з пароперегрівача,

кДж/(кг С);

$V_{nc}$  - обсяг продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегату);

$T_2', T_2''$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з пароперегрівача, К

Таким чином маємо, кДж/кг

$$e_{nn}^e = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{nc}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{nc}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

$$e_{nn}^e = \left[ 10928 - 9545 - 303 \left( \frac{10928}{1335 \cdot 6,412} \ln \frac{1335}{303} - \frac{9545}{1213 \cdot 6,412} \ln \frac{1213}{303} \right) \right] = 1325,96.$$

Втрати ексергії через незворотності процесів теплообміну в пароперегрівачі, кДж/кг

$$de_{nn} = e_{nn}^e - e_{nn} = 1325,96 - 357,68 = 968,21.$$

Розрахунок ексергії котельного пучка буде відрізнятися від інших розрахунків тим, що складова втрат на незворотність процесів теплообміну буде враховувати ексергію топки і фестона,

$$de_{kn} = e_{kn}^e + e_m^e + e_{\phi}^e - e_{kn} = 1325,96 - 357,68 = 968,21,$$

де  $e_{kn}^e, e_m^e, e_{\phi}^e$  - питомі ексергії димових газів відповідно в котельному пучку, топці, фестону, кДж/кг

Ексергію котельного пучка знайдемо за формулою, кДж/кг

$$e_{kn+m+\phi} = \frac{D}{B} [(i_{kn} - i_{в.зк}) - T_{oc}(S_{kn} - S_{кв})],$$

де  $D$  - паропродуктивність котельної установки, кг/с;

$B$  - витрати палива, кг/с;

$i_{\text{нп}}, i_{\text{в.эж}}$  - відповідно ентальпії насиченої пари і котельної води, кДж/кг (з розрахунку котлоагрегату, при температурі насичення в барабані);

$S_{\text{нп}}, S_{\text{кв}}$  - відповідно ентропії насиченої пари і котельної води, кДж/(кг С)  
[1];

$T_{\text{ос}}$  - температура зовнішнього повітря, К.

Знайдемо ексергію котельного пучка, кДж/кг

$$e_{\text{кп}} = \frac{D}{B} [(i_{\text{нп}} - i_{\text{в.эж}}) - T_{\text{ос}}(S_{\text{нп}} - S_{\text{кв}})] = \frac{13,9}{2,064} [(2789,7 - 1073,9) - 303(6,4591 \cdot 2,29)] = 3473,65$$

Ексергія димових газів в котельному пучку, кДж/кг

$$e_{\text{кп}}^{\text{е}} = [I_2' - I_2'' - T_0(S_2' - S_2'')] = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{\text{нс}}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{\text{нс}}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

де  $I_2', I_2''$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з котельного пучка, кДж/кг;

$S_2', S_2''$  - відповідно ентропії димових газів на вході і виході з котельного пучка, кДж/(кг С);

$V_{\text{нс}}$  - об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегату);

$T_2', T_2''$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з пароперегрівача, К

Таким чином маємо, кДж/кг

$$e_{\text{кп}}^{\text{е}} = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{\text{нс}}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{\text{нс}}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

$$e_{\text{кп}}^{\text{е}} = \left[ 9628 - 8778 - 303 \left( \frac{9628}{1165 \cdot 6,735} \ln \frac{1165}{303} - \frac{8778}{1093 \cdot 6,735} \ln \frac{1093}{303} \right) \right]$$

$$= 812,816.$$

Так, можемо розрахувати втрати ексергії через незворотності процесів теплообміну в котельному пучку, кДж/кг

$$de_{\text{кп}} = e_{\text{кп}}^{\text{е}} + e_m^{\text{е}} + e_{\text{ф}}^{\text{е}} - e_{\text{кп}} = 812,816 + 7886,164 + 369,42 - 3473,65 = 5594,75$$



Ексергія водяного економайзера 2-го ступеня знайдемо за формулою,

кДж/кг

$$e_{\varepsilon_{32}} = \frac{D}{B} [(i''_{\varepsilon_{32}} - i'_{\varepsilon_{32}}) - T_{oc}(S''_{\varepsilon_{32}} - S'_{\varepsilon_{32}})],$$

де  $D$  – паропродуктивність котельної установки, кг/с;

$B$  - витрати палива, кг/с;

$i''_{\varepsilon_{32}}, i'_{\varepsilon_{32}}$  - відповідно ентальпії води на виході і вході в економайзер,

кДж/кг (з розрахунку котлоагрегата);

$S''_{\varepsilon_{32}}, S'_{\varepsilon_{32}}$  – відповідно ентропії води на виході і вході в економайзер,

кДж/(кг С) [1];

$T_{oc}$  - температура зовнішнього повітря, К.

Знайдемо ексергію економайзера 2-го ступеня, кДж/кг

$$e_{\varepsilon_{32}} = \frac{D}{B} [(i''_{\varepsilon_{32}} - i'_{\varepsilon_{32}}) - T_{oc}(S'_{\varepsilon_{32}} - S'_{\varepsilon_{32}})] = \frac{13,9}{2,064} [(1013,9 - 542) - 303(2,656 - 1,6238)] = 1071,3$$

Ексергія димових газів в економайзері, кДж/кг

$$e_{\varepsilon_{32}}^e = [I'_2 - I''_2 - T_0(S'_2 - S''_2)] = \left[ I'_2 - I''_2 - T_0 \left( \frac{I'_2}{T'_2 V_{nc}} \ln \frac{T'_2}{T_0} - \frac{I''_2}{T''_2 V_{nc}} \ln \frac{T''_2}{T_0} \right) \right],$$

де  $I'_2, I''_2$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з економайзера, кДж/кг;

$S'_2, S''_2$  - відповідно ентропії димових газів на вході і виході з економайзера, кДж/(кг С);

$V_{nc}$  – об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегата);

$T'_2, T''_2$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з економайзера, К

Таким чином маємо, кДж/кг

$$e_{\varepsilon_{32}}^e = \left[ 8778 - 4430 - 303 \left( \frac{8778}{1093 \cdot 7,082} \ln \frac{1093}{303} - \frac{4430}{697 \cdot 7,082} \ln \frac{697}{303} \right) \right] = 4120.$$

Втрати ексергії через незворотності процесів теплообміну в економайзері 2-го ступеня, кДж/кг

$$de_{\varepsilon 2} = e_{\varepsilon 2}^{\varepsilon} - e_{\varepsilon 2} = 4120 - 1071,3 = 3049.$$

Ексергію повітропідігрівача 2-го ступеня знайдемо за формулою, кДж/кг

$$e_{\varepsilon n_2} = (I_{\varepsilon n_2}'' - I_{\varepsilon n_2}') - T_{oc} \Delta S,$$

де  $I_{\varepsilon n_2}'$ ,  $I_{\varepsilon n_2}''$  - відповідно ентальпії повітря на виході і вході в повітропідігрівач, кДж/кг (з розрахунку котлоагрегату);

$\Delta S$  – ентропія повітря повітропідігрівача 2-го ступеня, кДж/(кг С) [1],

$$\Delta S = c_p \ln \frac{T_{\varepsilon n}''}{T_0} = 1,344 \cdot \ln \frac{579}{303} = 0,87,$$

$c_p$  – теплоємність повітря, кДж/кг К; приймаємо за таблиці 2.1 по  $T_{\varepsilon 3}''$ ;

$T_{\varepsilon n}''$  - температура повітря на виході з повітропідігрівача 2-ї ступені;

$T_{oc}$  - температура зовнішнього повітря, К.

Знайдемо ексергію повітропідігрівача 2-го ступеня, кДж/кг

$$e_{\varepsilon n_2} = (I_{\varepsilon n_2}'' - I_{\varepsilon n_2}') - T_{oc} \Delta S = (4430 - 3417 - 303 \cdot 0,87) = 749,39.$$

Ексергія димових газів в повітропідігрівачі, кДж / кг

$$e_{\varepsilon n_2}^{\varepsilon} = [I_2' - I_2'' - T_0 (S_2' - S_2'')] = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{nc}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{nc}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

де  $I_2'$ ,  $I_2''$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з повітропідігрівача, кДж/кг;

$S_2'$ ,  $S_2''$  - відповідно ентропії димових газів на вході і виході з повітропідігрівача, кДж/(кг С);

$V_{nc}$  – об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегату);

$T_2'$ ,  $T_2''$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з повітропідігрівача, К

Таким чином маємо, кДж/кг

$$e_{\varepsilon n_2}^e = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{nc}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{nc}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

$$e_{\varepsilon n_2}^e = \left[ 4430 - 3417 - 303 \left( \frac{4430}{697 \cdot 7,33} \ln \frac{697}{303} - \frac{3417}{592,54 \cdot 7,33} \ln \frac{592,54}{303} \right) \right] = 817,63.$$

Втрати ексергії через незворотності процесів теплообміну в повітропідігрівачі 2-го ступеня, кДж / кг

$$de_{\varepsilon n_2}^e = e_{\varepsilon n_2}^e - e_{\varepsilon n_2} = 817,63 - 749,39 = 68,24.$$

Ексергію водяного економайзера 1-го ступеня знайдемо за формулою, кДж/кг

$$e_{\varepsilon \varepsilon_1} = \frac{D}{B} [(i_{\varepsilon \varepsilon_1}'' - i_{\varepsilon \varepsilon_1}') - T_{oc} (S_{\varepsilon \varepsilon_1}'' - S_{\varepsilon \varepsilon_1}')],$$

де  $D$  – паропродуктивність котельної установки, кг/с;

$B$  – витрати палива, кг/с;

$i_{\varepsilon \varepsilon_1}'', i_{\varepsilon \varepsilon_1}'$  - відповідно ентальпії води на виході і вході в економайзер, кДж/кг (з розрахунку котлоагрегату);

$S_{\varepsilon \varepsilon_1}'', S_{\varepsilon \varepsilon_1}'$  – відповідно ентропії води на виході і вході в економайзер, кДж/(кг С) [1];

$T_{oc}$  - температура зовнішнього повітря, К.

Знайдемо ексергію економайзера 1-го ступеню, кДж/кг

$$e_{\varepsilon \varepsilon_1} = \frac{D}{B} [(i_{\varepsilon \varepsilon_1}'' - i_{\varepsilon \varepsilon_1}') - T_{oc} (S_{\varepsilon \varepsilon_1}'' - S_{\varepsilon \varepsilon_1}') ] = \frac{13,9}{2,064} [(544,23 - 497,109) - 303(1,644 - 1,506)] = 33,9$$

Ексергія димових газів в економайзері, кДж/кг

$$e_{\varepsilon \varepsilon_1}^e = [I_2' - I_2'' - T_0 (S_2' - S_2'')] = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{nc}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{nc}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

де  $I_2', I_2''$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з економайзера, кДж/кг;

$S_2', S_2''$  - відповідно ентропії димових газів на вході і виході з економайзера, кДж/(кг С);

$V_{nc}$  – об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегату);

$T_2', T_2''$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з економайзера, К

Таким чином маємо, кДж/кг

$$e_{\varepsilon_{\varepsilon 1}}^{\varepsilon} = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{nc}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{nc}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

$$e_{\varepsilon_{\varepsilon 1}}^{\varepsilon} = \left[ 3924 - 3255 - 303 \left( \frac{3924}{638 \cdot 7,73} \ln \frac{638}{303} - \frac{3255}{547 \cdot 7,33} \ln \frac{547}{303} \right) \right] = 615,94.$$

Втрати ексергії через незворотності процесів теплообміну в економайзері 1-го ступеня, кДж/кг

$$de_{\varepsilon_{\varepsilon 1}} = e_{\varepsilon_{\varepsilon 1}}^{\varepsilon} - e_{\varepsilon_{\varepsilon 1}} = 615,94 - 33,9 = 582,04.$$

Ексергія повітря підігрівача 1-го ступеня знайдемо за формулою, кДж/кг

$$e_{\varepsilon n_1} = (I_{\varepsilon n_1}'' - I_{\varepsilon n_1}') - T_{oc} \Delta S,$$

де  $I_{\varepsilon n_1}'', I_{\varepsilon n_1}'$  - відповідно ентальпії повітря на виході і вході в повітропідігрівач, кДж/кг (з розрахунку котлоагрегату);

$\Delta S$  - ентропія повітря повітропідігрівача 1-го ступеня, кДж/(кг С) [1],

$$\Delta S = c_p \ln \frac{T_{\varepsilon n}''}{T_0} = 1,332 \cdot \ln \frac{482}{303} = 0,618,$$

$c_p$  - теплоємність повітря, кДж/кг К; приймається за таблицею 2.1 по  $T_{\varepsilon n}''$ ;

$T_{\varepsilon n}''$  - температура повітря на виході з повітропідігрівача 1-го ступеня;

$T_{oc}$  - температура зовнішнього повітря, К.

Знайдемо ексергію повітропідігрівача 1-го ступеня, кДж/кг

$$e_{\varepsilon n_1} = (I_{\varepsilon n_1}'' - I_{\varepsilon n_1}') - T_{oc} \Delta S = (3096,3 - 1726,2 - 303 \cdot 0,618) = 1182,85.$$

Ексергія димових газів в повітропідігрівачі, кДж/кг

$$e_{\varepsilon_{\varepsilon n_1}}^{\varepsilon} = [I_2' - I_2'' - T_0 (S_2' - S_2'')] = \left[ I_2' - I_2'' - T_0 \left( \frac{I_2'}{T_2' V_{nc}} \ln \frac{T_2'}{T_0} - \frac{I_2''}{T_2'' V_{nc}} \ln \frac{T_2''}{T_0} \right) \right],$$

де  $I_2', I_2''$  - відповідно ентальпії димових газів на вході і виході з повітропідігрівача, кДж/кг;

$S'_2, S''_2$  - відповідно ентропії димових газів на вході і виході з повітропідігрівника, кДж/(кг С);

$V_{nc}$  – об'єм продуктів згорання, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> (з розрахунку котлоагрегату);

$T'_2, T''_2$  - відповідно температури димових газів на вході і виході з повітропідігрівника, К

Таким чином маємо, кДж/кг

$$e_{\varepsilon n_1}^{\varepsilon} = \left[ I'_2 - I''_2 - T_0 \left( \frac{I'_2}{T'_2 V_{nc}} \ln \frac{T'_2}{T_0} - \frac{I''_2}{T''_2 V_{nc}} \ln \frac{T''_2}{T_0} \right) \right],$$

$$e_{\varepsilon n_1}^{\varepsilon} = \left[ 3096,3 - 1726,2 - 303 \left( \frac{3096,3}{547 \cdot 8,124} \ln \frac{547}{303} - \frac{1726,2}{423 \cdot 8,124} \ln \frac{423}{303} \right) \right] = 1296,169.$$

Втрати ексергії через незворотності процесів теплообміну в повітропідігрівачі 2-го ступеня, кДж/кг

$$de_{\varepsilon n_1} = e_{\varepsilon n_1}^{\varepsilon} - e_{\varepsilon n_1} = 1296,169 - 1182,85 = 113,319.$$

Питому ексергію відхідних газів знайдемо наступним чином, кДж/кг

$$e_{yx} = (I_{yx} - I_{\varepsilon \varepsilon 30}) - T_{oc} \Delta S,$$

де  $I_{yx}, I_{\varepsilon \varepsilon 30}$  – відповідно ентальпії відхідних газів і зовнішнього повітря при його температурі (в курсовому проекті по котлам була прийнята температура 30 °С)

$\Delta S$  - ентропія вихідних газів, кДж/кг К,

$$\Delta S = c_p \ln \frac{T''_{\varepsilon \varepsilon}}{T_0} = 4,0809 \cdot \ln \frac{423}{303} = 1,362,$$

де  $c_p$  - теплоємність димових газів на виході, кДж/кг К,

$$c_p = \frac{I_{yx}}{T_{yx}} = \frac{1726,2}{423} = 4,0809.$$

Питому ексергію відхідних газів знайдемо за формулою, кДж/кг

$$e_{yx} = (I_{yx} - I_{\varepsilon \varepsilon 30}) - T_{oc} \Delta S = (1726,2 - 190,4) - 303 \cdot 1,362 = 1123,256.$$

Ексергія горіння палива, кДж/кг

$$e_{гор} = e_m - Q_p \left( 1 - \frac{T_0}{T_{гор}} \right) = 18310 - 18310 \left( 1 - \frac{303}{2171} \right) = 2550.$$

Таким чином, можемо записати остаточний вираз ексергетичного балансу котельної установки, кДж/кг

$$e_{прих} = e_{расх},$$

$$e_m = e_{nn} + e_{сз2} + e_{сз1} + e_{кн} + de_{nn}^{m/o} + de_{сз2}^{m/o} + de_{сз1}^{m/o} + de_{кн}^{m/o} + de_{сн2}^{m/o} + de_{сн1}^{m/o} + e_{yx} + \Delta e_{гор}$$

$$e_{прих} = 18310,$$

$$e_{расх} = 357,68 + 1071 + 33,9 + 3473,65 + 968,21 + 3040 + 582,04 + 5594,75 + 68,24 + 113,319 + 1123,256 + 2550$$

$$e_{расх} = 18587,805.$$

Розрахуємо похибка виконаних розрахунків, %

$$\Delta = \frac{e_{расх} - e_{прих}}{e_{расх}} 100 = \frac{18587,805 - 18310}{18587} 100 = 1,49 \%$$

Дане значення похибки лежить в допустимих межах (до 5%), тому робимо висновок про правильність виконаних розрахунків.

### Практичне завдання №3

Задача 3. За даними завдання 2.2 і розрахунків котельної установки побудувати схеми енергетичного та ексергетичного балансів котельної установки, розглянутої в попередній задачі.

#### Рішення

Схеми енергетичного та ексергетичного балансів будуються на міліметровому папері формату А4. Приклад таких схем котлоагрегату, що розглядується представлені нижче.

#### 4.1. Енергетичний баланс котельної установки К-50-40/14

$$Q_{вх} = Q_{вих}.$$

4.1.1. Розрахуємо енергетичний баланс топки (згорання палива),

$$Q_{\text{вх}} = Q'_{\text{топки}} + Q''_{\text{ВП2}} = 26,2 + 1,6 = 27,8 \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{вих}} = Q''_{\text{топки}} = 23,7 \text{ кДж}.$$

4.1.2. Розрахуємо енергетичний баланс випарної поверхні,

$$Q_{\text{вх}} = Q'_{\text{исп.пов}} + Q''_{\text{ВЭ2}} = 23,7 + 4,1 = 27,8 \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{вих}} = Q''_{\text{исп.пов}} + Q_{\text{потр}} = 19,9 + 7,9 = 27,8 \text{ кДж}.$$

4.1.3. Розрахуємо енергетичний баланс водяного економайзера 2,

$$Q_{\text{вх}} = Q'_{\text{ВЭ2}} + Q''_{\text{ВЭ1}} = 7,9 + 0,54 = 8,44 \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{вих}} = Q''_{\text{ВЭ2}} + Q'' = 4,1 + 4,34 = 8,44 \text{ кДж}.$$

4.1.4. Розрахуємо енергетичний баланс повітропідігрівника 2,

$$Q_{\text{вх}} = Q'_{\text{ВП2}} + Q''_{\text{ВП1}} = 4,34 + 1,4 = 5,74 \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{вих}} = Q''_{\text{ВП2}} + Q'' = 4,14 + 1,6 = 5,74 \text{ кДж}.$$

4.1.5. Розрахуємо енергетичний баланс водяного економайзера 1,

$$Q_{\text{вх}} = Q'_{\text{ВЭ1}} = 4,14 \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{вих}} = Q''_{\text{ВЭ1}} + Q'' = 0,54 + 3,6 = 4,14.$$

4.1.6. Розрахуємо енергетичний баланс повітропідігрівника 1,

$$Q_{\text{вх}} = Q'_{\text{ВП1}} = 3,6 \text{ кДж}$$

$$Q_{\text{вих}} = Q''_{\text{ВП1}} + Q'' = 1,4 + 2,2 = 3,6$$

## 4.2 Ексергетичний баланс котельної установки К-50-40/14,

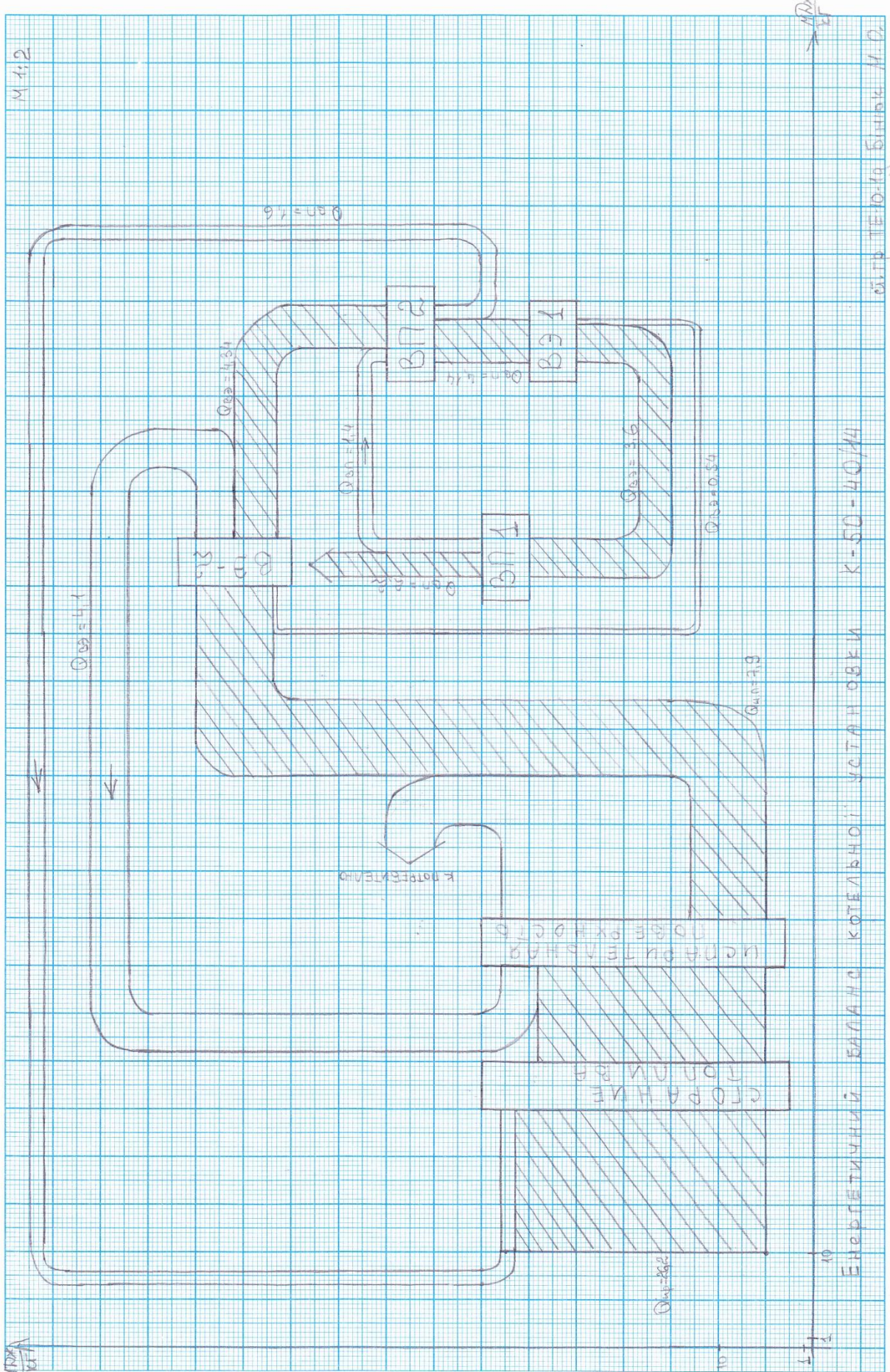
$$E_{\text{вх}} = E_{\text{вих}}.$$

4.2.1. Розрахуємо ексергетичний баланс топки (згорання палива),

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{ПС}} + E''_{\text{ВП2}} = (K * Q_{\text{н}}^{\text{P}} * B) + (B * \alpha'_{\text{т}} * e_{\text{ВП2}}) = (1 * 23,67 * 1,631) + (1,631 * 1,2 * 0,712) = 39,99$$



Підприємство: ПАТ "Львівська фабрика теплової енергетики" - Львів, вул. Ягелонська, 7, м. Львів, 79013, Україна; тел.: (032) 238-14-76, факс: (032) 238-16-34



$$E_{\text{вих}} = E_{\text{пс}} + E_{\text{гор}} = [i_{\text{пс}} - i_0 - T_0(S_{\text{пс}} - S_0)] + (B * e_{\text{гор}}) = [12903,36 - 125,66 - 303(1,775 - 0,4365)] + (1,631 * 3,192) =$$



39,99.

4.2.2. Розрахуємо ексергетичний баланс випарної поверхні,

$$\begin{aligned}
E_{\text{вх}} &= E_{\text{пс}} + E''_{\text{вэ2}} \\
&= \{B * [i_{\text{пс}}^{\text{роп}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}}^{\text{роп}} - S_o)]\} \\
&\quad + \{D * [i''_{\text{эк2}} - i_o - T_o(S''_{\text{эк2}} - S_o)]\} \\
&= \{1,631 * [22111 - 125,66 - 303(6,4667 - 0,4365)]\} \\
&\quad + \{0,4865 * [1032,276 - 125,66 - 303(2,45224 - 0,4365)]\} \\
&= 36,13,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{вих}} &= E_{\text{то}} + E_{\text{потр}} + E_{\text{пс}} = [B * (de_{\text{т}} + de_{\text{ф}} + de_{\text{кп}} + de_{\text{пп}})] + \{D * \\
&[i_{\text{пп}} - i_{\text{пв}} - T_o(S_{\text{пп}} - S_{\text{пв}})]\} + \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} = [1,631 * \\
&(1,605 + 4,611)] + \{0,4865 * [2928,44 - 419,06 - 303(6,7661 - 1,3069)]\} + \\
&\{1,631 * [9,2235 - 125,66 - 303(1,8573 - 0,4365)]\} = 36,13
\end{aligned}$$

4.2.3. Розрахуємо ексергетичний баланс водяного економайзера 2,

$$\begin{aligned}
E_{\text{вх}} &= E_{\text{пс}} + E''_{\text{вэ1}} = \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} + \{D * [i''_{\text{эк1}} - i_o - \\
&T_o(S''_{\text{эк1}} - S_o)]\} = \{1,631 * [9,2235 - 125,66 - 303(1,8573 - 0,4365)]\} + \\
&\{0,4865 * [492,591 - 125,66 - 303(1,4967 - 0,4365)]\} = 24,09
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{вих}} &= E_{\text{то}} + E''_{\text{вэ}} + E_{\text{пс}} = (B * de_{\text{вэ2}}) + \{D * [i''_{\text{эк2}} - i_o - T_o(S''_{\text{эк2}} - S_o)]\} + \\
&\{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} = (1,631 * 1,46052) + \{0,4865 * \\
&[1032,276 - 125,66 - 303(2,45224 - 0,4365)]\} + \{1,631 * [638,822 - \\
&125,66 - 303(1,85685 - 0,4365)]\} = 24,09
\end{aligned}$$

4.2.4. Розрахуємо ексергетичний баланс повітропідігрівача 2,

$$\begin{aligned}
E_{\text{вх}} &= E_{\text{пс}} + E_{\text{вп1}} = \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} + (B * V_{\text{в}}^o * \alpha'_{\text{т}} * e_{\text{вэ}}) = \\
&\{1,631 * [638,822 - 125,66 - 303(1,85685 - 0,4365)]\} + (1,631 * 6,1523 * \\
&1,43 * 0,10191) = 19,74
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{\text{вих}} &= E_{\text{то}} + E''_{\text{вп2}} + E_{\text{пс}} = (B * de_{\text{вп2}}) + (B * \alpha'_{\text{т}} * e_{\text{вп2}}) + \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - \\
&T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} = (1,631 * 0,243) + (1,631 * 1,43 * 0,712) + \{1,631 * \\
&[4842 - 125,66 - 303(0,956 - 0,4365)]\} = 19,74
\end{aligned}$$

4.2.5. Розрахуємо ексергетичний баланс водяного економайзера 1,

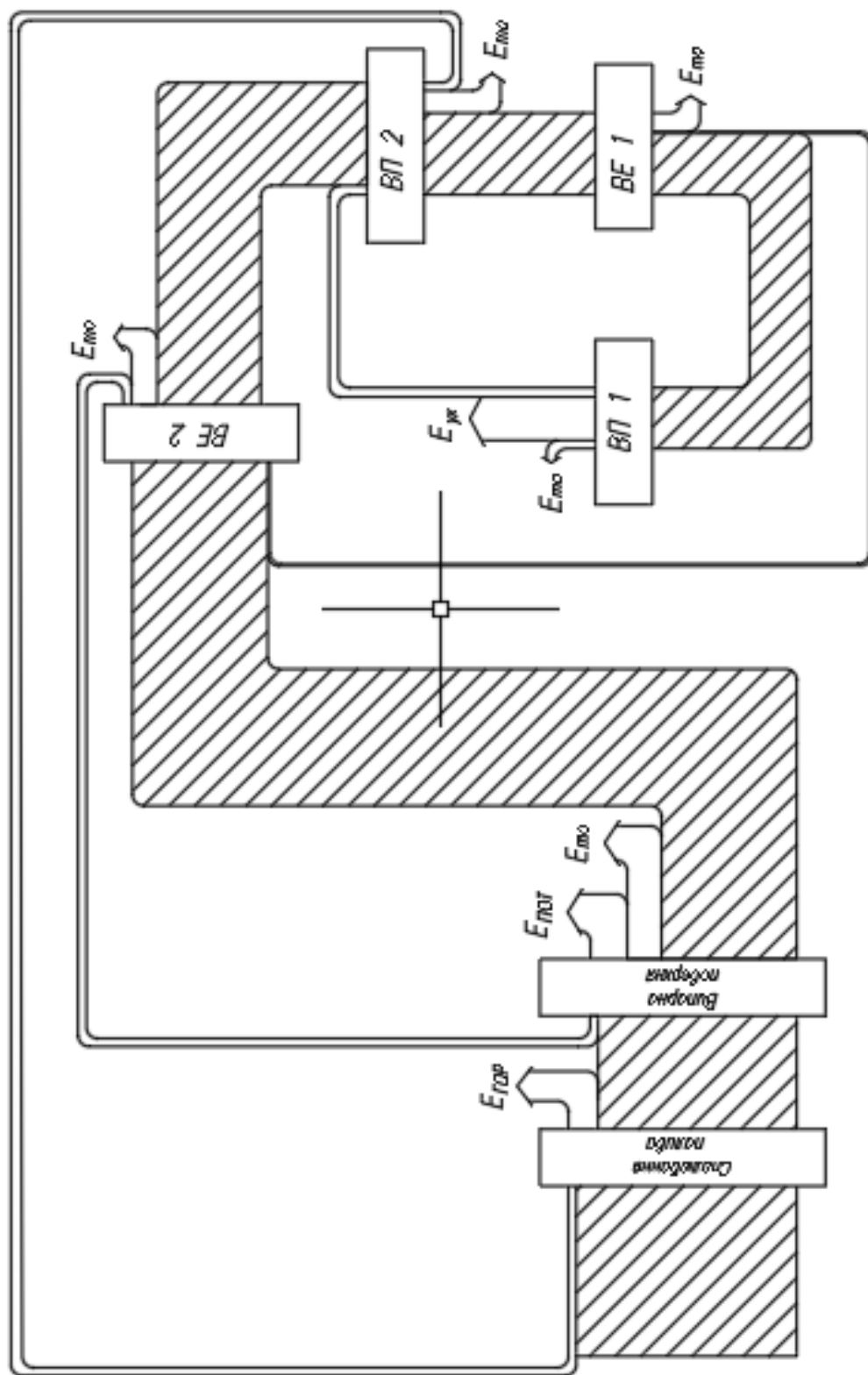
$$E_{\text{вх}} = E_{\text{пс}} = \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} = \{1,631 * [4842 - 125,66 - 303(0,956 - 0,4365)]\} = 14,42$$

$$E_{\text{вих}} = E_{\text{то}} + E''_{\text{вз1}} + E_{\text{пс}} = (B * de_{\text{вз1}}) + \{D * [i''_{\text{эк1}} - i_o - T_o(S''_{\text{эк1}} - S_o)]\} + \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} = (1,631 * 0,904) + \{0,4865 * [638,822 - 125,66 - 303(1,8573 - 0,4365)]\} + \{1,631 * [492,59 - 125,66 - 303(1,4967 - 0,4365)]\} = 14,42$$

4.2.6 Розрахуємо ексергетичний баланс повітропідігрівача 1,

$$E_{\text{вх}} = E_{\text{пс}} = \{B * [i_{\text{пс}} - i_o - T_o(S_{\text{пс}} - S_o)]\} = \{1,631 * [492,59 - 125,66 - 303(1,4967 - 0,4365)]\} = 10,73$$

$$E_{\text{вих}} = E_{\text{то}} + E_{\text{yx}} + E_{\text{вп1}} = (B * de_{\text{вп1}}) + (B * V_{\text{пс}} * e_{\text{yx}}) + (B * \alpha'_T * e_{\text{вз}} * V_{\text{в}}^o) = (1,631 \cdot 0,1019) + (1,631 \cdot 3,284 \cdot 1,42078) + (1,631 \cdot 1,59 \cdot 0,10191 \cdot 6,1523) = 10,73.$$

$\frac{MДж}{кг}$ 

 $\frac{кДж}{кг}$ 

Эксергетичный баланс котельной установки К-50-40/14

### 4.3 Термодинамічна ефективність технологічних агрегатів

Термодинамічна оцінка ефективності паливовикористовуючих установок ґрунтується на двох видах коефіцієнтів ефективності: енергетичних (термічних) і ексергетичних. Енергетичні коефіцієнти ефективності характеризують роботу, яку має система, а ексергетичні характеризують максимальну роботу, яка може бути отримана в системі.

Енергетичні (термічні) коефіцієнти використання тепла палива (к.в.т.) показують, яка частка тепла палива використовується для протікання технологічного процесу.

Ексергетичні коефіцієнти корисної дії (к.к.д.) показують, яка частина ексергії палива витрачається на зміну ексергії матеріалу в технологічному процесі.

Оскільки робота, яка може бути отримана в системі, нижче тієї, яку має система (враховуючи, що реальний процес супроводжується рядом втрат від незворотності), то ексергетичні к. п. д. мають більш низькі значення в порівнянні з енергетичними к.в.п.

При розгляді енергетичних к.в.п. в якості основної величини приймається

ентальпія  $1 \text{ м}^3$  продуктів горіння ( при холодних компонентах )  $i_T = \frac{Q_H^P}{V_{п.с}}$  , а

при ексергетичних к. п. д. - ексергія  $1 \text{ м}^3$  продуктів горіння  $e_T = \frac{E_T}{V_{п.с}}$  . Числові

значення  $i_T$  і  $e_T$  рівні.

Система енергетичних к.в.п. і ексергетичних к.п.д. охоплює три поняття : ефективність ідеального апарату , відносна ефективність реального апарату і його абсолютна ефективність.

Під ідеальним апаратом розуміють пристрій, який не має теплових втрат у робочому просторі: первинний теплоносій залишає ідеальний апарат з температурою  $T_{yx}^M$  (ентальпія  $i_{yx}$ ), що дорівнює температурі тіла, яке сприймає тепло, в перетині відводу первинного теплоносія. к. в. т. (або к. п.

д.) ідеального апарату  $\eta_{ид}$  залежить від схеми теплообміну, температурного рівня процесу і його характеру і має різні значення для апаратів різних типів і технологічного призначення.

Під відносним к.в.п. (або к.к.д.)  $\eta_o$  розуміють відношення дійсної повної різниці ентальпій (ексергії) первинного теплоносія в робочому просторі реального апарату з урахуванням втрат у ньому та істинних параметрів на виході з теплообмінника до різниці ентальпій (ексергії) в ідеальному апараті. Сенс  $\eta_o$  полягає в тому, що він є критерієм для порівняльної оцінки реального апарату по відношенню до ідеального.

Абсолютний к.в.п. (к.к.д.)  $\eta_a = \eta_{ид} \eta_o$  характеризує міру використання підведеного тепла (ексергії), витраченого на процес у реальному апараті.

Формули для обчислення термодинамічної ефективності стосовно, наприклад, до нагрівальних паливних печей наведені нижче.

ККД Ефект.	Енергетичний к.в.п.	Ексергетичний к.к.д.
Ефективність ідеальної печі	$\eta_{ид}^{ен} = \frac{i_T - i_{УХ}^M}{i_T}$	$\eta_{ид}^{екс} = \eta_{ид}^{ен} \left( 1 - \frac{T_o}{\overline{T}_{УХ.М}} \right)$
Відносна ефективність реальної печі	$\eta_o^{ен} = \frac{\eta i_T - (i_2 + \Delta i_{ПОТ}^{КАМ})}{i_T - i_{УХ}^M}$	$\eta_o^{екс} = \eta_o^{ен} \frac{1 - \frac{T_o}{\overline{T}_M}}{1 - \frac{T_o}{\overline{T}_{УХ.М}}}$
Абсолютна ефективність реальної печі	$\eta_a^{ен} = \frac{q_{ПОЛ}}{V_{П.С} i_T}$	$\eta_a^{екс} = \eta_a^{ен} \left( 1 - \frac{T_o}{\overline{T}_M} \right)$

У формулах позначено:

$i_2$  - ентальпія 1 м<sup>3</sup> відхідних з печі продуктів згорання при температурі  $T_2$ ;

$\eta = 1 + q_{B3} - q_{XH}$  - коефіцієнт тепловиділення при спалюванні палива в робочому просторі печі;

$\Delta i_{ПОТ}^{КАМ}$  - втрати тепла в робочій камері печі;

$q_{ПОЛ}$  - корисна витрата тепла палива на нагрів металу  $q_{ПОЛ} = \frac{Q_M}{B}$ , кДж/м<sup>3</sup>;

$V_{п.с}$  - обсяг продуктів згорання від спалювання одиниці палива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

$\bar{T}_{ГОР}^{VX.M}$  - середня термодинамічна температура продуктів згорання в інтервалі  $T_{ГОР.X}$  (теоретична температура горіння при холодних компонентах горіння) і  $T^{VX.M}$ , К;

$$\bar{T}_{ГОР}^{VX.M} = \frac{T_{ГОР.X} - T^{VX.M}}{\ln \frac{T_{ГОР.X}}{T^{VX.M}}}, \quad (3.38)$$

$\bar{T}_M$  - середня термодинамічна температура металу в процесі його нагрівання від початкової  $T'_M$  до кінцевої  $T''_M$  температури;

$$\bar{T}_M = \frac{T''_M - T'_M}{\ln \frac{T''_M}{T'_M}}, \quad (3.39)$$

$\Delta i_M$  - приріст ентальпії 1 кг сталі в печі, кДж/кг;

$T_o$  - температура навколишнього середовища, К;

$i_{VX}^M$  - ентальпія 1 м<sup>3</sup> продуктів згорання при середній температурі поверхні нагрівання металу, кДж/м<sup>3</sup>.

#### 4.4 Ефективність комбінованих тепловикористовуючих установок

При використанні ВЕР для цілей, пов'язаних з проведенням основного технологічного процесу, коефіцієнти внутрішнього використання тепла (ексергії) палива

$$\eta_{ВН}^{ен} = \frac{\Delta i_{ВН}}{i_T}; \quad \eta_{ВН}^{екс} = \frac{\Delta E_{ВН}}{i_T}, \quad (3.40)$$

де  $\Delta i_{BH}$  ( $\Delta E_{BH}$ ) - корисна зміна ентальпії ( ексергії ) первинного теплоносія (продуктів горіння), викликане, наприклад в печах, попереднім підігрівом компонентів горіння для спалювання палива або матеріалу.

Якщо ВЕР використовуються для зовнішніх по відношенню до основного технологічного процесу цілей (наприклад, для отримання пари , гарячої води та ін. ), то коефіцієнти зовнішнього використання тепла (ексергії ) палива.

$$\eta_{НАР}^{ен} = \frac{\Delta i_{НАР}}{i_T}; \quad \eta_{НАР}^{екс} = \frac{\Delta E_{НАР}}{i_T}, \quad (3.41)$$

Енергетичний к. в. п. ( ексергетичний к. п. д.) технологічної установки, що складається з основного агрегату і пристроїв для внутрішнього теплоспоживання.

$$\eta_{Т.У}^{ен} = \eta_a^{ен} + \eta_{BH}^{ен}; \quad \eta_{Т.У}^{екс} = \eta_a^{екс} + \eta_{BH}^{екс}, \quad (3.42)$$

Енергетичний к.в.п. ( ексергетичний к.к.д.) комбінованої установки, що з технологічної установки і пристроїв для зовнішнього використання тепла (ексергії) ВЕР.

$$\eta_{К.У}^{ен} = \eta_{Т.У}^{ен} + \eta_{НАР}^{ен}; \quad \eta_{К.У}^{екс} = \eta_{Т.У}^{екс} + \eta_{НАР}^{екс}, \quad (3.43)$$

Якщо через  $b_{Т.У}$  позначити питому витрату палива в технологічній установці , а  $b_a$  - питому витрату палива в основному агрегаті , що не має внутрішнього теплоспоживання , то

$$\frac{b_{Т.У}}{b_a} = \frac{1}{1 + \frac{\eta_{BH}^{ен}}{\eta_a^{ен}}} = \frac{\eta_a}{\eta_{BH} + \eta_a}, \quad (3.44)$$

тобто внутрішнє теплоспоживання у всіх випадках веде до зменшення питомої витрати технологічного палива.

Навпаки , зовнішнє теплоспоживання не впливає на економію палива в технологічній установці , а веде до зниження витрати палива.

На підставі (3.40) і (3.41) для будь-якого  $i$ -го елемента теплоутилізаційної частини комбінованої установки енергетичний к.в.п.

$$\eta_i^{\text{ен}} = \left(1 - K_i^{\text{ен}}\right) \frac{i_i - i_{i+1}}{i_T}, \quad (3.45)$$

де  $i_i - i_{i+1}$  - наявна різниця ентальпій первинного теплоносія в даному ланці, кДж/м<sup>3</sup>;

$K_i^{\text{ен}}$  - коефіцієнт енергетичних втрат в цій же ланці.

Ексергетичний показник елементів теплоутилізаційної установки (повітро-, газопідігрівачі та ін.) без зміни агрегатного стану вторинних теплоносіїв,

$$\eta_i^{\text{екс}} = \eta_i^{\text{ен}} \left(1 - \frac{T_O}{\bar{T}_{\text{ВН}}}\right), \quad (3.46)$$

де  $\bar{T}_{\text{ВН}}$  - середня термодинамічна температура вторинного теплоносія в розглянутій ланці, К.

Для парогенераторів на відхідних газах (ПВГ),

$$\eta_{\text{ПОГ}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{ПОГ}}^{\text{ен}} \left(1 - T_O \frac{s_{\text{П}} - s_{\text{П.В}}}{i_{\text{П}} - i_{\text{П.В}}}\right), \quad (3.47)$$

де  $s_{\text{П}}, s_{\text{П.В}}, i_{\text{П}}, i_{\text{П.В}}$  - ентропії та ентальпії пара ПВГ і живильної води.

У відповідності зі схемою комбінованої пічної установки ексергетичні коефіцієнти виражаються наступними залежностями :

$$\left. \begin{aligned} \text{I. Печь-воздухоподогреватель} & - \eta_{\text{К.У}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{а}}^{\text{екс}} + \eta_{\text{В.П}}^{\text{ен}} \left(1 - \frac{T_O}{\bar{T}_{\text{ВЗ}}}\right); \\ \text{II. Печь ПОГ} & - \eta_{\text{К.У}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{а}}^{\text{екс}} + \eta_{\text{ПОГ}}^{\text{ен}} \left(1 - T_O \frac{s_{\text{П}} - s_{\text{П.В}}}{i_{\text{П}} - i_{\text{П.В}}}\right); \\ \text{III. Печь - ВП - ПОГ} & - \eta_{\text{К.У}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{а}}^{\text{екс}} + \eta_{\text{В.П}}^{\text{ен}} \left(1 - \frac{T_O}{\bar{T}_{\text{ВЗ}}}\right) + \eta_{\text{ПОГ}}^{\text{ен}} \left(1 - T_O \frac{s_{\text{П}} - s_{\text{П.В}}}{i_{\text{П}} - i_{\text{П.В}}}\right); \\ \text{IV. Печь-ПОГ-ВП} & - \eta_{\text{К.У}}^{\text{екс}} = \eta_{\text{а}}^{\text{екс}} + \eta_{\text{ПОГ}}^{\text{ен}} \left(1 - T_O \frac{s_{\text{П}} - s_{\text{П.В}}}{i_{\text{П}} - i_{\text{П.В}}}\right) + \eta_{\text{В.П}}^{\text{ен}} \left(1 - \frac{T_O}{\bar{T}_{\text{ВЗ}}}\right), \end{aligned} \right\} \quad (3.48)$$

де  $\bar{T}_{\text{ВЗ}}$  - середня термодинамічна температура повітря в ВП, К;



$\eta_{В.П}^{ен}, \eta_{ПОГ}^{ен}$  - енергетичні коефіцієнти використання палива, відповідно, в ВП і ПВГ.

#### 4.5 Ексергетичний метод розподілу витрати палива в комбінованих установках

Витрата палива на технологічні агрегати складе,

$$B_T = a_T^{ЭКC} B, \quad (3.49)$$

де  $B$  - витрата палива в комбінованій установці.

При цьому,

$$a_T^{ЭКC} = \frac{\Delta E_T}{\Delta E_p}; \quad a_{ЭН}^{ЭКC} = \frac{\Delta E_{ЭН}}{\Delta E_p}. \quad (3.50)$$

Загальна наявна різниця ексергії в комбінованій установці,

$$\Delta E_p = \Sigma E^{BX} - \Sigma E^{YX}, \quad (3.51)$$

де  $\Sigma E^{BX}, \Sigma E^{YX}$  - сумарна ексергія всіх енергоносіїв на вході в комбіновану установку і на виході з неї, кДж/с.

Витрата ексергії в технологічній частині комбінованої установки,

$$\Delta E_T = \Sigma E^{BX} - \Sigma E^{OTX}. \quad (3.52)$$

Витрата ексергії в енергетичній (утилізаційній) частині комбінованої установки,

$$\Delta E_{ЭН} = E^{OTX} - \Sigma E^{YX}. \quad (3.53)$$

При розподілі витрати палива пропорційно витраті ентальпії в технологічній та енергетичній частинах комбінованої установки маємо,

$$B'_T = a_{Tи} B; \quad B'_{ЭН} = a_{ЭНи} B, \quad (3.54)$$

де  $a_{Tи}$  і  $a_{ЭНи}$  - коефіцієнти, які враховують відповідні частки наявної загальної різниці ентальпії  $\Delta I_p$ , витрачені в розглянутих частинах комбінованої установки.

При цьому:

$$a_{Ti} = \frac{\Delta I_T}{\Delta I_P}; \quad a_{ЭHi} = \frac{\Delta I_{ЭH}}{\Delta I_P} . \quad (3.55)$$

Загальна наявна різниця ентальпії в комбінованій установці,

$$\Delta I_P = \Sigma I^{BX} - \Sigma I^{YX} , \quad (3.56)$$

де  $\Sigma I^{BX}, \Sigma I^{YX}$  - сумарна ентальпія всіх енергоносіїв на вході в комбіновану установку і на виході з неї, кДж/с.

Перепад ентальпії в технологічній частині комбінованої установки,

$$\Delta I_T = \Sigma I^{BX} - I^{OTX} . \quad (3.57)$$

Перепад ентальпії в енергетичній частині комбінованої установки,

$$\Delta I_{ЭH} = I^{OTX} - \Sigma I^{YX} . \quad (3.58)$$

При віднесенні ексергії ( ентальпії ) нагрітого повітря до технологічної частини установки, а ексергії ( ентальпії ) охолодження елементів печі (випарне охолодження) - до енергетичної частини,

$$\left. \begin{aligned} \Delta E'_T &= \Delta E_T + E_D - E_{OxH}; & \Delta I'_T &= \Delta I_T - I_{OxH} + I_D; \\ \Delta E'_{ЭH} &= \Delta E_{ЭH} + E_{OxH} - E_D; & \Delta I'_{ЭH} &= \Delta I_{ЭH} + I_{OxH} - I_D; \end{aligned} \right\} , \quad (3.59)$$

$$\left. \begin{aligned} a'_T &= \frac{\Delta E'_T}{\Delta E_P}; & a'_{Ti} &= \frac{\Delta I'_T}{\Delta I_P}; \\ a'_{ЭH} &= \frac{\Delta E'_{ЭH}}{\Delta E_P}; & a'_{ЭHi} &= \frac{\Delta I'_{ЭH}}{\Delta I_P}. \end{aligned} \right\} . \quad (3.60)$$

Ефективність комбінованої установки при внутрішньому тепловикористанні вище, ніж при зовнішньому. Тому для зовнішніх (по відношенню до процесу в печах) цілей слід використовувати тільки надлишок наявних ВЕР.

Термодинамічна ефективність виявляється тим вище, чим менше втрати від незворотності процесів. Прагнення до зниження цих втрат приводить до висновку, що теплообмін між гріючим і нагріваємым агентами повинен протікати при мінімальній різниці температур. При цьому термодинамічний аналіз суперечить технічним та економічним аспектам проблеми.

Таким чином, на основі одного лише термодинамічного аналізу задачі створення економічно виправданої установки з використанням ВЕР не може бути вирішена. Термодинамічна оцінка ефективності вказує тільки загальні принципи вибору напрямків використання ВЕР. Остаточне рішення задачі вибору напрямку і методу використання ВЕР має ґрунтуватися на техніко - економічних порівняннях за різними варіантами.