

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних
машин

01-06-81М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни
«Високотемпературні теплотехнологічні процеси
та установки»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності 144
«Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія»
усіх форм навчання

Рекомендовано науково-
методичною радою
з якості ННІВГП
Протокол №10 від 20.06.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за ОПП «Теплоенергетика» спеціальності 144 «Теплоенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія» усіх форм навчання / [Електронне видання] / Костюк О. П. – Рівне : НУВГП, 2023. – 44 с.

Укладач: Костюк О. П., к.т.н., доцент кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск: Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Костюк О. П.

© О. П. Костюк, 2023
© НУВГП, 2023

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Теплообмін у високотемпературних установках з великим об'ємом вільного простору (зовнішній теплообмін).....	4
1.1 Приведена ступінь чорноти та приведений коефіцієнт випромінювання робочого простору.....	4
1.2 Теплообмін при рівномірно-розподілених джерелах випромінювання.....	8
1.3 Визначення температури відхідних продуктів згорання з використанням критерію Больцмана.....	14
2. Теплообмін в шарі кускового та зернистого матеріалу.....	17
2.1 Визначення густини теплового потоку.....	17
2.2 Визначення маси частинки в “киплячому” шарі.....	20
3. Внутрішній теплообмін.....	23
3.1 Нагрів матеріалу з постійною швидкістю по закону $t_M = \theta \cdot \tau$	23
3.2 Нагрів матеріалу при постійній температурі в робочому просторі, $T_{nevi} = const$	26
3.3 Визначення часу нагріву матеріалу в методичній печі.....	29
4. Рециркуляція продуктів згорання палива як засіб регулювання температури.....	32
4.1 Калориметрична температура горіння палива з врахуванням рециркуляції продуктів згорання.....	32
5. Регенерація теплоти відхідних газів від високотемпературних установок.....	35
5.1 Особливості розрахунку металевого рекуператора по безрозмірним температурам.....	35
5.2 Коефіцієнт регенерації теплоти матеріалу, що пройшов термообробку.....	39
5.3 Ступінь регенерації теплоти відхідних продуктів згорання... ..	40
5.4 Коефіцієнт тепловикористання палива без попереднього підігріву та з попереднім підігрівом компонентів горіння палива.....	42
Література.....	44

ВСТУП

У методичних вказівках наведені приклади розв'язку окремих задач по темам які вивчаються в дисципліні «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки». Викладений матеріал може бути використаний при проведенні практичних занять, виконанні курсових та дипломних проєктів, а також в розрахунково-графічних та контрольних роботах.

Розв'язок прикладів базується на вивчених раніше дисциплінах «Технічна термодинаміка», «Тепломасообмін», «Паливо та пристрої для його спалювання» та інші. Розв'язок деяких задач починається з розрахунків горіння палива. Самі розрахунки горіння палива в методичних вказівках не наводяться, а наведені лише їх результати розрахунків. Доцільно попередні розрахунки горіння палива виконувати на ЕОМ (див. п. 6).

Більшість з наведених прикладів потребують довідкових матеріалів у вигляді або теплофізичних характеристик робочих тіл (теплоносіїв), або у вигляді графічних залежностей та таблиць, які наведені в літературних джерелах. Крім того, рекомендується використовувати таблиці для проведення розрахунків з дисциплін: «Паливо та пристрої для його спалювання», «Системи виробництва та розподілу енергоносіїв» (розділ «Системи газопостачання»), «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки», які є на кафедрі теплоенергетики та машинознавства. Для розв'язку прикладів 1.3, 4.1, та прикладу 5.2 на кафедрі є математичні програми, які дозволяють розв'язувати та перевіряти правильність аналітичного розв'язку задач на ЕОМ.

1. Теплообмін у високотемпературних установках з великим об'ємом вільного простору (зовнішній теплообмін)

1.1. Приведена ступінь чорноти та приведений коефіцієнт випромінювання робочого простору

Приклад 1.1

Розрахувати приведену ступінь чорноти та приведений коефіцієнт випромінювання в камерній печі з викатним подом при розрахунковій температурі $t_{розр} = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$. Валки вкладаються рядами на підставках.

Кількість валків в печі $n=12$ штук. Розміри валка: діаметр та довжина бочки $d_{\delta} \times l_2 = 0,83 \times 1,35$ м, шийки $d_{ш} \times l_1 = 0,34 \times 0,53$ м. Ступінь чорноти поверхні валків прийняти $\varepsilon_M = 0,7$. Абсолютний тиск в робочому просторі печі $P_{абс} = 1$ атм. Ступінь екранування валків не враховувати. Об'ємні частки трьохатомних газів продуктів згоряння в розрахунках прийняти $r_{CO_2} = 0,081$, $r_{H_2O} = 0,239$. Схема валка, розміщення заготовок (валків) на поду печі та поперечний розріз робочого простору наведені на рис. 1.1.

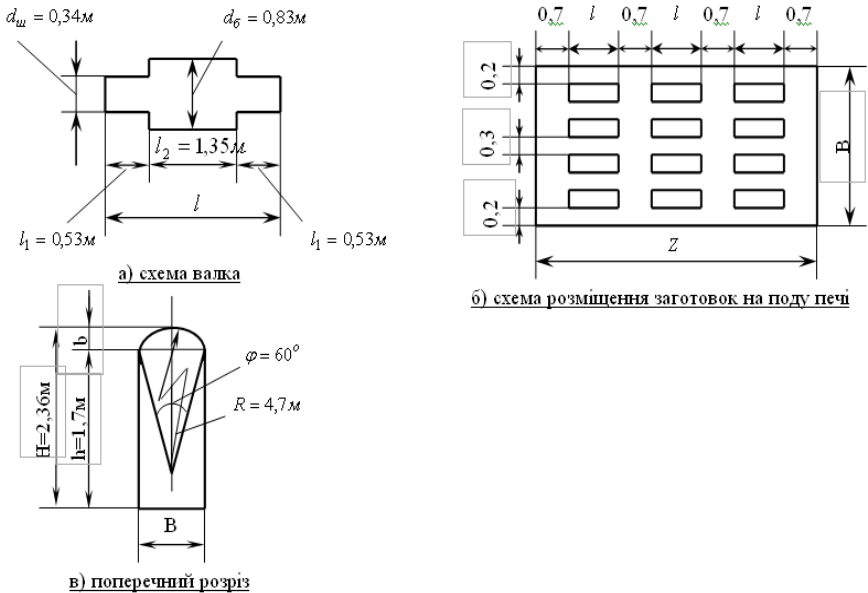


Рис.1.1 Схема валка, розміщення заготовок на поду печі та поперечний розріз робочого простору.

Короткий запис умови прикладу:

$$t_{розр} = 1000^{\circ}C; \quad \varepsilon_M = 0,7; \quad n = 12 \text{ шт.};$$

$$P_{абс} = 1 \text{ атм}; \quad r_{CO_2} = 0,081; \quad r_{H_2O} = 0,239;$$

$$\text{Бочка } d_{\delta} \times l_2 = 0,83 \times 1,35 \text{ м}; \quad \text{Шийка } d_{ш} \times l_1 = 0,34 \times 0,53 \text{ м.}$$

Розв'язання

Парціальні тиски P_{CO_2} и P_{H_2O} в продуктах згорання

$$P_{CO_2} = P_{абс} \cdot r_{CO_2} = 1 \cdot 0,081 = 0,081 \text{ ата};$$

$$P_{H_2O} = P_{абс} \cdot r_{H_2O} = 1 \cdot 0,239 = 0,239 \text{ ата}.$$

Довжина робочого простору печі, Z (див. рис. 1.1)

$$Z = l \cdot 3 + (3-1) \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,7 = 2,41 \cdot 3 + 2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,7 = 10,03 \text{ м},$$

де $l = 2 \cdot l_1 + l_3 = 2 \cdot 0,53 + 1,35 = 2,41 \text{ м}.$

Ширина робочого простору печі, B

$$B = d_{\bar{o}} \cdot 4 + (4-1) \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,2 = 0,83 \cdot 4 + 3 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,2 = 4,62 \text{ м}.$$

Поверхня футеровки, враховуючи под печі, F_{KL}

$$F_{KL} = F_{боклов.} \cdot 2 + F_{торця} \cdot 2 + F_{подоу} + F_{склепіння} = 2 \cdot h \cdot Z + 2 \cdot \frac{H+h}{2} \cdot B + B \cdot Z + \frac{\pi \cdot R \cdot \varphi}{180} \cdot Z = 2 \cdot 1,7 \cdot 10,03 + 2 \cdot \frac{2,36+1,7}{2} \cdot 4,62 \cdot 10,03 + \frac{3,14 \cdot 4,7 \cdot 60}{180} \cdot 10,03 = 148,3 \text{ м}^2.$$

Поверхня нагріву матеріалу (без врахування торців шийки), F_M

$$F_M = n \cdot (\pi \cdot d_{\bar{o}} \cdot l_2 + 2 \cdot \pi \cdot d_{ш} \cdot l_1) = 12 \cdot (3,14 \cdot 0,83 \cdot 1,35 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,34 \cdot 0,53) = 55,8 \text{ м}^2.$$

Середньоефективна довжина променя, S_{ef}

$$S_{ef} = 3,5 \cdot \frac{V_{\Gamma}}{F_{KL} + F_M}, \quad (1.1)$$

де V_{Γ} - об'єм, який займають продуки згорання (газ); $V_{\Gamma} = V_{KL} - V_M$

V_{KL} - об'єм робочого простору печі;

V_M - об'єм, який займають валки;

$$V_{KL} = B \cdot Z \cdot \frac{H-h}{2} = 4,6 \cdot 10,03 \cdot \frac{2,36-1,7}{2} = 93,66 \text{ м}^3.$$

$$V_M = n \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \cdot l_2 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_{ш}}{2} \right)^2 \cdot l_1 \right] =$$

$$= 12 \cdot \left[3,14 \cdot \left(\frac{0,83}{2} \right)^2 \cdot 1,35 + 2 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{0,34}{2} \right)^2 \cdot 0,53 \right] = 9,9144 \text{ м}^3.$$

$$V_{\Gamma} = V_{КД} - V_M = 93,66 - 9,9144 = 83,7456 \text{ м}^3.$$

$$S_{эф} = 3,5 \cdot \frac{83,7456}{148,3 + 55,8} = 1,436 \text{ м}.$$

Ступінь чорноти газів, ε_{Γ}

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \cdot \beta, \quad (1.2)$$

де ε_{CO_2} - ступінь чорноти CO_2 , $\varepsilon_{CO_2} = f(t_{розр}; P_{CO_2} \cdot S_{эф})$;

ε_{H_2O} - ступінь чорноти H_2O , $\varepsilon_{H_2O} = f(t_{розр}; P_{H_2O} \cdot S_{эф})$;

β - поправочний коефіцієнт, $\beta = f(P_{H_2O}; P_{H_2O} \cdot S_{эф})$.

$$P_{CO_2} \cdot S_{эф} = 0,081 \cdot 1,436 = 0,1163 \text{ м} \cdot \text{ата} \stackrel{\times 10^4 \cdot 9,81}{=} 0,011405 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$P_{H_2O} \cdot S_{эф} = 0,239 \cdot 1,436 = 0,343 \text{ м} \cdot \text{ата} \stackrel{\times 10^4 \cdot 9,81}{=} 0,0336 \cdot 10^6 \text{ м} \cdot \text{Па};$$

$$P_{H_2O} = 0,239 \text{ ата} \stackrel{\times 10^4 \cdot 9,81}{=} 2,34459 \cdot 10^4 \text{ Па} = 23,44 \text{ кПа}.$$

За номограмою [1] стор. 165...167 або за додатком 1 при $t_{розр} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ визначаємо ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , β .

$t_{розр} \text{ }^{\circ}\text{C}$	ε_{CO_2}	ε_{H_2O}	β
1000	0,11	0,2	1,12

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \cdot \beta = 0,11 + 0,2 \cdot 1,12 = 0,334.$$

Приведена ступінь чорноти за Тімофєєвим В.М., $\varepsilon_{нр}$

$$\varepsilon_{np} = \frac{\varepsilon_M \cdot \varepsilon_\Gamma \cdot [\psi \cdot (1 - \varepsilon_\Gamma) + 1]}{\psi \cdot (1 - \varepsilon_\Gamma) \cdot [\varepsilon_M + \varepsilon_\Gamma \cdot (1 - \varepsilon_M)] + \varepsilon_\Gamma}, \quad (1.3)$$

де ψ - ступінь розвитку променесприймаючої поверхні кладки печі

$$\psi = \frac{F_n}{F_{KЛ}} = \frac{F_M}{F_{KЛ}} = \frac{55,8}{148,3} = 0,376,$$

де $F_n = F_M$, так як поверхня заготовок опромінюється зі всіх сторін (встановлені на підставках)

$$\varepsilon_{np} = \frac{0,7 \cdot 0,334 \cdot [0,376 \cdot (1 - 0,334) + 1]}{0,376 \cdot (1 - 0,334) \cdot [0,7 + 0,334 \cdot (1 - 0,7)] + 0,334} \approx 0,55.$$

Приведений коефіцієнт випромінювання, C_{np}

$$C_{np} = C_o \cdot \varepsilon_{np} = 5,67 \cdot 0,55 = 3,12 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}.$$

Приведений коефіцієнт випромінювання можна також визначити за наближеною формулою Тайца М.Ю.

$$C_{np} = \frac{5,67 \cdot \varepsilon_M \cdot \varphi_{МК}}{1 - \varphi_{КЛ} \cdot (1 - \varepsilon_M)}, \quad (1.4)$$

де $\varphi_{МК}$ - кутовий коефіцієнт від поверхні матеріалу на кладку

$$\varphi_{МК} = \frac{F_{КЛ}}{F_M + F_{КЛ}} = \frac{148,3}{55,8 + 148,3} = 0,7266;$$

$$\varphi_{КЛ} = \frac{F_M}{F_{КЛ} + F_M} = \frac{55,8}{148,3 + 55,8} = 0,273;$$

$$C_{np} \approx \frac{5,67 \cdot 0,7 \cdot 0,7266}{1 - 0,273 \cdot (1 - 0,7)} \approx 3,14 \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}.$$

1.2. Теплообмін при рівномірно-розподілених джерелах випромінювання

Приклад 1.2

Визначити продуктивність мідноплавильної відбивальної печі при роботі на холодному дутті ($t_{нов} = 20^{\circ}C$) та при попередньому підігріві повітря до $800^{\circ}C$ ($t_{нов} = 800^{\circ}C$) в автономному повітропідігрівачі.

Паливо – високосірчаний мазут ($\alpha = 1,1$; $d_{нов} = 10 \frac{z H_2O}{M_H^3}$), пристрої для спалювання палива– пневмофорсунки. Довжина ванни печі $L = 32$ м, довжина плавильної зони $L = 26$ м, крок перекриття склепіння $B = 7,5$ м, висота газового шару $h = 1,5$ м. Площа плавильної ванни $F_o \approx F_n = 7,5 \cdot 26 = 195$ м². Склад мазуту: $C^P = 83,4\%$; $H^P = 10\%$; $S^P = 2,9\%$; $O^P = 0,2\%$; $N^P = 0,2\%$; $W^P = 3,0\%$; $A^P = 0,3\%$. Температура підігріву мазуту $t_{нал} = 90^{\circ}C$. Ступінь чорноти поверхні матеріалу який нагрівається в розрахунках прийняти $\varepsilon_M = 0,7$. Температура поверхні яка нагрівається (шихти) $t_M = 1250^{\circ}C$, температура відхідних продуктів згоряння $t_{від} = 1260^{\circ}C$. Питома витрата теплоти на розплав та перегрів 1 кг шихти складає $q_{III} = 1,55 \cdot 10^3 \frac{kJ}{kg}$. Абсолютний тиск в зоні горіння прийняти $P_{абс} = 1$ ама. Втрати теплоти на дисоціацію та хімічний недопал прийняти $q_3 = 2,0\%$. Повздовжній та поперечний розрізи печі наведені на рис. 1.2. Коефіцієнт забруднення променесприймаючої поверхні прийняти $\xi = 0,62$; пірометричний коефіцієнт $\mu = 0,74$.

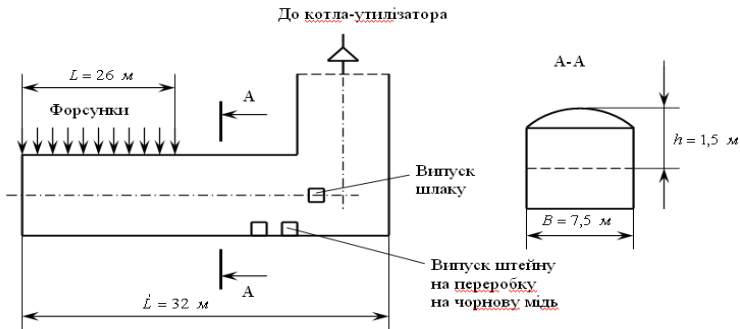


Рис.1.2 – Повздовжній та поперечний розрізи печі

Короткий запис умови прикладу:

$$t_{ное} = 20 \text{ } ^\circ C ; \quad t_M = 1250 \text{ } ^\circ C ; \quad C^P = 83,4\% ;$$

$$t_{ное} = 800 \text{ } ^\circ C ; \quad t_{eid} = 1260 \text{ } ^\circ C ; \quad H^P = 10\% ;$$

$$\alpha = 1,1 ; \quad q_{III} = 1,55 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг} ; \quad S^P = 2,9\% ;$$

$$d_{ное} = 10 \frac{\text{г } H_2O}{\text{м}_n^3} ; \quad P_{abc} = 1 \text{ атм} ; \quad O^P = 0,2\% ;$$

$$F_n = F_M = 195 \text{ м}^2 ; \quad q_3 = 2,0\% ; \quad N^P = 0,2\% ;$$

$$t_{нал} = 90 \text{ } ^\circ C ; \quad \xi = 0,62 ; \quad W^P = 3,0\% ;$$

$$\varepsilon_M = 0,7 ; \quad \mu = 0,74 ; \quad A^P = 0,3\% .$$

Розв'язання

1.1.1 Розрахунок горіння палива

Розрахунок горіння палива виконаний на ЕОМ за програмою PAL-2 при $\alpha = 1,1$; $d_{ное} = 10 \text{ г/м}_n^3$; $t_{нал} = 90 \text{ } ^\circ C$; $q_3 = 2,0\%$ нижче наведені результати розрахунку.

Холодне дуття ($t_{ное} = 20 \text{ } ^\circ C$)

$$r_{RO_2}^{\circ} = 0,13 ; \quad t_K = 1983,78 \text{ } ^\circ C \text{ - калориметрична температура;}$$

$$r_{O_2}^{\circ} = 0,02 ; \quad t_T = 1957,22 \text{ } ^\circ C \text{ - теоретична температура;}$$

$$r_{N_2}^{\circ} = 0,74 ; \quad G_{CO_2}^{\circ} = 7,04 \text{ кмоль/100 кг палива} ;$$

$$r_{H_2O}^{\circ} = 0,11 . \quad G_{H_2O}^{\circ} = 5,79 \text{ кмоль/100 кг палива} ;$$

$$\sum_{i=1}^4 r_i^{\circ} = 1,00 \quad G_{np.32}^{\circ} = 53,22 \text{ кмоль/100 кг палива}$$

Гаряче дуття ($t_{ное} = 800 \text{ } ^\circ C$)

об'ємні частки та G_i^0 ті ж;

$t_K = 2600,16$ °C - калориметрична температура;

$t_T = 2474,47$ °C - теоретична температура.

1.1.2 Холодне дуття

Безрозмірні температури відхідних газів, $\theta_{\text{від}}$ та матеріалу, θ_M

$$\theta_{\text{від}} = \frac{t_{\text{від}} + 273}{t_T + 273} = \frac{1260 + 273}{1957,22 + 273} = 0,6874 ;$$

$$\theta_M = \frac{t_M + 273}{t_T + 273} = \frac{1250 + 273}{1957,22 + 273} = 0,6829 .$$

Теплова потужність печі на холодному дутті при $T_{\text{застіг}} = \text{ver}$, $T_M = \text{const}$.

$$Q_{\text{x.д.}} = C_o \cdot \varepsilon_M \cdot \varepsilon_{\text{np.}}' \cdot F_n \cdot \xi \cdot \left(\frac{T_T}{100} \right)^4 \cdot \Delta_2^{\text{x.д.}} , \quad (1.5)$$

де $\varepsilon_{\text{np.}}'$ - приведена ступінь за Будріним М.В. (видима ступінь чорноти)

$$\varepsilon_{\text{np.}}' = \frac{1 - \varepsilon_T + \omega}{\frac{1 - \varepsilon_T}{\varepsilon_T} \cdot [\varepsilon_M + \varepsilon_T \cdot (1 - \varepsilon_M)] + \omega} , \quad (1.6)$$

де ω - ступінь розвитку променесприймаючої поверхні матеріалу,

$\omega = \frac{F_K}{F_M}$, де F_K - площа внутрішньої поверхні кладки

$$F_K = f_{\text{торця}} + 2 \cdot f_{\text{бок}} + f_{\text{склепіння}} = h \cdot B + 2 \cdot h \cdot L + B \cdot L = 1,5 \cdot 7,5 + 2 \cdot 1,5 \cdot 26 + 7,5 \cdot 26 = 284,25 \text{ м}^2 .$$

$$F_n = B \cdot L = 7,5 \cdot 26 = 195 \text{ м}^2 ;$$

$$\omega = \frac{F_K}{F_n} = \frac{284,25}{195} = 1,458 .$$

Ступінь чорноти газів (продуктів згорання)

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta .$$

$$P_{CO_2}^{\partial} = P_{абс} \cdot \frac{G_{CO_2}^{\partial}}{G_{np.32}^{\partial}} = 1 \cdot \frac{7,04}{53,22} = 0,132 \text{ ат} .$$

$$P_{H_2O}^{\partial} = P_{абс} \cdot \frac{G_{H_2O}^{\partial}}{G_{np.32}^{\partial}} = 1 \cdot \frac{5,79}{53,22} = 0,109 \text{ ат} .$$

$$\bar{S} = 3,5 \cdot \frac{V_{\Gamma}}{F_K + F_M} = 3,5 \cdot \frac{V_{\Gamma}}{F_K + F_n} = 3,5 \cdot \frac{292,5}{284,25 + 195} = 2,136 \text{ м} ,$$

де

$$V_{\Gamma} = h \cdot B \cdot L = 1,5 \cdot 7,5 \cdot 26 = 292,5 \text{ м}^3 ;$$

$$P_{CO_2} \cdot \bar{S} = 0,132 \cdot 2,136 = 0,282 \text{ ат} \cdot \text{м} = 28,2 \text{ ат} \cdot \text{см} .$$

$$P_{H_2O} \cdot \bar{S} = 0,109 \cdot 2,136 = 0,233 \text{ ат} \cdot \text{м} = 23,3 \text{ ат} \cdot \text{см} .$$

$$t_{\text{розр}} = t_K \cdot \mu = 1983,78 \cdot 0,74 = 1467^{\circ} \text{C} .$$

За графіками [2] стор. 209...211 визначаємо ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , β

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,11 \text{ за } P_{CO_2} \cdot \bar{S} = 28,2 \text{ ат} \cdot \text{см} \text{ та } t_{\text{розр}} = 1467^{\circ} \text{C} .$$

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,13 \text{ за } P_{H_2O} \cdot \bar{S} = 23,3 \text{ ат} \cdot \text{см} \text{ та } t_{\text{розр}} = 1467^{\circ} \text{C} .$$

$$\beta = 1,05 \text{ за } P_{H_2O} \cdot \bar{S} = 23,3 \text{ ат} \cdot \text{см} \text{ та } P_{H_2O} = 0,109 \text{ ат} .$$

Тоді

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \cdot \beta = 0,11 + 0,13 \cdot 1,05 = 0,2465 .$$

$$\varepsilon_{np.}^{\cdot} = \frac{1 - 0,2465 + 1,458}{\frac{1 - 0,2465}{0,2465} \cdot [0,7 + 0,2465 \cdot (1 - 0,7)] + 1,458} = 0,578 \approx 0,6 .$$

$\varepsilon_{np.}^{\cdot}$ можна також наближено визначити за [3] стор.102 або за додатком №2 за $\varepsilon_{\Gamma} = 0,2465$ та $\omega = 1,458$.

$\Delta_2^{x.\partial}$ - середньоефективна різниця четвертих степеней температур газів та матеріалу який нагрівається при $T_{\text{газів}} = \text{ver}$ та $T_M = \text{const}$ визначається за формулою

$$\Delta_2^{x.\partial} = 0,774 \cdot \theta_{\text{від}}^2 - \theta_M^4 , \quad (1.7)$$

де 0,774 – об’ємний коефіцієнт тепловиділення факелу;

$$\Delta_2^{x,d} = 0,774 \cdot 0,6874^2 - 0,6829^4 = 0,14822 .$$

Обраховані значення підставляємо в рівняння 1.5

$$Q_{x,d} = 5,67 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 195 \cdot 0,62 \cdot \left(\frac{1957,22 + 273}{100} \right)^4 \cdot 0,14822 = 10,557 \cdot 10^6 \text{ Вт} = \\ = 10,557 \cdot 10^3 \text{ кВт}.$$

Теоретична продуктивність печі на холодному дутті (без простоїв)

$$G_X = \frac{Q_{x,d}}{q_{ш}} = \frac{10,557 \cdot 10^3}{1,55 \cdot 10^3} = 6,81 \text{ кг/с} .$$

Вихід продукції з 1 м² поду печі на холодному дутті

$$g_X = \frac{G_X \cdot 24 \cdot 3600}{1000 \cdot F_n} = \frac{6,81 \cdot 24 \cdot 3600}{1000 \cdot 195} = 3,017 \text{ м/добу} .$$

1.1.3 Гаряче дуття

Безрозмірні температури

$$\theta_{eio} = \frac{t_{eio} + 273}{t_T + 273} = \frac{1260 + 273}{2474,47 + 273} = 0,5579 .$$

Теплова потужність печі на гарячому дутті.

В порівнянні з розрахунками для холодного дуття змінилась лише розрахункова температура горіння палива

$$t_{розр} = t_K \cdot \mu = 2600,16 \cdot 0,74 = 1924,118^\circ \text{C} .$$

За графіками [2] стор. 209...211 визначаємо ε_{CO_2} , ε_{H_2O} , β

$$\varepsilon_{CO_2} = 0,075 \text{ за } P_{CO_2} \cdot \bar{S} = 28,2 \text{ ат} \cdot \text{см та } t_{розр} = 1924,118^\circ \text{C} .$$

$$\varepsilon_{H_2O} = 0,083 \text{ за } P_{H_2O} \cdot \bar{S} = 23,3 \text{ ат} \cdot \text{см та } t_{розр} = 1924,118^\circ \text{C} .$$

$$\beta = 1,05 \text{ (залишилось)}$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \cdot \beta = 0,075 + 0,083 \cdot 1,05 = 0,16215 .$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1 - 0,16215 + 1,458}{\frac{1 - 0,16215}{0,16215} \cdot [0,7 + 0,16215 \cdot (1 - 0,7)] + 1,458} = 0,43 .$$

$$\Delta_2^{e,d} = 0,774 \cdot \theta_{\text{від}}^2 - \theta_M^4 = 0,774 \cdot 0,5579^2 - 0,5543^4 = 0,1465 .$$

Обраховані значення підставляємо в рівняння 1.5

$$Q_{x,d} = 5,67 \cdot 0,7 \cdot 0,43 \cdot 195 \cdot 0,62 \cdot \left(\frac{2474,47 + 273}{100} \right)^4 \cdot 0,1465 = 17,224 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 17,224 \cdot 10^3 \text{ кВт}.$$

Теоретична продуктивність печі на гарячому дутті

$$G_{\Gamma} = \frac{Q_{x,d}}{q_{\text{шт}}} = \frac{17,224 \cdot 10^3}{1,55 \cdot 10^3} = 11,112 \text{ кг/с} .$$

Вихід продукції з 1 м² поду печі на гарячому дутті

$$g_{\Gamma} = \frac{G_{\Gamma} \cdot 24 \cdot 3600}{1000 \cdot F_n} = \frac{11,112 \cdot 24 \cdot 3600}{1000 \cdot 195} = 4,92 \text{ т/добу} .$$

Висновки. При попередньому автономному підігріві повітря до температури 800 °С вихід продукції з 1 м² поду печі збільшився в

$\frac{g_{\Gamma}}{g_{\text{Х}}} = \frac{4,92}{3,017} = 1,63$ рази, тобто продуктивність печі збільшилась в 1,63 рази. Попередній підігрів повітря в автономних повітропідігрівачах економічно доцільно при нагріві повітря до температури 600 °С та більше [3].

1.3. Визначення температури відхідних продуктів згоряння з робочого простору за допомогою критерію Больцмана

Приклад 1.3

Для камерної нагрівальної печі визначити температуру відхідних продуктів згоряння, використовуючи критерій Bo та безрозмірні температури. Початкова температура нагріву матеріалу $t_M' = 20^{\circ}\text{C}$, кінцева - $t_M'' = 1250^{\circ}\text{C}$. При розрахунках прийняти: променесприймаючу поверхню $F_n = 1,085 \text{ м}^2$; витрата палива (мазут) $B = 18,18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$; приведену ступінь чорноти робочого простору $\varepsilon_{np} = 0,43$; к.к.д. камери згоряння $\eta_K = 0,92$; коефіцієнт забруднення променесприймаючої по-

верхні $\xi = 0,7$; теоретичну температуру горіння палива $t_T = 1900^\circ C$. Питома кількість продуктів згорання при $\alpha = 1,15$ складає $V_{np.зг}^\circ = 13,11 \text{ м}_n^3 / \text{кг}$. Об'ємні частки продуктів згорання: $r_{CO_2}^\circ = 0,32$; $r_{N_2}^\circ = 0,63$; $r_{O_2}^\circ = 0,03$; $r_{H_2O}^\circ = 0,02$. Частка конвективного теплообміну складає 15 %, тобто $\beta_{конв} = 1,15$.

Короткий запис умови прикладу

$$t_M' = 20^\circ C = 293 \text{ K}; \quad t_T = 1900^\circ C = 2173 \text{ K};$$

$$t_M'' = 1250^\circ C = 1523 \text{ K}; \quad V_{np.зг}^\circ = 13,11 \text{ м}_n^3 / \text{кг};$$

$$F_n = 1,085 \text{ м}^2; \quad r_{CO_2}^\circ = 0,32;$$

$$B = 18,18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}; \quad r_{N_2}^\circ = 0,63;$$

$$\varepsilon_{np} = 0,43; \quad r_{O_2}^\circ = 0,03;$$

$$\eta_K = 0,92; \quad r_{H_2O}^\circ = 0,02;$$

$$\xi = 0,7; \quad \beta_{конв} = 1,15;$$

Розв'язання

1.3.1 Безрозмірні температури металу

$$\text{на початку нагріву } \theta_M' = \frac{T_M'}{T_T} = \frac{293}{2173} = 0,135;$$

$$\text{в кінці нагріву } \theta_M'' = \frac{T_M''}{T_T} = \frac{1523}{2173} = 0,7.$$

1.3.2 Задаємось температурою відхідних продуктів згорання. Приймаємо $t_{\text{від}}' = 1300^\circ C$.

1.3.3 Середня ізобарна об'ємна теплоємність продуктів згорання в інтервалі температур від $t_{\text{від}} = 1300^\circ C$ до $t_T = 1900^\circ C$

$$\bar{C}_{pm} \Big|_{1300}^{1900} = \frac{\bar{C}_T \cdot t_T - \bar{C}_{\text{від}} \cdot t_{\text{від}}}{t_T - t_{\text{від}}},$$

$$\bar{C}_T \Big|_0^{1900} = \bar{C}_{RO_2} \cdot r_{RO_2}^{\circ} + \bar{C}_{N_2} \cdot r_{N_2}^{\circ} + \bar{C}_{O_2} \cdot r_{O_2}^{\circ} + \bar{C}_{H_2O} \cdot r_{H_2O}^{\circ} =$$

$$= 2,4393 \cdot 0,32 + 1,4780 \cdot 0,63 + 1,5638 \cdot 0,03 + 1,9252 \cdot 0,02 = 1,7971 \text{ кДж}/(\text{м}_n^3 \cdot \text{К}).$$

$$\bar{C}_{\text{сид}} \Big|_0^{1300} = 2,3158 \cdot 0,32 + 1,429 \cdot 0,63 + 1,5123 \cdot 0,03 + 1,7908 \cdot 0,02 = 1,723 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3 \cdot \text{К}}.$$

$$\bar{C}_{pm} \Big|_{1300}^{1900} = \frac{1,7971 \cdot 1900 - 1,723 \cdot 1300}{1900 - 1300} = 1,9642 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3 \cdot \text{К}} = 1964,2 \frac{\text{Дж}}{\text{м}_n^3 \cdot \text{К}}.$$

1.3.4 Визначаємо критерій Больцмана

$$Bo = \frac{B \cdot V_{\text{нр.зг}}^{\circ} \cdot \bar{C}_{\text{нр.зг.}} \cdot \eta_K}{C_o \cdot F_n \cdot \left(\frac{T_T}{1000} \right)^3 \cdot 10}. \quad (1.8)$$

Підставляємо всі відомі та визначені величини та визначаємо значення Bo

$$Bo = \frac{18,18 \cdot 10^{-3} \cdot 13,11 \cdot 1964,2 \cdot 0,92}{5,67 \cdot 1,085 \cdot 2,173^3 \cdot 10} = 0,6823.$$

1.3.5 Безрозмірна температура відхідних продуктів згоряння при холодному посаді

$$\theta_{\text{сид}} = \frac{-Bo + \sqrt{Bo^2 + 4 \cdot m \cdot \varepsilon_{\text{нр.}} \cdot \xi \cdot Bo \cdot \beta_{\text{конв}}}}{2 \cdot m \cdot \varepsilon_{\text{нр.}} \cdot \xi \cdot \beta_{\text{конв}}}, \quad (1.8)$$

де $m = \sqrt{1 - (\theta_M'')^4} = \sqrt{1 - 0,7^4} = 0,872.$

$$\theta_{\text{сид}} = \frac{-0,6823 + \sqrt{0,6823^2 + 4 \cdot 0,872 \cdot 0,43 \cdot 0,7 \cdot 0,6823 \cdot 1,15}}{2 \cdot 0,872 \cdot 0,43 \cdot 0,7 \cdot 1,15} = 0,7507.$$

1.3.6 Температура відхідних продуктів згоряння

$$\theta_{\text{сид}} = \frac{T_{\text{сид}}}{T_T},$$

звідси $t_{\text{від}} = \theta_{\text{від}} \cdot T_T - 273 = 0,7507 \cdot (1900 + 273) - 273 = 1358,2^\circ \text{C}$.

Прийняли $t'_{\text{від}} = 1300^\circ \text{C}$, отримали $t_{\text{від}} = 1358,2^\circ \text{C}$. Відносна максимальна похибка складає

$$\Delta t_{\text{від}} = \frac{t_{\text{від}} - t'_{\text{від}}}{t'_{\text{від}}} \cdot 100\% = \frac{1358,2 - 1300}{1300} \cdot 100\% = 4,5\%,$$

що допустимо (до 5%).

Можна перезадається $t'_{\text{від}}$ та отримати більшу точність зближення.

2. Теплообмін в шарі кускового та зернистого матеріалу

2.1. Визначення густини теплового потоку

Приклад 2.1

В шахтній печі продукти згоряння палива проходять через шар діаметрових кульок ($\lambda_M = 0,113 + 0,00023 \cdot t$), які мають розмір $d_{cp} = 16,2$ мм. Шар щільний нерухомий. Знизу вгору поступають продукти згоряння палива при температурі $t'_T = 550^\circ \text{C}$ та залишають піч з температурою $t''_T = 230^\circ \text{C}$. Середня температура поверхні кульки складає $t_M^{ног} = 130^\circ \text{C}$. Визначити густину теплового потоку на поверхню кульок, якщо діаметр шахтної печі $D_{Ш} = 1,2$ м. Витрата продуктів згоряння $V_T = 2820$ м³/год при середній температурі продуктів згоряння в шахтній печі.

Для довідки:

1. Теплофізичні властивості продуктів згоряння [2]

Таблиця 2.1
Теплофізичні властивості продуктів згоряння

$t_{\text{пр.зг.}}, ^\circ \text{C}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2 / \text{с}$	Pr
300	4,87	45,81	0,65
400	5,70	60,38	0,64
500	6,56	76,3	0,63

2. Значення коефіцієнтів n , m , k в критеріальному рівнянні $Nu = n \cdot Re^m \cdot Pr^k$ в залежності від числа Рейнольдса Re .

Таблиця 2.2
Залежність коефіцієнтів n , m , k від числа Рейнольдса Re

№, п/п	Види руху шару та газу	n	m	k	Re	Pr
1	Нерухомий шар	0,106	1,0	0	< 200	-
2	Нерухомий шар	0,61	0,67	0	≥ 200	-
3	Рухомий протиток	0,014	1,0	0,33	< 200	-
4	Рухомий протиток	0,056	0,87	0,33	200..700	0,68..1,1
5	Нерухомий шар (поперечний ток)	0,055	1,0	0	140..1000	-
6	Падаючий шар (протиток)	0,194	0,79	0	30..480	-
7	Киплячий шар	0,316	0,8	0	40..500	
		$Re_{onm} = 0,121 \cdot Ar^{0,5}$		$Ar = 30 \dots 2 \cdot 10^5$		
		$Ar = \frac{g \cdot d_{екв}^2 \cdot \rho_n - \rho_z}{\nu_z^2 \cdot \rho_z}$		$Nu_{max} = 0,86 \cdot Ar^{0,2}$		

Короткий запис умови прикладу

$$\lambda_m = 0,113 + 0,00023 \cdot t \frac{Вт}{м \cdot К}; \quad t_M^{nog} = 130^\circ C;$$

$$d_{cp} = 16,2 \text{ мм}; \quad D_{ш} = 1,2 \text{ м};$$

$$t_{Г'} = 550^\circ C; \quad t_{Г''} = 230^\circ C; \quad V_{Г'} = 2820 \text{ м}^3 / год.$$

Розв'язання

Еквівалентний діаметр кульок

$$d_{екв} = d_{cp} + 0,25 \cdot d_{cp} = 16,2 + 0,25 \cdot 16,2 = 20,25 \text{ мм} = 0,02025 \text{ м}.$$

Швидкість газів в шахтній печі при середній температурі продуктів згорання

$$W_{\Gamma} = \frac{4 \cdot V_{\Gamma}}{3600 \cdot \pi \cdot D_{III}^2} = \frac{4 \cdot 2820}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,2^2} = 0,693 \text{ м/с}.$$

Середня температура продуктів згоряння

$$t_{\Gamma}^{cp} = \frac{t_{\Gamma}' + t_{\Gamma}''}{2} = \frac{550 + 230}{2} = 390^{\circ} \text{C}.$$

Критерій Рейнольдса

$$Re_{шару} = \frac{W_{\Gamma} \cdot d_{екв}}{\nu_{\Gamma}} = \frac{0,693 \cdot 0,02025}{58,923 \cdot 10^{-6}} = 238,15 > 200,$$

де $\nu_{\Gamma} = 58,923 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ при $t_{\Gamma}^{cp} = 390^{\circ} \text{C}$ за таблицею 2.1

Для щільного рухомого шару при $Re_{шару} > 200$, за таблицею 2.2 визначаємо $n = 0,056$; $m = 0,87$; $k = 0,33$. Відповідно, критеріальна залежність буде мати такий вигляд

$$Nu_{шару} = 0,056 \cdot Re_{шару}^{0,87} \cdot Pr_{шару}^{0,33}.$$

За таблицею 2.2 визначаємо значення $Pr_{шару}$ при $t_{\Gamma}^{cp} = 390^{\circ} \text{C}$

$$Pr_{шару} = 0,65 - \frac{0,65 - 0,64}{100} \cdot 90 = 0,641.$$

$$Nu_{шару} = 0,056 \cdot 238,15^{0,87} \cdot 0,641^{0,33} = 5,653.$$

З критерію $Nu_{шару}$ визначаємо коефіцієнт тепловіддачі від продуктів згоряння до зовнішньої поверхні кульки, α_K

$$Nu_{шару} = \frac{\alpha_K \cdot d_{екв}}{\lambda_{\Gamma}}.$$

звідси

$$\alpha_K = \frac{Nu_{шару} \cdot \lambda_{\Gamma}}{d_{екв}} = \frac{5,653 \cdot 5,617 \cdot 10^{-2}}{0,02025} = 15,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}},$$

де $\lambda_{\Gamma} = 5,617 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ при $t_{\Gamma}^{cp} = 390^{\circ} \text{C}$ за таблицею 2.1.

Густина теплового потоку

$$q = \alpha_K \cdot \Delta t_{cp} = \alpha_K \cdot (t_{Г}^{cp} - t_M^{ное}) = 15,68 \cdot (390 - 130) = 4076,8 \frac{Вт}{м^2}.$$

Перевіряємо число Bi

$$Bi = \frac{\alpha_K \cdot d_{екв}}{2 \cdot \lambda_M} = \frac{15,68 \cdot 0,02025}{2 \cdot 0,1429} = 1,11 - \text{на межі зовнішньої задачі,}$$

де $\lambda_M = 0,113 + 0,00023 \cdot t_M^{ное} = 0,113 + 0,00023 \cdot 130 = 0,1429 \frac{Вт}{м \cdot К}.$

2.2. Визначення маси частинки в “киплячому” шарі

Приклад 2.2

Визначити масу кульки, яка знаходиться в “киплячому” шарі через який проходять продукти згоряння палива при їх середній температурі $t_{np.зг} = 500^\circ C$. Корпус апарату циліндричний діаметром $d_a = 0,45 м$. Об’ємні частки продуктів згоряння: $r_{CO_2}^0 = 0,17$; $r_{O_2}^0 = 0,02$; $r_{H_2O}^0 = 0,08$; $r_{N_2}^0 = 0,73$. Питомий об’єм продуктів його згоряння складає $V_{np.зг}^0 = 12,85 м_н^3 / кг$. Приведений діаметр частинки матеріалу прийняти рівним діаметру кульки $d_{np} = d_k = 0,012 м$. Витрата палива рівна $G_n = 300 кг/с$. Для довідки

Таблиця 2.3

Залежність $Re = f(C)$

Re	C
$\leq 1 \cdot 10^3$	1,01
$2 \cdot 10^3$	1,05
$3 \cdot 10^3$	1,10
$4 \cdot 10^3$	1,22
$5 \cdot 10^3$	1,31
$(6 \dots 10) \cdot 10^3$	1,43

Таблиця 2.4

Залежність $t_{np.зг} = f(v)$

$t_{np.зг}, ^\circ C$	$v \cdot 10^6, м^2 / с$
100	21,54
200	32,80
300	45,81
400	60,38
500	76,30
600	93,61
700	112,10
800	131,80
900	152,50
1000	174,30

Короткий запис умов прикладу

$$t_{np.32} = 500^{\circ}C ; \quad r_{CO_2}^{\circ} = 0,17 ; \quad G_n = 300 \text{ кг/с}$$

$$d_a = 0,45 \text{ м} ; \quad r_{O_2}^{\circ} = 0,02 ;$$

$$V_{np.32}^{\circ} = 12,85 \text{ м}_n^3 / \text{кг} ; \quad r_{H_2O}^{\circ} = 0,08 ;$$

$$d_{np} = d_{\kappa} = 0,012 \text{ м} ; \quad r_{N_2}^{\circ} = 0,73.$$

Розв'язання

Система сил врівноваження, які діють на частинку матеріалу (рис.3.1).

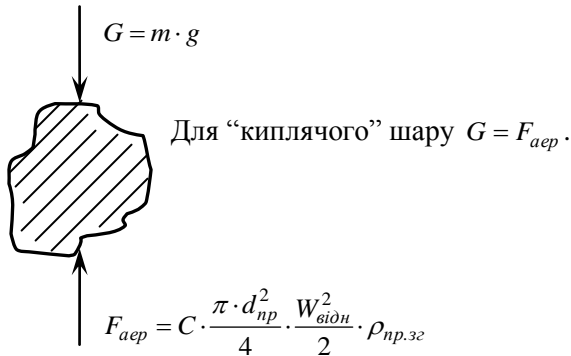


Рис.3.1 – До визначення системи сил врівноваження

Густина продуктів згоряння за нормальних умов

$$\begin{aligned} \rho_{np.32}^{ny} &= \sum_{i=1}^4 \rho_i^{ny} \cdot r_i = \frac{1}{22,4} \cdot (\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2} + \mu_{H_2O} \cdot r_{H_2O} + \mu_{N_2} \cdot r_{N_2}) = \\ &= \frac{1}{22,4} \cdot (44 \cdot 0,17 + 32 \cdot 0,02 + 18 \cdot 0,08 + 28 \cdot 0,73) = \frac{30}{22,4} = 1,339 \text{ кг/м}_n^3. \end{aligned}$$

Густина продуктів згоряння при $t_{np.32} = 500^{\circ}C$

$$\rho_{np.32} = \rho_{np.32}^{ny} \cdot \frac{273,15}{273,15 + t_{np.32}} = 1,339 \cdot \frac{273,15}{273,15 + 500} = 0,473 \text{ кг/м}^3.$$

Витрата продуктів згоряння за нормальних умов

$$V_{np.32}^{ny} = G_n \cdot V_{np.32}^{\partial} = 300 \cdot 12,85 = 3855 \text{ м}_n^3 / \text{год} = 1,0708 \text{ м}_n^3 / \text{с}.$$

Витрата продуктів згоряння при робочих умовах

$$V_{np.32} = V_{np.32}^{ny} \cdot \frac{273,15 + t_{np.32}}{273,15} = 1,0708 \cdot \frac{273,15 + 500}{273,15} = 3,031 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Швидкість продуктів згоряння

$$W_{np.32} = W_{відн} = \frac{V_{np.32}}{f_a} = \frac{V_{np.32} \cdot 4}{\pi \cdot d_a^2} = \frac{3,031 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,45^2} = 19,067 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{W_{відн} \cdot d_{np}}{\nu} = \frac{19,067 \cdot 0,012}{76,3 \cdot 10^{-6}} = 2,998 \cdot 10^3 \approx 3000,$$

де $\nu = 76,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$ за таблицею 2.4 при $t_{np.32} = 500^\circ \text{C}$.

При $Re = 3000$ за таблицею 2.3 визначаємо коефіцієнт C , $C = 1,1$.

Сила аеродинамічної дії на частинку

$$F_{aep} = C \cdot \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4} \cdot \frac{W_{відн}^2}{2} \cdot \rho_{np.32} = 1,1 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,012^2}{4} \cdot \frac{19,067^2}{2} \cdot 0,473 = 1,069 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$$

Маса частинки

$$F_{aep} = G = m \cdot g.$$

звідси

$$m = \frac{F_{aep}}{g} = \frac{1,069 \cdot 10^{-2}}{9,81} = 1,0897 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Приймаємо $d_{np} = d_k$ та визначаємо об'єм кульки

$$V_k = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_a^2 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{0,012}{2} \right)^2 = 9,0432 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3.$$

Густина матеріалу частинки

$$\rho_M = \frac{m}{V_k} = \frac{1,0897 \cdot 10^{-3}}{9,0432 \cdot 10^{-7}} = 1204,99 \text{ кг/м}^3.$$

За таблицею [2] стор. 238 густину $1200\dots1350 \text{ кг/м}^3$ має кам'яне вугілля або котельний накип $1000\dots2500 \text{ кг/м}^3$. Швидше за все, це шматочки кам'яного вугілля при його сушці.

3. Внутрішній теплообмін

3.1. Нагрів матеріалу з постійною швидкістю по закону $t_M = \theta \cdot \tau$

Приклад 3.1

Виконати тепловий розрахунок нагріву нескінченно довгого циліндричного валу з вуглецевої сталі діаметром $D_{Ц} = 300 \text{ мм}$ від температури $t_{cp}^o = 0^o \text{ C}$ до $t_M^{noe} = 600^o \text{ C}$ з постійною швидкістю нагріву $\theta = 400 \frac{\text{град}}{\text{год}}$. Густина сталі рівна $\rho = 7600 \text{ кг/м}^3$, коефіцієнти теплопровідності при 0^o C та при 600^o C відповідно рівні $\lambda_0 = 52,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ та $\lambda_{600} = 39,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$. Теплоємність сталі $C_0 = 0,461 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ та $C_{600} = 0,574 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Приведений коефіцієнт випромінювання пічного простору в розрахунках прийняти $C_{np} = 3,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Короткий запис умови прикладу

$$D_{Ц} = 300 \text{ мм};$$

$$\lambda_0 = 52,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$t_{cp}^o = 0^o \text{ C};$$

$$\lambda_{600} = 39,5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)};$$

$$t_M^{noe} = 600^o \text{ C};$$

$$C_0 = 0,461 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\theta = 400 \frac{\text{град}}{\text{год}};$$

$$C_{600} = 0,574 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\rho = 7600 \text{ кг/м}^3;$$

$$C_{np} = 3,5 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4).$$

Розв'язання

Час нагріву матеріалу (вала) від 0^o C до температури його поверхні $t_M^{noe} = 600^o \text{ C}$

$$t_M^{no\theta} - t_M^{no\theta_0} = \theta \cdot \tau, \quad (3.1)$$

де $t_M^{no\theta_0} = t_{cp}^o$.

З рівняння 3.1 визначаємо час нагріву

$$\tau = \frac{t_M^{no\theta} - t_{cp}^o}{\theta} = \frac{600 - 0}{400} = 1,5 \text{ год.}$$

Середнє значення коефіцієнта теплопровідності при нагріві матеріалу від $0^\circ C$ до $t_M^{no\theta} = 600^\circ C$

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_0 + \lambda_{600}}{2} = \frac{52,3 + 39,5}{2} = 45,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Середнє значення коефіцієнта температуропровідності при нагріві матеріалу від $0^\circ C$ до $t_M^{no\theta} = 600^\circ C$

$$a = \frac{\lambda_{cp}}{C_{600} \cdot \rho} = \frac{45,9 \cdot 3600}{0,574 \cdot 7600 \cdot 10^3} = 0,0378 \text{ м}^2/\text{год.}$$

Температурний перепад в матеріалі в кінці нагріву

$$\Delta t_M = \frac{1}{4} \cdot \frac{\theta \cdot R_{II}^2}{a}. \quad (3.2)$$

$$\Delta t_M = \frac{1}{4} \cdot \frac{400 \cdot 0,15^2}{0,0378} = 59,5^\circ C,$$

де $R_{II} = \frac{D_{II}}{2} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ м}$ - радіус циліндра.

Температура матеріалу в центрі в кінці нагріву

$$t_M^u = t_M^{no\theta} - \Delta t_M = 600 - 59,5 = 540,5^\circ C.$$

Густина теплового потоку в кінці нагріву

$$q_M^{no\theta} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot \Delta t_M}{R_{II}}. \quad (3.3)$$

$$q_M^{no\theta} = \frac{2 \cdot 45,9 \cdot 59,5}{0,15} = 36414 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Розрахункова (дійсна) температура печі в кінці нагріву

$$t_{нецi} = 100 \cdot 4 \sqrt{\frac{q_M^{ноє}}{C_{np}} + \left(\frac{T_M^{ноє}}{100}\right)^4} - 273. \quad (3.4)$$

$$t_{нецi} = 100 \cdot 4 \sqrt{\frac{36414}{3,5} + \left(\frac{600 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 855,39^\circ C.$$

Середнє значення температури для початкового періоду нагріву

$$t_{cp} = t_M^{ноє} - \frac{1}{2} \cdot \Delta t_M = 600 - \frac{1}{2} \cdot 59,5 = 570,25^\circ C.$$

Коефіцієнт теплопровідності в початковий період нагріву

$$a_o = \frac{\lambda_o}{C_o \cdot \rho} = \frac{52,3 \cdot 3600}{0,461 \cdot 7600 \cdot 10^3} = 0,0537 \text{ м}^2 / \text{год}.$$

Задаємось часом виходу печі на робочий режим

$$\tau' = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{II}}{a_o} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0,152}{0,0537} = 0,2 \text{ год}.$$

Температура поверхні на початку нагріву при $\theta = const$

$$t_M^{ноє1} = t_{cp}^o + \theta \cdot \tau' = 0 + 400 \cdot 0,2 = 80^\circ C.$$

Температурний перепад на початку нагріву при $\theta = const$

$$\Delta t' = \frac{1}{4} \cdot \frac{\theta \cdot R_{II}}{a_o} = \frac{1}{4} \cdot \frac{400 \cdot 0,15^2}{0,0537} = 41,9^\circ C.$$

Температура центру матеріалу на початку нагріву

$$\Delta t_M^{y,1} = t_M^{ноє1} - \Delta t' = 80 - 41,9 = 38,1^\circ C.$$

Перевіряємо час виходу на робочий режим для нескінченно довгого циліндра

$$\tau'' = K_\phi \cdot \frac{R_{II}^2}{a_o} \cdot \frac{t_M^{ноє1} - t_M^{ноє0}}{t_M^{ноє1} - t_M^{y,1}}, \quad (3.5)$$

де K_ϕ - коефіцієнт форми, для циліндра $K_\phi = 0,25$. Тоді

$$\tau'' = 0,25 \cdot \frac{0,15^2}{0,0537} \cdot \frac{80 - 0}{80 - 38,1} = 0,2 \text{ год} \quad (\tau'' = \tau').$$

Густина теплового потоку на початку нагріву

$$q_M^{no\&1} = \frac{2 \cdot \lambda_o \cdot \Delta t_M^{u-1}}{R_{II}}, \quad (3.6)$$

$$q_M^{no\&1} = \frac{2 \cdot 52,3 \cdot 38,1}{0,15} = 26568,4 \frac{Bm}{m^2}.$$

Температура печі на початку нагріву

$$t'_{печі} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{26568,4}{3,5} + \left(\frac{80 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 665,15^\circ C.$$

За отриманими значеннями температур та густин теплового потоку на початку та в кінці нагріву можна побудувати графіки $(t_{печі}, t_M^{no\&1}, t_M^u) = f(\tau)$ та $q_M^{no\&1} = f(\tau)$ - в розрахунку не наводяться.

3.2. Нагрів матеріалу при постійній температурі в робочо-просторі, $T_{печі} = const$

Приклад 3.2

Визначити час нагріву заготовки з маловуглецевої сталі діаметром $D_M = 550$ мм, яка розміщена в печі з постійною температурою $t_{печі} = 870^\circ C$. Середня по масі температура металу в кінці нагріву $t_M'' = 740^\circ C$, на початку нагріву $t_M^o = 20^\circ C$. При розрахунках прийняти: $\lambda_M = 37$ Вт/(м·К); $C_M = 0,715$ кДж/(кг·К); $\rho_M = 7860$ кг/м³; $a_M = 0,0225$ м²/ч; $C_{np} = 3,5$ Вт/(м²·К⁴).

Короткий запис умови прикладу

$$t_{печі} = 870^\circ C;$$

$$C_M = 0,715 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$T_{печі} = 1143,15 \text{ К};$$

$$\rho_M = 7860 \text{ кг}/\text{м}^3$$

$$t_M'' = 740^\circ C;$$

$$a_M = 0,0225 \text{ м}^2/\text{год}$$

$$T_M'' = 1013,15 \text{ К};$$

$$\lambda_M = 37 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

$$t_M^o = 20^o C ;$$

$$C_{np} = 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$$T_M^o = 293,15 \text{ К} ;$$

$$D_M = 550 \text{ мм} = 0,55 \text{ м} .$$

Розв'язання

Визначаємо критерій Іванцова

$$I = \frac{C_{np} \cdot R_M}{100 \cdot \lambda_M} \cdot \left(\frac{T_{неці}}{100} \right)^3, \quad (3.7)$$

$$\text{де } R_M = \frac{D_M}{2} = \frac{0,55}{2} = 0,275 \text{ м} .$$

$$I = \frac{3,5 \cdot 0,275}{100 \cdot 37} \cdot \left(\frac{1143,15}{100} \right)^3 = 0,3886 .$$

Початкова відносна температура металу

$$y_1 = \frac{T_M^o}{T_{неці}} = \frac{293,15}{1143,15} = 0,2564 .$$

Кінцева відносна температура металу

$$y_2 = \frac{T_M''}{T_{неці}} = \frac{1013,15}{1143,15} = 0,886 .$$

За графіком [3] стор.115 для циліндра визначаємо

$$\psi_1 = f(y_1 = 0,2564 ; I = 0,3886) \Rightarrow \psi_1 = 0,27 ;$$

$$\psi_2 = f(y_2 = 0,886 ; I = 0,3886) \Rightarrow \psi_2 = 1,2 .$$

Критерій Фур'є для циліндра

$$F_o = \frac{\psi_2 - \psi_1}{2 \cdot I} = \frac{1,2 - 0,27}{2 \cdot 0,3886} = 1,1966 .$$

Час нагріву заготовки

$$F_o = \frac{a \cdot \tau}{R_M^2} = 1,1966 .$$

звідси

$$\tau = \frac{F_o \cdot R_M^2}{a} = \frac{1,1966 \cdot 0,275^2}{0,0225} = 4,02 \text{ год}.$$

Задаємо температуру поверхні заготовки в кінці нагріву.

Приймаємо $t_M^{nos} = 760^\circ C$ ($T_M^{nos} = 1033,15 K$).

Тепловий потік на поверхню заготовки

$$q_M^{nos} = C_{np} \cdot \left[\left(\frac{T_{neci}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{nos}}{100} \right)^4 \right] = 3,5 \cdot \left[\left(\frac{1143,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{1033,15}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 3,5 \cdot (11,4315^4 - 10,3315^4) = 19892,77 \frac{Bm}{M^2}.$$

Температурний перепад між поверхнею та центром заготовки

$$\Delta t_M = \frac{q_M^{nos} \cdot R_M}{2 \cdot \lambda_M}. \quad (3.8)$$

$$\Delta t_M = \frac{19892,77 \cdot 0,275}{2 \cdot 37} = 73,926 K.$$

Температура матеріалу в центрі заготовки

$$t_M^u = t_M^{nos} - \Delta t_M = 760 - 73,926 = 686,074^\circ C = 959,224 K.$$

Середня температура по масі в кінці нагріву

$$(t_M^{cp}) = t_M^u + 0,33 \cdot \Delta t_M. \quad (3.9)$$

$$(t_M^{cp}) = 686,074 + 0,33 \cdot 73,926 = 710,47^\circ C.$$

За умовою прикладу $t_M'' = 740^\circ C$. Похибка $\Delta t_M^{cp} = 4,15\%$.

Перезадаємося (t_M^{nos})'', приймаємо (t_M^{nos})'' = $780^\circ C$ ($T_M^{nos} = 1053,15 K$).

Тоді,

$$q_M^{nos} = 3,5 \cdot \left[\left(\frac{1143,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{1053,15}{100} \right)^4 \right] = 16714,12 \frac{Bm}{M^2}.$$

$$\Delta t_M = \frac{16714,12 \cdot 0,275}{2 \cdot 37} = 62,113^\circ C.$$

$$t_M'' = 780 - 62,113 = 717,887^\circ C .$$

$$(t_M^{cp})'' = 717,887 + 0,33 \cdot 62,113 = 738,38^\circ C .$$

Похибка між t_M'' и t_M^{cp} складає $\Delta t_M^{cp} = 0,21\%$. Залишаємо прийняту температуру поверхні матеріалу $t_M^{noe} = 780^\circ C = 1053,15 K$. Густина теплового потоку на поверхню матеріалу $q_M^{noe} = 16714,12 \frac{Вт}{м^2}$, та значення середньої температури поверхні матеріалу $t_M^{cp} = 738,38^\circ C = 1011,53 K$.

3.3. Визначення часу нагріву матеріалу в методичній печі

Приклад 3.3

В методичній зоні трьохзонної нагрівальної печі з двостороннім нагрівом матеріал нагрівається від $t_M' = 20^\circ C$ до $t_M'' = 300^\circ C$. Температура продуктів згоряння при цьому знижується від $t_\Gamma'' = 980^\circ C$ до $t_\Gamma' = 800^\circ C$. Визначити час нагріву матеріалу в методичній зоні. Матеріал який нагрівається – середньовуглецева сталь (0,5% C), розміри заготовки $200 \times 200 \times 3500$ мм. Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням прийняти рівним $\alpha_{вип} = 86,03 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$, густина матеріалу $\rho_M = 7800 \text{ кг}/м^3$.

Короткий запис умови прикладу

$$a \times b \times c = 200 \times 200 \times 3500 \text{ мм} = 0,2 \times 0,2 \times 3,5 \text{ м} ;$$

$$t_M' = 20^\circ C ; \quad t_\Gamma' = 800^\circ C ; \quad \alpha_{вип} = 86,03 \text{ Вт}/(м^2 \cdot K)$$

$$t_M'' = 300^\circ C ; \quad t_\Gamma'' = 980^\circ C ; \quad \rho_M = 7800 \text{ кг}/м^3$$

Розв'язання

Середня температура газів в методичній зоні

$$t_\Gamma^{cp} = \frac{t_\Gamma' + t_\Gamma''}{2} = \frac{800 + 980}{2} = 890^\circ C .$$

Середня температура поверхні матеріалу в методичній зоні

$$t_M^{cp} = \frac{t_M' + t_M''}{2} = \frac{20 + 300}{2} = 160^\circ C.$$

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу (середньовуглецевої сталі $C=0,5\%$) при $t_M^{cp} = 160^\circ C$ визначаємо за додатком 20 [4]

$$\lambda_M = 48,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Середня теплоємність матеріалу при $t_M'' = 300^\circ C$ за додатком 21 [4]

$$C_M = 0,524 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Критерій Bi (безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі)

$$Bi = \frac{\alpha_{вun} \cdot S}{\lambda_M}, \quad (3.10)$$

де S - товщина матеріалу при односторонньому нагріві, напівтовщина при двосторонньому (в нашому випадку $S = \frac{a}{2} = \frac{0,2}{2} = 0,1 \text{ м}$).

$$Bi = \frac{86,03 \cdot 0,1}{48,3} = 0,178 < 0,25.$$

При $Bi < 0,25$ емпірично встановлено, що тіло можна рахувати тонким в термічному відношенні, а при $Bi \geq 0,25$ масивним. В проміжній області, тіло можна віднести до того або іншого класу в залежності від необхідної точності розрахунку [4] стор.15. З визначеного в нашому прикладі $Bi = 0,178$ маємо, що в методичній зоні матеріал нагрівається як тонке тіло та час його нагріву необхідно визначати на основі розв'язку балансового диференціального рівняння теплопередачі при рівномірному нагріві тіла в найпростішому наближенні конвективного тепlopідводу до його поверхні:

$$\tau_M = \left(\frac{M \cdot C}{\alpha_{вun} \cdot F_M} \cdot \ln \frac{t_F^{cp} - t_M'}{t_F^{cp} - t_M''} \right) \cdot \frac{1}{3600}, \quad (3.11)$$

де $M = \rho_M \cdot V_M$ - маса заготовки, кг.

$V_M = a \times b \times c$ - об'єм заготовки, м^3 (див. рис. 3.2).

$F_M = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot a \cdot c$ - теплосприймаюча поверхня, м^2 .

C - теплоємність матеріалу заготовки при кінцевій температурі матеріалу в методичній зоні ($t_M'' = 300^\circ C = 573 K$) визначаємо за додатком 21 [4].

$$C_M = 0,524 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,524 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Площею торців заготовок нехтуємо.

$$\tau_M = \left(\frac{1092 \cdot 0,524 \cdot 10^3}{86,03 \cdot 1,4} \cdot \ln \frac{890 - 20}{890 - 300} \right) \cdot \frac{1}{3600} = 0,512 \text{ год}.$$

Оскільки заготовка гріється як тонке тіло, то перепаду температур по перерізу не буде і в кінці нагріву температура по перерізу буде рівна $300^\circ C$. При значенні $Bi \geq 0,25$ в технічних розрахунках користуються графіком для безрозмірної температури центру θ_{II} та поверхні θ_{II} .

$$\theta_{II} = \frac{t_{неці} - t_{ц}}{t_{неці} - t_{ц}^{ноч}}; \quad \theta_{II} = \frac{t_{неці} - t_{нов}}{t_{неці} - t_{нов}^{ноч}}.$$

.Детальний опис визначення часу нагріву заготовки при $Bi \geq 0,25$ наведений в [4] стор. 19...23.

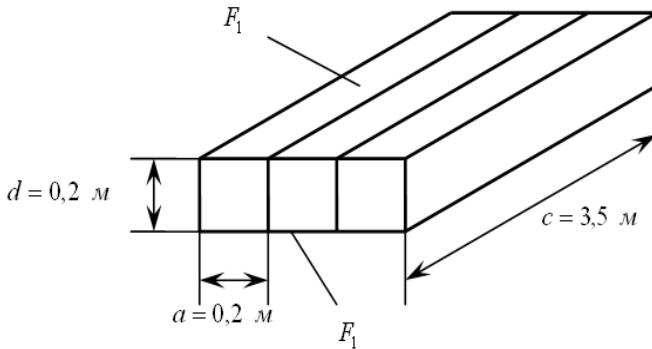


Рис.3.2 – До визначення теплосприймаючої поверхні

4. Рециркуляція продуктів згорання палива, як засіб регулювання температури

4.1. Калориметрична температура горіння палива з врахуванням рециркуляції продуктів згорання

Приклад 4.1

Визначити калориметричну температуру горіння палива з врахуванням рециркуляції продуктів згорання, якщо теплота згорання палива $Q_H^P = 35818 \text{ кДж} / \text{м}_H^3$, дійсний питомий об'єм продуктів згорання $V_{np.3e}^\circ = 12,566 \text{ м}_H^3 / \text{м}_H^3$, об'ємні частки продуктів згорання $r_{N_2}^\circ = 0,72$; $r_{CO_2}^\circ = 0,08$; $r_{H_2O}^\circ = 0,17$; $r_{O_2}^\circ = 0,03$. Температури повітря та палива, які поступають на горіння відповідно рівні $t_{нов} = t_n = 20^\circ \text{C}$. Кратність рециркуляції складає $i = 0,5$. Температура зворотніх продуктів згорання $t_{3e} = 1278^\circ \text{C}$. При розрахунках прийняти $\bar{C}_n \Big|_0^{20} = 1,57524 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{K}}$, $\bar{C}_{нов} \Big|_0^{20} = 1,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{K}}$, $V_{нов}^\circ = 11,566 \frac{\text{м}_H^3}{\text{м}_H^3}$. Дійсна калориметрична температура горіння палива без рециркуляції складає $t_K = 1775^\circ \text{C}$. Визначити також за наближеною формулою через кратність рециркуляції дійсну калориметричну температуру горіння палива та визначити максимальну відносну похибку.

Короткий запис умови прикладу

$$Q_H^P = 35818 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3}; \quad \bar{C}_n \Big|_0^{20} = 1,57524 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{K}}; \quad \bar{C}_{нов} \Big|_0^{20} = 1,3 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{K}};$$

$$V_{np.3e}^\circ = 12,566 \frac{\text{м}_H^3}{\text{м}_H^3}; \quad V_{нов}^\circ = 11,566 \frac{\text{м}_H^3}{\text{м}_H^3}; \quad i = 0,5;$$

$$t_{нов} = t_n = 20^\circ \text{C}; \quad t_{3e} = 1278^\circ \text{C}; \quad t_K = 1775^\circ \text{C};$$

$$r_{N_2}^\circ = 0,72; \quad r_{CO_2}^\circ = 0,08; \quad r_{H_2O}^\circ = 0,17; \quad r_{O_2}^\circ = 0,03.$$

Розв'язання

Перевіряємо правильність задання об'ємних часток продуктів згоряння палива

$$\sum_{i=1}^4 r_i = 0,72 + 0,08 + 0,17 + 0,03 = 1,00.$$

Калориметрична температура горіння палива з врахуванням рециркуляції продуктів згоряння визначається за формулою

$$t_K^{pec} = \frac{Q_H^P + \bar{C}_n t_n + (V_{ног}^0 \cdot \alpha - 4,76 \cdot V_{зг}^{O_2}) \bar{C}_{ног} t_{ног} + V_{зг} \bar{C}_{зг} t_{зг}}{\left[V_{np.зг}^0 + (V_{зг} - 4,76 \cdot V_{зг}^{O_2}) \right] \bar{C}_K^{pec}}, \quad (4.1)$$

де $V_{зг}^{O_2}$ - питома кількість кисню в зворотніх продуктах згоряння палива; M_n^3 / M_n^3 ;

$V_{зг}, \bar{C}_{зг}, t_{зг}$ - відповідно питома кількість зворотніх продуктів згоряння, середня ізобарна об'ємна теплоємність продуктів згоряння в інтервалі температур від 0^0C до $t_{зг}$ та температура зворотніх продуктів згоряння палива;

$V_{np.зг}^0$ - питома кількість продуктів згоряння палива при звичайному спалюванні без рециркуляції при заданому значенні α , M_n^3 / M_n^3 ;

$4,76 \cdot V_{зг}^{O_2}$ - питома кількість повітря на яке можна зменшити кількість повітря у порівнянні з звичайним спалюванням без рециркуляції; M_n^3 / M_n^3 ;

\bar{C}_K^{pec} - середня ізобарна об'ємна теплоємність продуктів згоряння в інтервалі температур від 0^0C до t_K^{pec}

В зв'язку с тим, що рівняння 4.1 має дві невідомі t_K^{pec} та \bar{C}_K^{pec} розв'язується воно методом послідовних наближень.

Кількість зворотніх продуктів згоряння палива

$$V_{зг} = i \cdot V_{np.зг}^0 = 0,5 \cdot 12,566 = 6,283 \frac{M_n^3}{M_n^3}.$$

Вміст кисню в продуктах згоряння без врахування рециркуляції

$$V_{O_2 np.зг}^0 = V_{np.зг}^0 \cdot r_{O_2}^0 = 12,566 \cdot 0,03 = 0,377 \frac{M_n^3}{M_n^3}.$$

Вміст кисню в зворотніх продуктах згорання при рециркуляції,

$$V_{36}^{O_2} = V_{O_2 \text{ нр.зг}}^{\partial} \cdot i = 0,377 \cdot 0,5 = 0,189 \frac{M_H^3}{M_H^3}$$

Теплоємність зворотніх продуктів згорання в інтервалі температур від $0^{\circ}C$ до $t_{36} = 1278^{\circ}C$.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{36} \Big|_0^{1278} &= \bar{C}_{N_2} \cdot r_{N_2}^{\partial} + \bar{C}_{CO_2} \cdot r_{CO_2}^{\partial} + \bar{C}_{H_2O} \cdot r_{H_2O}^{\partial} + \bar{C}_{O_2} \cdot r_{O_2}^{\partial} = \\ &= 1,42405 \cdot 0,72 + 2,3098 \cdot 0,08 + 1,7853 \cdot 0,17 + 1,511 \cdot 0,03 = 1,5589 \frac{\kappaДж}{M_H^3 \cdot K} \end{aligned}$$

Підставляємо всі відомі та визначені значення у формулу 4.1 та визначасмо t_K^{pec}

$$\begin{aligned} t_K^{pec} &= \frac{35818 + 1,57524 \cdot 20 + (11,566 - 4,76 \cdot 0,189) \cdot 1,3 \cdot 20 + 6,283 \cdot 1,5589 \cdot 1278}{[12,566 + (6,283 - 4,76 \cdot 0,189)] \cdot \bar{C}_K^{pec}} \\ &= \frac{48644,3}{17,95 \cdot \bar{C}_K^{pec}} \quad \text{або} \quad t_K^{pec} \cdot \bar{C}_K^{pec} = 2709,988. \end{aligned}$$

Задаємось $(t_K^{pec})' = 1600^{\circ}C$

$$\begin{aligned} \bar{C}_K^{pec} \Big|_0^{1600} &= \bar{C}_{N_2} \cdot r_{N_2}^{\partial} + \bar{C}_{CO_2} \cdot r_{CO_2}^{\partial} + \bar{C}_{H_2O} \cdot r_{H_2O}^{\partial} + \bar{C}_{O_2} \cdot r_{O_2}^{\partial} = \\ &= 1,4554 \cdot 0,72 + 2,3849 \cdot 0,08 + 1,8619 \cdot 0,17 + 1,54 \cdot 0,03 = 1,6 \frac{\kappaДж}{M_H^3 \cdot K} \end{aligned}$$

$$(t_K^{pec})' \cdot \bar{C}_K^{pec} = 1600 \cdot 1,6 = 2560 \frac{\kappaДж}{M_H^3},$$

$$(t_K^{pec})' \cdot \bar{C}_K^{pec} < t_K^{pec} \cdot \bar{C}_K^{pec}.$$

Перезадаємось $(t_K^{pec})'' = (t_K^{pec})' + 100^{\circ}C = 1600 + 100 = 1700^{\circ}C$.

$$\bar{C}_K^{pec} = 1,4625 \cdot 0,72 + 2,4042 \cdot 0,08 + 1,8841 \cdot 0,17 + 1,5483 \cdot 0,03 = 1,6117 \frac{\kappaДж}{M_H^3 \cdot K}.$$

$$(t_K^{pec})'' \cdot \bar{C}_K^{pec} = 1700 \cdot 1,6117 = 2739,89 \frac{\kappaДж}{M_H^3}.$$

$$(t_K^{peu})'' \cdot \bar{C}_K^{peu} > t_K^{peu} \cdot \bar{C}_K^{peu}.$$

Дійсне значення калориметричної температури горіння палива з врахування рециркуляції продуктів згорання

$$t_K^{peu} = 1600 + \frac{2709,988 - 2560}{2739,89 - 2560} \cdot 100 = 1600 + 83,38 = 1683,38 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Калориметрична температура горіння палива за наближеною формулою через кратність рециркуляції

$$t_K^{peu} \approx \frac{t'_K + i \cdot t_{ze}}{1 + i}, \quad (4.2)$$

де t'_K - калориметрична температура горіння палива при звичайному спалюванні без врахування рециркуляції продуктів згорання.

З формули 4.2 визначаємо t'_K

$$t'_K = t_K^{peu}(1 + i) - i \cdot t_{ze} = 1683,38(1 + 0,5) - 0,5 \cdot 1278 = 1886,07 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Похибка у визначенні t_K за формулою 4.2

$$\Delta t_K^{peu} = \frac{t'_K + t_K}{t_K} \cdot 100 = \frac{1886,07 - 1775}{1775} \cdot 100 = 6,26 \text{ } \%.$$

Похибка виникає за рахунок скорочення теплоємностей при виведенні формули 4.2.

5. Регенерація теплоти газів які відходять від високотемпературних установок

5.1. Особливості розрахунку металевого рекуператора по безрозмірним температурам

Приклад 5.1

В металевий рекуператор поступають охолоджені продукти згорання C_2H_2 з температурою $t'_2 = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ та залишають його з температурою $t''_2 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$. Витрата палива на горіння $V_{g,z} = 3,5 \frac{M_n^3}{200}$, вологовміст палива $d_2 = 9 \frac{e}{M_n^3}$. Через теплообмінник проходить все повітря, необ-

хідне для горіння палива при $\alpha = 1,2$. Вологовміст повітря $d_{нов} = 8 \frac{г}{Мн}$.

Температура повітря на вході в теплообмінник $t'_{нов} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Коефіцієнт втрат теплоти прийняти $\varphi_{нс} = 0,95$. Визначити температуру повітря на виході з теплообмінника без врахування і з врахуванням $\varphi_{нс}$ та теоретичний коефіцієнт регенерації теплоти.

Короткий запис умови прикладу

$$C_2H_2; \quad t'_2 = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t''_2 = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t'_{нов} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad \alpha = 1,2;$$

$$V_{в.г} = 3,5 \frac{Мн^3}{год}; \quad d_2 = 9 \frac{г}{Мн}; \quad d_{нов} = 8 \frac{г}{Мн}; \quad \varphi_{нс} = 0,95.$$

Розв'язання

Перераховуємо сухий газ на вологий ($C_2H_2 - 98,9\%$, $H_2O = 1,1\%$),

та виконуємо розрахунок горіння при $\alpha = 1,2$; $d_{нов} = 10 \frac{г}{Мн}$. Результа-

ти розрахунку: $V_{пр.зг}^{\partial} = 14,769 \frac{Мн^3}{Мн}$; $V_{нов}^{\partial} = 14,26 \frac{Мн^3}{Мн}$ (розрахунок горіння

палива не наводиться). Об'ємні частки продуктів згорання палива

$$r_{CO_2}^{\partial} = 0,134; \quad r_{N_2}^{\partial} = 0,756; \quad r_{O_2}^{\partial} = 0,033; \quad r_{H_2O}^{\partial} = 0,077.$$

Витрата продуктів згорання V_{Γ} та повітря $V_{нов}$ за нормальних умов

$$V_{\Gamma} = V_{в.г} \cdot V_{пр.зг}^{\partial} = 3,5 \cdot 14,769 = 51,69 \frac{Мн^3}{год}$$

$$V_{нов} = V_{в.г} \cdot V_{нов}^{\partial} = 3,5 \cdot 14,26 = 49,91 \frac{Мн^3}{год}$$

Водяний еквівалент зі сторони продуктів згорання (газів)

$$W_{\Gamma} = V_{\Gamma} \cdot \bar{C}_{\Gamma} \Big|_{t'_r}^{t''_r}, \quad (6.1)$$

де $\bar{C}_{\Gamma} \Big|_{t'_r}^{t''_r}$ - середня об'ємна ізобарна теплоємність продуктів згорання в

проміжку температур від t'_2 до t''_2

$$\begin{aligned} \bar{C}_G \Big|_0^{t'_G} &= \bar{C}_G \Big|_0^{300} = \bar{C}_{CO_2} \cdot r_{CO_2}^\partial + \bar{C}_{N_2} \cdot r_{N_2}^\partial + \bar{C}_{O_2} \cdot r_{O_2}^\partial + \bar{C}_{H_2O} \cdot r_{H_2O}^\partial = \\ &= 1,8628 \cdot 0,134 + 1,311 \cdot 0,756 + 1,3562 \cdot 0,033 + 1,5425 \cdot 0,077 = 1,404 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{C}_G \Big|_0^{t''_G} &= \bar{C}_G \Big|_0^{100} = 1,7200 \cdot 0,134 + 1,3013 \cdot 0,756 + 1,3193 \cdot 0,033 + 1,5019 \cdot 0,077 = \\ &= 1,373 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

Тоді

$$\bar{C}_G \Big|_{t'_G}^{t''_G} = \bar{C}_G \Big|_{100}^{300} = \frac{1,404 \cdot 300 - 1,373 \cdot 100}{300 - 100} = 1,42 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}}.$$

$$W_G = V_G \cdot \bar{C}_G \Big|_{100}^{300} = 51,69 \cdot 1,42 = 73,4 \frac{\text{кДж}}{\text{год} \cdot \text{К}}.$$

Задаємо середньою об'ємною ізобарною теплоємністю повітря в проміжку температур від $t'_{нов}$ до $t''_{нов}$, приймаємо $\bar{C}_{нов} \Big|_{t'_{нов}}^{t''_{нов}} = 1,31 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}}.$

Водяний еквівалент зі сторони повітря

$$W_{нов} = V_{нов} \cdot \bar{C}_{нов} \Big|_{t'_{нов}}^{t''_{нов}} = 49,91 \cdot 1,31 = 65,38 \frac{\text{кДж}}{\text{год} \cdot \text{К}}.$$

Відношення водяних еквівалентів

$$W = \frac{W_G}{W_{нов}} = \frac{73,4}{65,38} = 1,12.$$

Безрозмірна температура газів

$$\theta_G = \frac{t''_G - t'_{нов}}{t'_G - t'_{нов}} = \frac{100 - 25}{300 - 25} = 0,273.$$

За графіком [3] стор.149 або за додатком 3 по значенню $W = 1,12$ та $\theta_G = 0,273$ визначасмо безрозмірну температуру повітря $\theta_{нов} = 0,81$.

Температура повітря на виході з теплообмінника без врахування втрат теплоти в навколишнє середовище

$$\theta_{нов} = \frac{t''_{нов} - t'_{нов}}{t'_Г - t'_{нов}}.$$

Звідси

$$t''_{нов} = \theta_{нов} \cdot (t'_Г - t'_{нов}) + t'_{нов} = 0,81 \cdot (300 - 25) + 25 = 247,75 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура повітря на виході з теплообмінника з врахування втрат теплоти в навколишнє середовище визначається з рівняння

$$\theta'_{нов} = W \cdot (1 - \theta_Г) \cdot \varphi_{ис} = 1,12 \cdot (1 - 0,273) \cdot 0,95 = 0,77.$$

Тоді $(t''_{нов})_{\varphi} = 0,77 \cdot (300 - 25) + 25 = 236,75 \text{ } ^\circ\text{C}.$

Теоретичний коефіцієнт регенерації теплоти

$$r_T = \frac{\theta_{нов}}{W} = \frac{0,81}{1,12} = 0,723.$$

За графіком теоретичний коефіцієнт регенерації теплоти, r_T^{ep} рівний $r_T^{ep} \approx 0,73.$

Дійсний коефіцієнт регенерації теплоти

$$r_{\delta} = \frac{\theta'_{нов}}{W} = \frac{0,77}{1,12} = 0,687.$$

Перевіряємо прийняте середнє значення теплоємності повітря

$$\left(\bar{C}_{нов} \Big|_{t'_{нов}}^{t''_{нов}} \right)_{\delta} = \bar{C}_{нов} \Big|_{25}^{247,75} = \frac{1,311975 \cdot 247,75 - 1,29795 \cdot 25}{247,75 - 25} = 1,3135 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}},$$

де $\bar{C}_{нов} \Big|_0^{25} = 1,29795 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}};$ та $\bar{C}_{нов} \Big|_0^{247,75} = 1,311975 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}}.$

Задавались $\bar{C}_{нов} \Big|_{t'_{нов}}^{t''_{нов}} = 1,31 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}},$ дійсне значення середньої об'ємної

ізобарної теплоємності повітря $\left(\bar{C}_{нов} \Big|_{t'_{нов}}^{t''_{нов}} \right) = 1,3135 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_H^3 \cdot \text{К}}.$ Збіжність

величин досить задовільна.

5.2. Коефіцієнт регенерації теплоти матеріалу, що пройшов термообробку

Приклад 5.2

Після термообробки, піношамотні кульки при температурі $t_M = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ охолоджуються повітрям. Повітря підігрівається до температури $t''_{нов} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ та поступає для технологічних потреб підприємства. Визначити ступінь регенерації теплоти нагрітого матеріалу, якщо в якості палива використовується мазут М10 ($H^P = 12,3\%$; $C^P = 85,6\%$; $S^P = 0,5\%$; $W^P = 1,0\%$; $O^P = 0,5\%$; $A^P = 0,1\%$). Вологовміст повітря, що поступає на горіння, прийняти $d_{нов} = 10 \frac{\text{г}}{\text{м}_n^3}$. Коефіцієнт надлишку повітря складає $\alpha = 1,2$. Фізичною теплотою палива знехтувати. Питома витрата палива на термообробку матеріалу складає $\epsilon = 0,01054 \frac{\text{кг палива}}{\text{кг матеріалу}}$. Теплоємність матеріалу прийняти рівною $C_M = 0,1 + 0,000145t_M$.

Короткий запис умови прикладу

$$t_M = 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t''_{нов} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad d_{нов} = 10 \frac{\text{г}}{\text{м}_n^3}; \quad \epsilon = 0,01054 \frac{\text{кг палива}}{\text{кг матеріалу}};$$

$$C_M = 0,1 + 0,000145t_M; \quad \alpha = 1,2; \quad O^P = 0,5\%; \quad A^P = 0,1\%;$$

$$H^P = 12,3\%; \quad C^P = 85,6\%; \quad S^P = 0,5\%; \quad W^P = 1,0\%.$$

Розв'язання

Перевіряємо правильність задання складу палива

$$\sum_{i=1}^6 G_i^P = 12,3 + 85,6 + 0,5 + 1,0 + 0,5 + 0,1 = 100,0\%.$$

Виконуємо розрахунок повного горіння палива при $\alpha = 1,2$, та при

$d_{нов} = 10 \frac{z}{M_n^3}$ (розрахунок не наводиться). Результати розрахунку:

$$V_{нов}^{\partial} = 12,6 \frac{M_n^3}{\text{кг}}$$

Теплоємність матеріалу

$$C_M = 0,1 + 0,000145 t_M = 0,1 + 0,000145 \cdot 1300 = 0,2885 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Коефіцієнт регенерації теплоти

$$r = \frac{v \cdot V_{нов}^{\partial} \cdot \bar{C}_{нов} \cdot t_{нов}''}{C_M \cdot t_M} = \frac{0,01054 \cdot 12,6 \cdot 1,4118 \cdot 1000}{0,2885 \cdot 1300} = 0,5,$$

де $\bar{C}_{нов} \Big|_0^{t_{нов}''} = \bar{C}_{нов} \Big|_0^{1000} = 1,4118 \frac{\text{кДж}}{\text{М}_n^3 \cdot \text{К}}$ - середня об'ємна ізобарна теплоємність повітря в проміжку температур від 0°C до $t_{нов}''$.

Економія питомої кількості затраченої теплоти, яка вноситься з паливом за рахунок попереднього підігріву повітря

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 339C^P + 1030H^P + 109(S^P - O^P) - 25,16W^P = \\ &= 339 \cdot 85,6 + 1030 \cdot 12,3 + 109(0,5 - 0,5) - 25,16 \cdot 1,0 = 41662,24 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}. \end{aligned}$$

Ентальпія повітря, яке надходить на горіння

$$h_{нов} = V_{нов}^{\partial} \cdot \bar{C}_{нов} \cdot t_{нов}'' = 12,6 \cdot 1,4118 \cdot 1000 = 17778,68 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$Q_H^P - 100\%$$

$$h_{нов} - Q_{ек}$$

$$\text{Звідси} \quad Q_{ек} = \frac{h_{нов} \cdot 100}{Q_H^P} = \frac{17778,68 \cdot 100}{41662,24} = 42,7\%.$$

5.3. Ступінь регенерації теплоти відхідних продуктів згорання

Приклад 5.3

Визначити коефіцієнт регенерації теплоти відхідних продуктів згоряння коксу ($C^p = 81,0\%$; $S^p = 1,7\%$; $W^p = 7,3\%$; $A^p = 10,0\%$). Коефіцієнт надлишку повітря прийняти $\alpha = 1,25$. Вологовміст повітря $d_{нов} = 11 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Повітря, що поступає на горіння коксу, попередньо підігрівається в металевому рекуператорі до температури $t_{нов} = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ за рахунок теплоти відхідних продуктів згоряння. Температура продуктів згоряння перед рекуператором $t_{від} = 1560 \text{ }^\circ\text{C}$.

Короткий запис умови прикладу

$$C^p = 81,0\% ; \quad S^p = 1,7\% ; \quad W^p = 7,3\% ; \quad A^p = 10,0\% ;$$

$$\alpha = 1,25 ; \quad d_{нов} = 11 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} ; \quad t_{нов} = 550 \text{ }^\circ\text{C} ; \quad t_{від} = 1560 \text{ }^\circ\text{C} .$$

Розв'язання

Перевіряємо правильність задання складу палива

$$\sum_{i=1}^4 G_i^p = 81,0 + 1,7 + 7,3 + 10,0 = 100,0\% .$$

Виконуємо розрахунок повного горіння палива при $\alpha = 1,25$, та

$d_{нов} = 11 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (розрахунок не наводиться). Результати розрахунку

$$\text{горіння палива : } V_{нов}^\partial = 9,19 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} ; \quad V_{нр.зг}^\partial = 9,28 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} ; \quad r_{CO_2}^\partial = 0,17 ;$$

$$r_{O_2}^\partial = 0,04 ; \quad r_{N_2}^\partial = 0,77 ; \quad r_{H_2O}^\partial = 0,02 .$$

Коефіцієнт регенерації теплоти відхідних продуктів згоряння визначаємо за формулою

$$r = \frac{h_{нов}}{h_{від}} = \frac{V_{нов}^\partial \cdot \bar{C}_{нов} \cdot t_{нов}}{V_{нр.зг}^\partial \cdot \bar{C}_{від} \cdot t_{від}} , \quad (6.2)$$

де $\bar{C}_{нов} = \bar{C}_{нов} \Big|_0^{550} = 1,3497 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$ - середня об'ємна ізобарна теплоємність

повітря в проміжку температур від $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_{нов}$.

$$\bar{C}_{\text{вiд}} = \bar{C}_{\text{вiд}} \Big|_0^{1560} = \bar{C}_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2}^{\text{д}} + \bar{C}_{\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2}^{\text{д}} + \bar{C}_{\text{O}_2} \cdot r_{\text{O}_2}^{\text{д}} + \bar{C}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} =$$

$$= 2,34756 \cdot 0,17 + 1,45524 \cdot 0,77 + 1,53454 \cdot 0,04 + 1,86684 \cdot 0,02 = 1,6183 \frac{\text{кДж}}{\text{м}_n^3 \cdot \text{К}}.$$

Тоді за формулою 5.2

$$r = \frac{9,19 \cdot 1,3497 \cdot 550}{9,28 \cdot 1,6183 \cdot 1560} = 0,291 \text{ або } 29,1\%.$$

5.4. Коефіцієнт тепловикористання палива без попереднього підігріву та з попереднім підігрівом компонентів горіння палива

Приклад 5.4

В камерній печі спалюється некондиція сланцевої смоли наступного складу : $C^{\Gamma} = 84\%$; $H^{\Gamma} = 10,5\%$; $S^{\Gamma} = 0,5\%$; $N^{\Gamma} = 1,0\%$; $O^{\Gamma} = 4,0\%$; $A^P = 0,9\%$; $W^P = 10\%$ при коефіцієнті надлишку повітря $\alpha = 1,3$ та вологовмісту повітря $d_{\text{нов}} = 12 \frac{\text{г}}{\text{м}_n^3}$.

Визначити коефіцієнт використання палива при холодному дутті $t_{\text{нов}} = 40^{\circ}\text{C}$ та з попереднім підігрівом $t'_{\text{нов}} = 500^{\circ}\text{C}$. Температуру відхідних продуктів згорання прийняти $t_{\text{вiд}} = 1250^{\circ}\text{C}$. Втрати теплоти на хімічний недопал та дисоціацію не враховувати.

Короткий запис умови прикладу

$$C^{\Gamma} = 84\% ; \quad H^{\Gamma} = 10,5\% ; \quad S^{\Gamma} = 0,5\% ; \quad N^{\Gamma} = 1,0\% ;$$

$$O^{\Gamma} = 4,0\% ; \quad A^P = 0,9\% ; \quad W^P = 10\% ; \quad \alpha = 1,3 ;$$

$$d_{\text{нов}} = 12 \frac{\text{г}}{\text{м}_n^3} ; \quad t_{\text{нов}} = 40^{\circ}\text{C} ; \quad t'_{\text{нов}} = 500^{\circ}\text{C} ; \quad t_{\text{вiд}} = 1250^{\circ}\text{C}.$$

Розв'язання

Перевіряємо правильність задання складу палива

$$\sum_{i=1}^5 G_i^r = 84 + 10,5 + 0,5 + 1,0 + 4,0 = 100,0\% .$$

Виконуємо розрахунок повного горіння палива на ЕОМ за програмою PAL2 (розрахунок не наводиться). Результати розрахунку :

$$V_{np.32}^{\partial} = 12,58 \frac{M_n^3}{\kappa\mathcal{Z}} ; V_{нов}^0 = 9,15 \frac{M_n^3}{\kappa\mathcal{Z}} ; r_{RO_2}^{\partial} = 0,111 ; r_{H_2O}^{\partial} = 0,10 ; r_{N_2}^{\partial} = 0,737 ;$$

$$r_{O_2}^{\partial} = 0,045 ; Q_H^P = 34491,6 \frac{\kappa\mathcal{Дж}}{\kappa\mathcal{Z}} .$$

Коефіцієнт використання палива без попереднього підігріву визначається за формулою

$$\eta_{вик} = 1 - \frac{h_{вид}}{Q_H^P} , \quad (6.3)$$

де $h_{вид} = V_{np.32}^{\partial} \cdot \bar{C}_{np.32} \cdot t_{вид}$ - ентальпія відхідних продуктів згорання

$$\begin{aligned} \bar{C}_{np.32} &= \bar{C}_{np.32} \Big|_0^{t_{вид}} = \bar{C}_{np.32} \Big|_0^{1250} = \bar{C}_{RO_2} \cdot r_{CO_2}^{\partial} + \bar{C}_{N_2} \cdot r_{N_2}^{\partial} + \bar{C}_{O_2} \cdot r_{O_2}^{\partial} + \bar{C}_{H_2O} \cdot r_{H_2O}^{\partial} = \\ &= 2,2769 \cdot 0,111 + 1,42545 \cdot 0,737 + 1,50565 \cdot 0,045 + 1,78995 \cdot 0,107 = 1,5525 \frac{\kappa\mathcal{Дж}}{M_n^3 \cdot K} . \end{aligned}$$

$$h_{вид} = 12,55 \cdot 1,5525 \cdot 1250 = 11255,62 \frac{\kappa\mathcal{Дж}}{\kappa\mathcal{Z}} .$$

$$\eta_{вик} = 1 - \frac{11255,62}{34491,6} = 0,674 \text{ або } 67,4\% .$$

Коефіцієнт використання палива при його підігріві до $t_{нов} = 40^{\circ}C^{\circ}$

$$\eta_{вик}^{40^{\circ}C} = 1 - \frac{h_{вид} - h_{нов}}{Q_H^P} , \quad (6.4)$$

$$h_{нов} = \alpha \cdot V_{нов}^0 \cdot \bar{C}_{новB} \cdot t_{нов} = 1,3 \cdot 9,15 \cdot 1,29846 \cdot 40 = 617,8 \frac{\kappa\mathcal{Дж}}{\kappa\mathcal{Z}} .$$

$$\text{де } \bar{C}_{нов} = \bar{C}_{нов} \Big|_0^{40} = 1,29846 \frac{\kappa\mathcal{Дж}}{M_n^3 \cdot K} .$$

Коефіцієнт використання палива при попередньому підігріві повітря до $t'_{нов} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$h_{нов} = 1,3 \cdot 9,15 \cdot 1,3428 \cdot 500 = 7986,302 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$\text{де } \bar{C}_{нов} = \bar{C}_{нов} \Big|_0^{500} = 1,3428 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

$$\eta_{нов}^{500^{\circ}\text{C}} = 1 - \frac{11255,62 - 7986,302}{34491,6} = 0,905 \text{ або } 90,5\%$$

При цьому необхідно відмітити, що попередній підігрів здійснюється за рахунок теплоти відхідних продуктів згорання.

Література

1. Расчет нагревательных и термических печей : справ. изд. / Василькова С. Б., Генкина М. М., Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е., Масалович В. Г., Перимов А. А., Спивак Э. Н., Тымчак В. М. М. : Металлургия, 1983. 480с.
2. Краснощеков Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. М. : Энергия, 1969. 264 с.
3. Щукин А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов. М. : Энергия, 1973. 224 с.
4. Методические указания и контрольные задания по курсу «Топливо, основы теории горения и огнетехнические установки» Раздел «Курсовая работа с примером проектирования нагревательной печи» / Сост. С. В. Волков, Б. В. Анцев. К. : КПИ, 1990. 68 с.
5. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки. Київ : А.С.К. 2005. 480 с.
6. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Розенгарт Ю. И., Потапов Б. Б., Ольшанский В. М., Бородулин А. В. Киев; Донецк : Вища школа. Головное издательство, 1986. 296 с.
7. Кривандин В. А., Филимонов Ю. П., Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. Т.1. М. : Металлургия, 1986. 479 с.