

**Методичні вказівки
до виконання самостійної та контрольної робіт
з дисципліни
"Високотемпературні процеси та установки"**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Методичні вказівки
до виконання самостійної та контрольної робіт
з дисципліни
"Високотемпературні процеси та установки"

Вінниця
ВНТУ
2017

Рекомендовано до друку Методичною радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 17.12. 2015 р)

Рецензенти:

С. Й. Ткаченко, доктор технічних наук, професор

І. В. Коц, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання самостійної та контрольної робіт з дисципліни "Високотемпературні процеси та установки" / Укладач Л. А. Боднар. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 60 с.

В методичних вказівках до виконання самостійної та контрольної робіт студентів наведено методи і приклади розв'язання задач та завдання на самостійну та індивідуальну роботу, теми, що вивчаються в курсі "Високотемпературні процеси та установки".

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.....	5
1.1 Зміст дисципліни.....	5
1.2. Інформаційний обсяг навчальної дисципліни	6
2 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ РЕКУПЕРАТОРІВ ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧЕЙ	8
3. РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВКАХ	20
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПЕЧІ З КРОКУЮЧИМ ПОДОМ.	29
5 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОВТРАТ З ПОВЕРХОНЬ ПЕЧІ.....	36
5.1 Розрахунок тепловтрат через бічні стіни	36
5.2 Розрахунок тепловтрат через склепіння печі.....	37
5.3 Розрахунок тепловтрат через під печі	38
5.4 Розрахунок втрат теплоти в навколишнє середовище.....	39
5.5 Розрахунок втрат теплоти випромінюванням через садочне вікно.	39
6 РОЗРАХУНОК НЕПОВНОГО ГОРІННЯ ПАЛИВА	41
7 МАТЕРІАЛЬНИЙ ТА ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ВАПНЯКОВО-ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ	43
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	54
Додаток А	55
Додаток Б	56
Додаток В.....	57
Додаток Г	58
Додаток Д.....	58
Додаток Е.....	59
Додаток Ж.....	59

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки містять основний матеріал для виконання самостійної роботи та завдань студентами заочної та денної форм навчання.

В результаті вивчення дисципліни "Високотемпературні процеси та установки" згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

знати: об'єкт вивчення; основні і суміжні проблеми; формувати вміння відбирати енергозбережні теплові, теплотехнічні та конструктивні схеми високотемпературних теплотехнологічних установок, методи їх визначення та розрахунків;

вміти: виконувати інженерно-технічні розрахунки, аналізувати отримані результати та приймати рішення за результатами цих розрахунків, користуватись науковою, довідковою та нормативною літературою, знаходити раціональні методи розв'язання практичних завдань.

Методичні вказівки підготовлені відповідно до навчальної програми дисципліни "Високотемпературні процеси та установки". В рамках годин, відведених за навчальним планом на самостійну роботу, автор намагався в стислому вигляді викласти основні методи розрахунку рекуператорів промислових печей, теплообміну у високотемпературних установках, що значно полегшить самостійну роботу студентів, оскільки в стилістичному вигляді зібрано основний матеріал, необхідний для ефективного виконання практичних завдань. Викладений у методичних вказівках матеріал буде корисним в подальших процесах курсового та дипломного проектування.

Автор вдячна рецензентам за слушні пропозиції та поради в процесі підготовки методичних вказівок до друку.

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

На самостійну роботу студентів денної форми навчання відводиться згідно з навчальною програмою 98 годин (загальний обсяг годин – 54), для студентів заочної форми навчання – 156 годин.

Отже, основним видом занять студентів при вивченні курсу є самостійна робота над навчальним матеріалом, що містить такі елементи: відвідування лекцій; вивчення дисципліни за підручниками і навчальними посібниками; виконання контрольної роботи; виконання практичних завдань; індивідуальні консультації. Завершальним етапом вивчення курсу є здача диференційного заліку.

Робота з книгою. Вивчати курс рекомендується за темами, заздалегідь ознайомившись зі змістом кожної з них за програмою. Спочатку потрібно отримати загальне уявлення про матеріал, відзначаючи важкі і незрозумілі місця, не затримуючись на математичних виведеннях. При повторному читанні слід засвоїти всі теоретичні положення, формули, їх виведення.

Контрольна робота. В процесі вивчення курсу студент повинен виконати контрольну роботу (заочна форма навчання). Доцільно приступити до виконання контрольної роботи після засвоєння певної частини курсу, відповідної теми роботи.

Консультації. У разі затруднень при вивченні курсу студент повинен звернутися до викладача для отримання консультації, точно вказуючи, в чому він має труднощі. За консультацією слід також звертатися з питань організації самостійної роботи.

Лекції і практичні роботи. Всі види занять проводяться відповідно до графіка виконання навчального процесу. На лекціях глибоко і детально розглядаються принципові проблемні питання, які складають теоретичний фундамент курсу. На практичних заняттях детально опрацьовуються окремі питання, проводяться розрахунки елементів високотемпературних установок та допоміжного устаткування.

Залік. Для складання заліку необхідне міцне і глибоке засвоєння всіх теоретичних, практичних питань програми і уміння застосовувати отримані знання для аналізу і рішення практичних завдань.

1.1 Зміст дисципліни

Мета викладання дисципліни "Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки" – надати студентам необхідні теоретичні та практичні знання про особливості різноманітних високотемпературних теплотехнологічних процесів та установок, про методи їх розрахунку при реалізації їх в теплотехнологічному обладнанні.

Основними завданнями вивчення дисципліни "Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки" є засвоєння енергетичних та теплотехнічних основ високотемпературних технологій; формування уявлення

про взаємозв'язок і взаємообумовленість технологічних, енергетичних та теплотехнічних аспектів теплотехнологій; формування чіткого погляду на проблему економії паливно-енергетичних ресурсів у високотемпературних технологіях; одержання всебічного уявлення про багатогранність високо-температурних процесів та установок.

1.2 Інформаційний обсяг навчальної дисципліни

ТЕМА 1. Вступ у високотемпературну теплотехнологію та енергетику теплотехнології.

Початкові поняття та означення. Енергетичний баланс та основні напрямки використання енергоресурсів України. Енергетика теплотехнологій.

ТЕМА 2. Характеристика високотемпературних теплотехнологічних процесів та умови їх організації.

Короткий аналіз високотемпературних теплотехнологічних процесів. Умови проведення високотемпературних теплотехнологічних процесів у промислових печах. Визначальний температурний параметр процесу. Температурний рівень високотемпературного теплотехнологічного процесу. Основні умови розвитку високотемпературних процесів у промислових теплотехнологічних установках.

ТЕМА 3. Організація процесів генерації теплоти у високотемпературних теплотехнологічних установках.

Механізм процесу горіння. Кінетична та дифузійна області горіння. Факельний процес спалювання газоподібного палива. Особливості спалювання рідкого палива. Особливості спалювання твердого палива.

ТЕМА 4. Розрахунки процесу горіння палива.

Розрахунки повного та неповного горіння палива.

ТЕМА 5. Теплові, теплотехнічні та конструктивні схеми високотемпературних установок.

Класифікація високотемпературних теплотехнологічних процесів. Робочий простір печей. Теплові та теплотехнічні схеми печей. Класифікація високотемпературних установок.

ТЕМА 6. Конструктивні елементи високотемпературних установок (ВУ).

Основні елементи високотемпературних установок. Фундаменти та основи. Каркаси. Огородження високотемпературних установок. Гарнітура, механізми та обладнання ВУ.

ТЕМА 7. Конструкційні та технологічні матеріали високотемпературних установок.

Вплив стійкості конструкції на показники роботи ВУ. Конструкційні металеві матеріали. Загальні властивості та особливості мінеральних матеріалів. Вогнетривкі матеріали та вироби.

ТЕМА 8. Теплообмін у паливних високотемпературних установках.

Організація теплопередачі в промислових паливних печах. Рівномірно розподілений радіаційний теплообмін. Спрямований прямий радіаційний теплообмін. Спрямований непрямий радіаційний теплообмін. Конвективний та конвективно-радіаційний режими теплообміну. Печі зі щільним фільтрувальним шаром. Печі з псевдозрідженим шаром. Печі для процесу в завислому шарі. Внутрішній теплообмін.

ТЕМА 9. Конструктивні схеми промислових печей.

ТЕМА 10. Матеріальний та тепловий баланси високотемпературних установок.

Матеріальний баланс. Тепловий баланс. Енергетичний баланс. Тепло-технічні характеристики роботи ВУ.

ТЕМА 11. Основи регенеративного тепловикористання.

ТЕМА 12. Критерії ефективності енерговикористання у ВУ. Критерії ефективності енерговикористання у ВУ. Варіанти використання вторинних енергоресурсів високотемпературних установок. Порівняльна оцінка варіантів використання теплоти технологічних газів. Основи регенеративного тепловикористання.

ТЕМА 13. Раціональні рівні нагрівання повітря. Керамічні регенеративні підігрівники повітря. Керамічні рекуперативні підігрівники повітря.

ТЕМА 14. Металеві рекуперативні підігрівники повітря. Умови роботи металу при високих температурах. Теплотехнічні умови надійної та ефективної роботи металевих рекуператорів. Інтенсифікація відведення теплоти від металевої стінки рекуператора. Конструкції та схеми включення металевих рекуператорів.

ТЕМА 15. Парогенератори на відхідних технологічних газах.

Напрямки використання пари. Низькотемпературні парогенератори на відхідних газах. Високотемпературні парогенератори на відхідних газах. Парогенератори кисневих конверторів.

ТЕМА 16. Примусове охолодження, використання шлаків та теплоти технологічних продуктів.

Призначення примусового охолодження. Теплоносії та їх застосування. Конструкції елементів примусового випарного охолодження. Використання шлаків. Використання теплоти технологічних продуктів.

ТЕМА 17. Комбіноване енерготехнологічне тепловикористання.

ТЕМА 18. Проектування та експлуатація промислових печей. Розрахунок, конструювання і застосування промислових печей з радіаційними трубами.

ТЕМА 19. Екологічні аспекти роботи промислових печей.

2 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКУ РЕКУПЕРАТОРІВ ПРОМИСЛОВИХ ПЕЧЕЙ

Приклад 2.1 Для камерної нагрівальної печі, що використовує природний газ Саратовського родовища, забезпечити економію палива на рівні 20-ти відсотків, встановивши трубчатий рекуператор. У печі нагріваються 40 сталевих заготовок (сталь 45Х) довжиною 400 мм, прямокутного профілю 70×100 мм від початкової температури $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до кінцевої температури 880°C .

Загальний час нагрівання становить $\tau = 1,4$ години. Втрати теплоти теплопровідністю крізь кладку та на її акумуляцію в сумі становлять 34%, втрати теплоти випромінюванням крізь вікна завантаження та видавання становлять 12% від втрат теплоти з відхідними газами. Коефіцієнт надлишку повітря при спалюванні $\alpha = 1,1$ температура відхідних газів з робочого простору $t_{\text{відх}} = 1000^\circ\text{C}$.

Визначити площу поверхні регенеративного елемента, виконати його компонування, визначити гідравлічний опір димового та повітряного трактів. Оцінити економічну ефективність прийнятого технічного рішення. Піч працює протягом 7000 годин за рік.

Розв'язання

Склад сухого газу Саратовського родовища:

$\text{CH}_4 = 84,5\%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,8\%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,9\%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,9\%$; $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,34\%$;
 $\text{N}_2 = 7,8\%$; $\text{CO}_2 = 0,8\%$.

Теплота згорання $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35,83 \text{ МДж/ м}^3$.

При $t_{\text{п.з.}} = 1000^\circ\text{C}$ та $\alpha = 1,1$ знайдемо ентальпію димових газів $I_{\text{д}} = 18 \frac{\text{МДж}}{\text{М}^3}$; питомий об'єм продуктів згорання $L_{\text{п.з.}} = 11,41 \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3}$; питомий об'єм повітря $L_{\text{пов.}} = 10,37 \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3}$; $\text{CO}_2 = 9\%$; $\text{H}_2\text{O} = 17\%$

За рис. 2.1 для досягнення економії палива в 20% для природного газу з $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 35,6 \text{ МДж/ м}^3$ при $t_{\text{д}} = 1000^\circ\text{C}$ та $\alpha = 1,1$ необхідна температура підігрівання повітря $t_{\text{пов}}'' = 325^\circ\text{C}$.

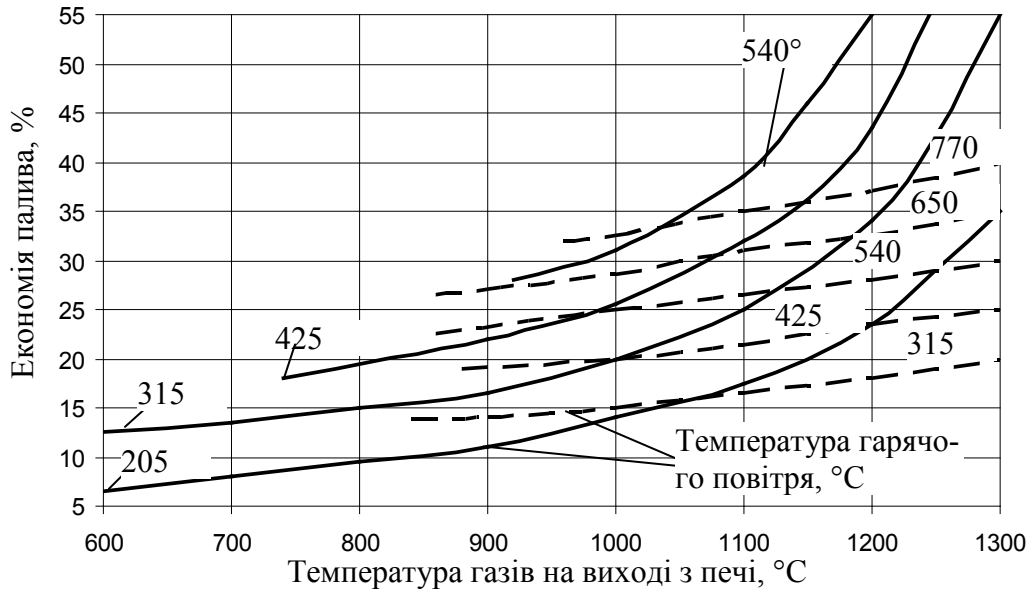


Рисунок 2.1. – Економія палива в залежності від температури нагрівання повітря для доменного і природного (пунктир) газів
Тепловий баланс печі при холодному дутті ($t''_{\text{пов}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$):

$$Q_{\text{хім.пал.}} + Q_{\text{фіз.пов.}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{ак.}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{випр}} + Q_{\text{відх}},$$

де $Q_{\text{хім.пал.}}$ – хімічна теплота палива, МДж;

$Q_{\text{фіз.пов.}}$ – фізична теплота повітря, МДж;

$Q_{\text{м}}$ – теплота, що витрачається на нагрівання металу МДж;

$Q_{\text{відх}}$ – теплота, що втрачається з відхідними газами, МДж;

$Q_{\text{випр}}$ – втрати теплоти випромінюванням крізь вікна посаду та видачі, МДж;

$Q_{\text{ак.}}$ – витрати на акумуляцію теплоти кладкою, МДж;

$Q_{\text{тепл}}$ – втрати теплоти теплопровідністю крізь кладку, МДж.

$$Q_{\text{хім.пал.}} = Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot V \cdot \tau = 35,83 \cdot V \cdot 1,4 \cdot 3600 = 180583 \cdot V \text{ (МДж)}.$$

$$Q_{\text{фіз.пов.}} = L_{\text{пов}} \cdot i_{\text{пов}} \cdot V \cdot \tau = 10,37 \cdot 20 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot 1,4 \cdot 3600 = 1358,9 \cdot V.$$

$$Q_{\text{м}} = V_{\text{заг.}} \cdot \rho_{\text{м}} \cdot n \cdot (I_{\text{м}}'' - I_{\text{м}}') = a \cdot b \cdot l \cdot n \cdot \rho_{\text{м}} \cdot (I_{\text{м}}'' - I_{\text{м}}'),$$

де $V_{\text{заг}}$ – об'єм заготовок, м^3 ;

$\rho_{\text{м}}$ – густина матеріалу металевих заготовок, $\text{кг}/\text{м}^3$;

n – кількість металевих заготовок;

$I_{\text{м}}''$ – ентальпія металу на виході, $\text{кДж}/\text{кг}$;

$I_{\text{м}}'$ – ентальпія металу на вході, $\text{кДж}/\text{кг}$;

a, b, l – висота, ширина, довжина заготовки, відповідно, м .

$$Q_{\text{м}} = 0,07 \cdot 0,1 \cdot 0,4 \cdot 40 \cdot 7820 \cdot (780 - 8,3) \cdot 10^{-3} = 500,7.$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{відх}} &= V_{\text{п.з.}} \cdot I_{\text{д}} \cdot V \cdot \tau = I_{\text{д}} \cdot V \cdot \tau = \\ &= 18 \cdot V \cdot 1,4 \cdot 3600 = 90720 \cdot V. \end{aligned}$$

$$Q_{\text{ак.}} + Q_{\text{тепл}} = Q_{\text{відх}} \cdot 0,34 = 90720 \cdot V \cdot 0,34 = 30844,8 \cdot V \text{ (МДж).}$$

$$Q_{\text{випр}} = Q_{\text{відх}} \cdot 0,12 = 90720 \cdot V \cdot 0,12 = 10886,4 \cdot V \text{ (МДж).}$$

Таким чином, з рівняння теплового балансу маємо

$$180583 \cdot V + 1358,9 \cdot V = 500,7 + 90720 \cdot V + 30844 \cdot V + 10886,4 \cdot V$$

Отже, витрата палива складає $V = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$.

Далі можна приступити до розрахунків рекуператора:

температура повітря $t_{\text{пов}}' = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{пов}}'' = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ (беремо, враховуючи охолодження повітря при його транспорті від рекуператора до пальника);

витрата палива $V = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$;

температура продуктів згорання $t_{\text{п.з.}} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$;

необхідна кількість повітря $L_{\text{пов.}} = 10,37 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$;

Витрати повітря, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\text{пов}} = L_{\text{пов.}} \cdot V = 10,37 \cdot 0,01 = 0,104.$$

Витрати продуктів згорання, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\text{п.з.}} = L_{\text{п.з.}} \cdot V = 11,41 \cdot 0,01 = 0,114.$$

Підігрівання повітря при його витратах $0,104 \text{ м}^3/\text{с}$ до температури $350 \text{ }^\circ\text{C}$ може бути реалізоване у рекуператорах декількох типів (чавунному, сталевому – прямотрубчастому, петлевому та інших).

Розглянемо один з варіантів – трубчастий петлевий рекуператор.

Витрати продуктів згорання з врахуванням їх втрат, а також присосів повітря, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V'_{\text{п.з.}} = m \cdot V_{\text{п.з.}} \cdot (1 + \rho).$$

Беремо $\rho = 0,05$; $m = 0,9$

$$V'_{\text{п.з.}} = 0,9 \cdot 0,114 (1 + 0,05) = 0,108.$$

Ентальпія продуктів згорання за рекуператором, $\text{кДж}/\text{м}^3$:

$$I''_{\text{п.з.}} = I'_{\text{п.з.}} - \frac{V_{\text{пов}} (i''_{\text{пов}} - i'_{\text{пов}})}{V'_{\text{п.з.}} \cdot \varepsilon} = 1504,4 - \frac{0,104(462 - 26)}{0,108 \cdot 0,9} = 1035,4,$$

де ε – коефіцієнт, що враховує втрати теплоти в навколишнє середовище.

Температура продуктів згорання за рекуператором $t''_{\text{п.з.}} = 690 \text{ }^\circ\text{C}$.

Середньологарифмічний температурний напір становить

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{(1000 - 350) - (690 - 20)}{\ln \frac{(1000 - 350)}{(690 - 20)}} = 660 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Для виготовлення рекуператора використовуємо суцільнотягнені труби з внутрішнім діаметром $d_{\text{вн}} = 24 \text{ мм}$ та товщиною $\delta = 1,5 \text{ мм}$, коридорне розташування труб, відносний крок труб:

$$\frac{x_1}{d_{\text{зовн}}} = \frac{x_2}{d_{\text{зовн}}} = 1,5; \quad x_1 = x_2 = 1,5 \cdot 27 = 40,5 \text{ мм}.$$

Виконаємо компоувальний розрахунок рекуператора, якщо коефіцієнт теплопередачі у рекуператорі складає $16,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Площа поверхні нагрівання рекуператора, м^2 :

$$F = \frac{V_{\text{пов}} \cdot (I''_{\text{пов}} - I'_{\text{пов}})}{k \cdot \Delta t} = \frac{0,104 \cdot (462 - 26) \cdot 10^3}{15 \cdot 660} = 4,58.$$

Кількість петлевих елементів:

$$z = \frac{4 \cdot V_{\text{пов}}}{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2 \cdot w_{\text{пов}}} = \frac{4 \cdot 0,104}{\pi \cdot 0,024^2 \cdot 7} \approx 32.$$

Середня поверхня одного елемента, м²:

$$f_c = \frac{F}{z} = \frac{4,58}{32} = 0,143.$$

$$l_c = \frac{f_c}{\pi \cdot d_c} = \frac{0,143}{\pi \cdot 0,0255} = 1,78.$$

Кількість труб в ряду, що перпендикулярний до руху продуктів згорання:

$$z_1 = \frac{V'_{\text{п.з.}}}{(x_1 - d_{\text{зовн}}) \cdot \frac{l_c}{2} \cdot w} = \frac{0,108}{(0,0405 - 0,027) \cdot \frac{1,78}{2} \cdot 0,55} = 16,3.$$

Беремо $z_1=16$, тоді $z_2=z/z_1=32/16=2$.

Варіанти завдань

Для камерної нагрівальної печі, що використовує природний газ Саратовського родовища, забезпечити економію палива на рівні n відсотків, встановивши трубчастий рекуператор. У печі нагріваються 40 сталевих заготовок (сталь 45Х) довжиною L мм, прямокутного профілю 70×100 мм від початкової температури t_0 , °С до кінцевої температури t_k , °С.

Загальний час нагрівання становить τ годин. Втрати теплоти теплопровідністю крізь кладку та на її акумуляцію в сумі становлять 34%, втрати теплоти випромінюванням крізь вікна посаду та видачі становлять 12% від втрат теплоти з відхідними газами. Коефіцієнт надлишку повітря при спалюванні $\alpha = 1,1$; температура відхідних газів з робочого простору $t_{\text{відх}}$.

Визначити площу поверхні регенеративного елемента, виконати його компонування, визначити гідравлічний опір димового та повітряного трак-

тів. Оцінити економічну ефективність прийнятого технічного рішення. Піч працює протягом x годин за рік.

Остання цифра шифру	n	L мм	t ₀ , °C	Передостання цифра шифру	t _к , °C	τ, год	t _{відх}	x
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	15	200	0	0	800	1	900	6700
1	17	250	10	1	810	1,1	950	6750
2	19	300	15	2	820	1,2	1000	6800
3	22	350	20	3	830	1,3	1050	6850
4	24	400	22	4	840	1,4	1060	7005
5	15	450	23	5	850	1,5	1070	6700
6	17	360	24	6	860	1,6	1080	6750
7	19	370	25	7	870	1,1	1090	6800
8	22	380	26	8	880	1,2	1100	6850
9	24	390	27	9	890	1,3	1150	7005

Приклад 2.2. Скласти схему утилізації теплоти відхідних газів метало-нагрівальної печі для підігрівання дуттьового повітря з використанням вертикально-трубчастого рекуператора. Виконати розрахунок горіння палива для умов: паливо-коксівий газ, витрата палива $V=3000 \text{ м}^3/\text{год}$, коефіцієнт надлишку повітря $\alpha=1,1$. Виконати проектний розрахунок рекуператора для таких умов:

температура димових газів на вході в рекуператор $t'_r = 800 \text{ °C}$;

температура підігрітого повітря $t''_{\text{пов}} = 400 \text{ °C}$;

температура холодного повітря $t'_{\text{пов}} = 20 \text{ °C}$;

рекуператор змонтовано з труб діаметром $60 \times 3,5 \text{ мм}$.

Визначити аеродинамічний опір рекуператора з повітряного боку.

Об'ємний склад коксового газу, %:

$\text{CO} = 2,3$; $\text{O}_2 = 0,8$; $\text{N}_2 = 7,8$; $\text{H}_2 = 57,5$; $\text{CH}_4 = 22,5$.

Розв'язування

Нижча теплота згорання палива, кДж/м^3 :

$$Q_n^p = 126 \cdot \text{CO} + 107 \cdot \text{H}_2 + 357 \cdot \text{CH}_4 + 637 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 =$$

$$= 126 \cdot 6,8 + 107 \cdot 57,5 + 357 \cdot 22,5 + 637 \cdot 2,3 = 16590.$$

Теоретично необхідна кількість повітря для згорання 1 м^3 коксового газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V^o = 0,0476 \left[0,5 \cdot \text{CO} + 0,5 \cdot \text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + \left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right] =$$

$$= 0,0476 \cdot \left[0,5 \cdot 6,8 + 0,5 \cdot 57,5 + 2 \cdot 22,5 + \left(2 + \frac{4}{4}\right) \cdot 2,3 - 0,8 \right] = 3,96.$$

Дійсно необхідна кількість повітря, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V^0 = \alpha \cdot V^o = 1,1 \cdot 3,96 = 4,36.$$

Об'єм продуктів згорання коксового газу на 1 м^3 газу, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$\begin{aligned} V_{\text{CO}_2} &= 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + m\text{C}_m\text{H}_n) = \\ &= 0,01 \cdot (2,3 + 6,8 + 22,5 + 2 \cdot 2,3) = 0,362. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{\text{H}_2\text{O}} &= 0,01 \cdot (\text{H}_2 + 2 \cdot \text{CH}_4 + \frac{n}{2} \text{C}_m\text{H}_n) = \\ &= 0,01(57,5 + 2 \cdot 22,5 + \frac{4}{2} \cdot 2,3) = 1,07. \end{aligned}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79 \cdot \alpha \cdot V^0 + 0,01 \cdot \text{N}_2 = 0,79 \cdot 1,1 \cdot 3,96 + 0,01 \cdot 7,8 = 3,52.$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,21 \cdot (\alpha - 1,0) \cdot V^0 = 0,21 \cdot (1,1 - 1,0) \cdot 3,96 = 0,083.$$

Загальний об'єм продуктів згорання, $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_{\Sigma} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} = 0,362 + 1,07 + 3,52 + 0,083 = 5,035.$$

Розрахункова кількість повітря, яку необхідно нагріти в рекуператорі (з врахуванням втрат 10%), $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$V_n = 1,1 \cdot V^0 = 1,1 \cdot 4,8 = 5,28.$$

Розрахункова кількість продуктів згорання (з врахуванням втрат 15%):

$$V_{\Gamma} = 0,85 \cdot V_{\Sigma} = 0,85 \cdot 5,035 = 4,28.$$

Витрати повітря, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\text{пов}} = V_{\text{пал}} \cdot V_n = 3000 \cdot 4,8 = 14400 = 4.$$

Витрата продуктів згорання, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V_{\text{п.з.}} = V_{\text{пал}} \cdot V_{\Gamma} = 3000 \cdot 4,28 = 12840 = 3,57.$$

Кількість теплоти необхідна для підігрівання повітря до t_b'' :

$$Q_{\text{ПОВ}} = V_{\text{ПОВ}} \cdot \rho_{\text{ПОВ}} \cdot (C_{\text{ПОВ}}'' \cdot t_{\text{ПОВ}}'' - C_{\text{ПОВ}}' \cdot t_{\text{ПОВ}}') =$$

$$= 4,0 \cdot 1,293 \cdot (1,068 \cdot 400 - 1,005 \cdot 20) = 2105.$$

Теплофізичні властивості повітря та димових газів за даними [2].
Температура продуктів згорання на виході з рекуператора:

$$Q_{\text{ПОВ}} = Q_{\text{П.З.}}$$

$$Q_{\text{П.З.}} = V_{\text{П.З.}} \cdot \rho_{\text{П.З.}} \cdot (C_{\text{Г}}' \cdot t_{\text{Г}}' - C_{\text{Г}}'' \cdot t_{\text{Г}}'').$$

$$t_{\text{Г}}'' = \frac{V_{\text{П.З.}} \cdot \rho_{\text{П.З.}} \cdot C_{\text{Г}}' \cdot t_{\text{Г}}' - Q_{\text{П.З.}}}{V_{\text{П.З.}} \cdot \rho_{\text{П.З.}} \cdot C_{\text{Г}}''} = \frac{3,57 \cdot 1,295 \cdot 1,264 \cdot 800 - 2105}{3,57 \cdot 1,295 \cdot 1,185} = 469 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для визначення $C_{\text{Г}}''$ брали температуру $t_{\text{Г}}'' = 500 \text{ } ^\circ\text{C}$.
Середньологарифмічна різниця температур:

$$\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{Г}}' - t_{\text{ПОВ}}'' = 800 - 400 = 400,$$

$$\Delta t_{\text{б}} = t_{\text{Г}}'' - t_{\text{ПОВ}}'' = 469 - 20 = 449,$$

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{449 - 400}{\ln \frac{449}{400}} = 424.$$

Задаємось швидкістю газів в рекуператорі $W_{\text{Г}} = 5 \text{ м/с}$.
Площа перерізу газового тракту:

$$f_{\text{Г}} = \frac{V_{\text{П.З.}}}{W_{\text{Г}}} = \frac{3,57}{5} = 0,714 \text{ м}^2.$$

Площа перерізу труби $60 \times 3,5$; $d_{\text{ВН}} = 0,053 \text{ м}$.

$$f_{\text{тр}} = 0,785 \cdot d_{\text{ВН}}^2 = 0,785 \cdot 0,0028 = 2,21 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Кількість труб для проходження газу:

$$n = \frac{f_{\text{Г}}}{f_{\text{тр}}} = \frac{0,714}{2,21 \cdot 10^{-3}} = 325.$$

Середня температура газів, $^{\circ}\text{C}$:

$$\bar{t}_{\text{Г}} = \frac{t_{\text{Г}}' + t_{\text{Г}}''}{2} = \frac{800 + 469}{2} \approx 635.$$

Фактична середня швидкість газів, м/с при \bar{t}_r :

$$\bar{W}_r = W_r \left(1 + \frac{\bar{t}_r}{273} \right) = 5 \cdot \left(1 + \frac{635}{273} \right) = 16,6.$$

Число Рейнольдса для газів:

$$Re_r = \frac{\bar{W}_r \cdot d_{BH}}{\nu} = \frac{16,6 \cdot 0,053}{100,1 \cdot 10^{-6}} \approx 8800.$$

Критерій Нуссельта для газів:

$$\begin{aligned} Nu_r &= 0,021 \cdot Re_r^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{CT}} \right)^{0,25} = \\ &= 0,021 \cdot 8800^{0,8} \cdot 0,62^{0,43} \left(\frac{0,62}{1,0} \right)^{0,25} = 27,71. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$:

$$\alpha_r = \frac{Nu_r \cdot \lambda_r}{d_{BH}} = \frac{27,71 \cdot 0,031}{0,053} = 161,6.$$

Коефіцієнтом тепловіддачі випромінюванням знехтуємо.

Далі виконуємо розрахунки з боку повітря. Труби в рекуператорі ском-
понуємо в шаховій послідовності. Кількість труб беремо $18 \times 18 = 324$.

При компонуванні беремо такі кроки труб:
 $S = S_1 = S_2 = 1,5 \cdot 60 = 90 \text{ мм} = 0,09 \text{ м}$.

Беремо умовну швидкість повітря в рекуператорі, м/с:

$$W_{пов.у.} = 5.$$

Площа перерізу по повітря, м²:

$$f_{пов} = \frac{V_{пов}}{W_{пов.у.}} = \frac{4,0}{5} = 0,8.$$

Ширина каналу для проходження повітря, м:

$$b = n \cdot S = 18 \cdot 0,09 = 1,62.$$

Висота каналу для проходження повітря, м:

$$h = \frac{f_{\text{пов}}}{n \cdot S} = \frac{0,8}{1,62} = 0,5.$$

Сума вузьких перерізів в каналі по повітрю, м²:

$$\sum f_{\text{вуз}} = h \cdot S'_2 \cdot n = 0,5 \cdot 0,067 \cdot 18 = 0,603.$$

Середня температура повітря:

$$\bar{t}_{\text{пов}} = \frac{t''_{\text{пов}} + t'_{\text{пов}}}{2} = \frac{400 + 20}{2} = 210 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Швидкість повітря, м/с, у вузьких прерізах при $\bar{t}_{\text{пов}} = 210 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$\bar{W}_{\text{пов}} = W_{\text{пову}} \cdot \left(1 + \frac{\bar{t}_{\text{пов}}}{273}\right) = 5 \cdot \left(1 + \frac{210}{273}\right) = 8,85.$$

Критерій Рейнольдса для повітря:

$$Re_{\text{пов}} = \frac{\bar{W}_{\text{пов}} \cdot d_{\text{н}}}{\nu_{\text{пов}}} = \frac{8,85 \cdot 0,06}{36 \cdot 10^{-6}} = 14750.$$

Критерій Нуссельта для повітря [3]:

$$\begin{aligned} \bar{Nu}_{\text{пов}} &= 0,41 \cdot Re_{\text{пов}}^{0,6} \cdot Pr^{0,06} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} = \\ &= 0,41 \cdot 14750^{0,6} \cdot 0,68^{0,06} \left(\frac{0,68}{1}\right)^{0,25} = 104. \end{aligned}$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$\alpha_{\text{пов}} = \frac{\bar{Nu}_{\text{пов}} \cdot \alpha_{\text{пов}}}{d_{\text{н}}} = \frac{104 \cdot 3,95 \cdot 10^{-2}}{0,06} = 68,5.$$

Коефіцієнт теплопередачі в рекуператорі, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Gamma}} + \frac{\alpha}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{пов}}}} = \frac{1}{\frac{1}{31,6} + \frac{0,0035}{43} + \frac{1}{68,5}} = 21,6.$$

Площа поверхні нагрівання рекуператора, м²:

$$F_H = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{2105 \cdot 10^3}{21,6 \cdot 424} = 229,8.$$

Середній діаметр труб, м:

$$d_c = \frac{d_H + d_{BH}}{2} = \frac{0,06 + 0,053}{2} = 0,0565.$$

Довжина труб, м:

$$L = \frac{F_H}{\pi \cdot d_c \cdot n} = \frac{229,8}{3,14 \cdot 0,0565 \cdot 324} = 3,99 \approx 4,0.$$

Кількість ходів:

$$n_{\text{ход}} = \frac{L}{h} = \frac{4,0}{0,5} = 8.$$

Еквівалентний діаметр найбільш стиснутого перерізу, м:

$$d_{\text{екв}} = \frac{4 \cdot F}{S} = \frac{4 \cdot 0,5 \cdot 0,067}{2 \cdot (0,067 + 0,5)} = 0,099.$$

Число Рейнольдса з боку повітря:

$$Re = \frac{\overline{W}_{\text{пов}} \cdot d_{\text{екв}}}{\nu} = \frac{8,85 \cdot 0,099}{36 \cdot 10^{-6}} = 24338.$$

Число Ейлера визначимо за рекомендаціями [4]:

$$\frac{1 - \frac{d}{S_2}}{\frac{S_1}{d} - 1} = \frac{1 - \frac{0,06}{0,067}}{\frac{0,09}{0,06} - 1} = 0,21 < 0,53.$$

Для шахового компоунвання:

$$Eu = 1,4 \cdot (z + 1) \cdot Re^{-0,25} = 1,4 \cdot (18 + 1) \cdot 24338^{-0,25} = 2,13.$$

Втрати тиску в одному вході, Па :

$$\Delta P_i = Eu \cdot \rho_{\text{пов}} \cdot \overline{W}_{\text{пов}}^2 = 2,13 \cdot 0,75 \cdot 8,85^2 = 125.$$

Сумарні втрати тиску, Па:

$$\Delta P_{\Sigma} = n_{\text{ход}} \cdot \Delta P_i = 8 \cdot 125 = 1000.$$

Потужність на валу вентилятора дугтьового повітря, Вт:

$$N = \frac{V_{\text{пов}} \cdot \Delta P_{\Sigma}}{\eta} = \frac{4,0 \cdot \left(1 + \frac{20}{273}\right) \cdot 1000}{0,8} = 5366.$$

$$N = 5,4 \text{ кВт.}$$

Продуктивність вентилятора, м³/с, при температурі повітря $t'_{\text{пов}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$V'_{\text{пов}} = V_{\text{пов}} \cdot \left(1 + \frac{t'_{\text{пов}}}{273}\right) = 4,0 \cdot \left(1 + \frac{20}{273}\right) = 4,3.$$

Варіанти завдань

Скласти схему утилізації теплоти відхідних газів металонагрівальної печі для підігрівання дугтьового повітря з використанням вертикально-трубчатого рекуператора. Виконати розрахунок горіння палива для умов: паливо-коксівий газ, витрата палива $V = 3000 \text{ м}^3/\text{год}$, коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,1$. Виконати проектний розрахунок рекуператора для таких умов: температура димових газів на вході в рекуператор $t'_r, \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура підігрітого повітря $t''_{\text{пов}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$; температура холодного повітря $t'_{\text{пов}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$; рекуператор змонтовано з труб діаметром $60 \times 3,5 \text{ мм}$.

Остання цифра шифру	$V, \text{ м}^3/\text{год}$	$t'_r, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$t''_{\text{пов}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Передостання цифра шифру	$t'_{\text{пов}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$
0	2000	750	350	0	5
1	2050	800	410	1	10
2	3010	850	450	2	15
3	3020	860	460	3	21
4	3030	870	470	4	23
5	3040	880	480	5	24
6	3050	890	490	6	25
7	3060	750	350	7	26
8	3070	820	420	8	27
9	3080	850	420	9	28

3 РОЗРАХУНОК ТЕПЛООБМІНУ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ УСТАНОВКАХ

Приклад 3.1 Визначити годинну витрату палива для безперервно діючої камерної печі. Паливо – мазут з теплою згорання $Q_H^p = 39500$ кДж/кг. Продуктивність печі $G = 741$ кг/год. Вигар металу складає 1,3% від маси нагрітого металу, втрати від хімічного недопалу $q_3 = 1,5\%$ від теплоти згорання палива. Температура відхідних газів $t_{в.г.} = 1300$ °С. Визначити також економію палива у випадку застосування підігрівання повітря, що йде на горіння до 400 °С. Теплота згорання палива $Q_H^p = 39500$ кДж/кг, теплоємність палива $c_p = 2,1$ кДж/(кг·К). Втрати теплоти в навколишнє середовище прийняти $Q_{н.с.} = 131,5$ кВт, температура нагрівання металу t_m . Об'єми продуктів згорання, м³/кг: $V^0 = 10,7$; $V_{CO_2} = 1,586$; $V_{N_2}^0 = 8,453$; $V_{H_2O}^0 = 1,47$; $\Delta V_{пов.} = 1,601$.

Розв'язування

Ентальпія мазуту при температурі 90 °С, кДж/кг

$$I_p = c_p \cdot t_p = 2,1 \cdot 90 = 189.$$

Ентальпія повітря при температурі 20 °С, кДж/кг

$$I_{пов.} = V^0 \cdot \alpha \cdot c_{пов.} \cdot t_{пов.} = 10,7 \cdot 1,15 \cdot 1,295 \cdot 20 = 319.$$

Втрати теплоти від хімічного недопалу, кДж/кг

$$q_{х.н.} = q_3 \cdot Q_H^p = 0,015 \cdot 39500 = 592.$$

Втрати теплоти від механічного недопалу беремо $q_4 = 0\%$.

Втрати теплоти з відхідними газами, кДж/кг

$$I_{в.г.} = (V_{CO_2} \cdot c_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot c_{N_2} + \Delta V_{пов.} \cdot c_{пов.} + V_{H_2O}^0 \cdot c_{H_2O}) \cdot t_{в.г.} =$$

$$= (1,586 \cdot 2,3 + 8,453 \cdot 1,425 + 1,601 \cdot 1,445 + 1,47 \cdot 1,806) \cdot 1300 = 24000,$$

де c_{CO_2} , c_{N_2} , $c_{пов.}$, c_{H_2O} – теплоємності продуктів згорання взяті з додатка А.

Коефіцієнт використання палива

$$\eta_{вик} = 1 + \frac{I_{пал} + I_{пов.}}{Q_H^p} - \frac{q_{х.н.} + q_{м.н.} + I_{в.г.}}{Q_H^p} = 1 + \frac{189 + 319}{39500} - \frac{592 + 24000}{39500} = 0,391.$$

Кількість теплоти, що виділяється при згоранні металу, кДж/кг

$$Q_{\text{екз}} \approx 5660 \cdot \frac{y}{100} = 5660 \cdot \frac{1,3}{100} = 73,4.$$

Кількість теплоти, що затрачається на технологічний процес, кДж/кг:

$$Q_{\text{техн}} = (Q_{\text{т.п.}} - Q_{\text{т.м.}}) + (Q_{\text{т.в.}} - Q_{\text{енд}}) - Q_{\text{екз.}}$$

де $Q_{\text{т.п.}}$ – теплота технологічного продукту (в даному випадку теплота металу, що виводиться з печі);

$Q_{\text{т.м.}}$ – теплота технологічного матеріалу (теплота металу, що вводиться в піч);

$Q_{\text{т.в.}}$ – теплота технологічних відходів;

$Q_{\text{енд.}}$ – теплота ендотермічних реакцій;

$Q_{\text{екз.}}$ – теплота екзотермічних реакцій.

$$Q_{\text{техн}} = (1250 \cdot 0,689 - 0) - 73,4 = 787,6,$$

де 0,689 – теплоємність сталі У12 при температурі 1250 °С.

Втрати теплоти в навколишнє середовище на 1 кг металу, кДж/кг

$$Q_{\text{втр}} = \frac{Q_{\text{н.с.}} \cdot 3600}{G} = \frac{131,5 \cdot 3600}{741} = 640.$$

Питома витрата палива, кг/кг

$$b = \frac{Q_{\text{техн.}} + Q_{\text{втр.}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot \eta_{\text{вик.}}} = \frac{787,6 + 640}{39500 \cdot 0,391} = 0,092.$$

Питома витрата умовного палива, кг/кг

$$b_y = \frac{b \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{29330} = \frac{0,092 \cdot 39500}{29330} = 0,124.$$

Годинна витрата мазуту, кг/год

$$B = G \cdot b = 741 \cdot 0,092 = 68,17.$$

З метою зменшення витрати палива на піч встановлено рекуператор для підігрівання повітря, що йде на горіння. Визначити економію палива в разі нагрівання повітря до 400 °С. Для спрощення розрахунків беремо попередні умови роботи печі.

Ентальпія повітря при 400 °С, кДж/кг

$$I_{\text{пов.}} = V^0 \cdot \alpha \cdot (c\vartheta)_{\text{пов.}} = 10,7 \cdot 1,15 \cdot 542 = 6669,3.$$

Коефіцієнт використання палива

$$\eta_{\text{вик}} = 1 + \frac{I_{\text{пал}} + I_{\text{пов}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} - \frac{q_{\text{х.н.}} + q_{\text{м.н.}} + I_{\text{в.г.}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} =$$

$$= 1 + \frac{189 + 6669,3}{39500} - \frac{592 + 24000}{39500} = 0,55.$$

Питома витрата палива, кг/кг

$$b = \frac{Q_{\text{техн.}} + Q_{\text{втр.}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{вик.}}} = \frac{787,6 + 640}{39500 \cdot 0,55} = 0,066.$$

Годинна витрата мазуту, кг/год

$$B = G \cdot b = 741 \cdot 0,066 = 48,7.$$

Економія палива, %

$$\Delta B = 100((68,17 - 48,7)/68,17) = 28,56.$$

В дійсності умови роботи камери змінюються (в сторону збільшення температури печі), і, отже, встановлення рекуператора, окрім економії палива, дає збільшення продуктивності печі.

Варіанти завдань

Визначити годинну витрату палива для безперервно діючої камерної печі. Паливо – мазут. Продуктивність печі G , кг/год. Вигар металу складає 1,3% від маси нагрітого металу, втрати від хімічного недопалу $q_3 = 1,5\%$ від теплоти згорання палива. Температура відхідних газів $t_{\text{в.г.}}$, °C. Визначити також економію палива у випадку застосування підігріву повітря, що йде на горіння до t_1 , °C. Втрати теплоти в навколишнє середовище прийняти $Q_{\text{н.с.}} = 131,5$ кВт, температура нагрівання металу $t_{\text{м.}}$, °C. Коефіцієнт надлишку повітря 1,15. Марка сталі – М. Дані для варіантів взяти з таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

Варіант	G , кг/ГОД.	$t_{\text{в.г.}}$, °C	М	t_1 , °C	$t_{\text{м.}}$, °C.	Склад мазуту, №
1	2	3	4	5	6	7
1	600	1200	08	300	1150	1
2	610	1250	15	310	1200	2
3	620	1300	20	320	1250	3
4	630	1210	35	330	1160	4

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7
5	640	1220	40	340	1170	1
6	650	1230	45	350	1180	2
7	660	1240	У8	360	1190	3
8	670	1260	У9	370	1210	4
9	680	1270	У12	380	1220	1
10	690	1280	20	390	1230	2

1. $W^p = 0,15$; $A^p = 0,03$; $S^p = 0,39$ $C^p = 87,33$; $H^p = 11,9$; $N^p+O^p = 0,2$.
2. $W^p = 0,2$; $A^p = 0,03$; $S^p = 0,85$; $C^p = 86,58$; $H^p = 12,04$; $N^p+O^p = 0,3$.
3. $W^p = 0,49$; $A^p = 0,05$; $S^p = 1,8$; $C^p = 85,71$; $H^p = 11,45$; $N^p+O^p = 0,5$.
4. $W^p = 1$; $A^p = 0,06$; $S^p = 2,55$; $C^p = 85,04$; $H^p = 10,64$; $N^p+O^p = 0,71$.

Приклад 3.2. Визначити час нагрівання заготовки із низьколегової сталі діаметром 500 мм, поміщеної в піч з постійною температурою $t_{\text{п}} = 850$ °С. Середня за масою температура металу в кінці нагрівання $t_{\text{м}} = 727$ °С. Початкова температура сталі $t_{\text{м}}^0 = 20$ °С. Фізичні константи сталі: $\lambda = 35$ Вт/мК; $c = 0,71$ кДж/(кгК); $\rho = 7860$ кг/м³; $a = 0,0225$ м²/год. Приведений коефіцієнт випромінювання $C_{\text{п}} = 3,5$ Вт/(м²К⁴).

Розв'язування

Визначимо критерій Іванцова:

$$I = \frac{10 \cdot C_{\text{п}} \cdot R}{\lambda} \cdot \left(\frac{T_{\text{п}}}{1000} \right)^3 = \frac{10 \cdot 3,5 \cdot 0,25}{35} \cdot 1,123^3 = 0,35.$$

Початкова відносна температура металу

$$y_1 = \frac{T_{\text{м}}^0}{T_{\text{п}}} = \frac{293}{1123} \approx 0,26.$$

Кінцева відносна температура металу

$$y_2 = \frac{T_{\text{м}}}{T_{\text{п}}} = \frac{1000}{1123} \approx 0,89.$$

За графіком рис. 3.1 знаходимо значення функцій: $\psi_1 = 0,24$; $\psi_2 = 0,24$. Знайдемо критерій Фур'є

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2} = \frac{\psi_2 - \psi_1}{2 \cdot I} = \frac{1,23 - 0,24}{2 \cdot 0,35} \approx 1,41.$$

Визначимо час нагрівання, год:

$$\tau = \frac{Fo \cdot R^2}{a} = \frac{1,41 \cdot 0,25^2}{0,0225} = 3,92.$$

Значення зовнішньої температури заготовки і температури в центрі визначимо наближено.

Тепловий потік на поверхні заготовки в кінці нагрівання буде:

$$q_M^{\text{пов}} = C_{\text{п}} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_M^{\text{пов}}}{100} \right)^4 \right] = \frac{2 \cdot \Delta t_M \cdot \lambda}{R}.$$

Середня температура металу за масою визначається за формулою

$$t_M = t_M^{\text{центр}} + 0,33 \cdot \Delta t_M.$$

Задаючи температуру на поверхні заготовки в кінці нагрівання $t_M^{\text{пов}} = 780$ °С, знайдемо, що

$$q_M^{\text{пов}} = 3,5 \cdot [11,23^4 - 10,54^4] = 21200.$$

Температурний перепад між поверхнею і центром заготовки, °С

$$\Delta t_M = \frac{q_M^{\text{пов}} \cdot R}{2 \cdot \lambda} = \frac{21200 \cdot 0,25}{2 \cdot 35} = 76.$$

Температура металу в центрі заготовки, °С

$$t_M^{\text{центр}} = 780 - 76 = 704.$$

Середня температура за масою металу, °С

$$t_M = 704 + 0,33 \cdot 76 \approx 730,$$

що близько підходить до заданого значення.

Отже, температури на поверхні і в центрі заготовки наприкінці нагрівання можна приблизно вважати $t_M^{\text{пов}} = 780$ °С і $t_M^{\text{центр}} = 704$ °С.

Якщо задана температура поверхні металу чи його центра, то розрахунок ведуть у зворотному порядку.

Якщо проводиться розрахунок нагрівання пластини, необхідно скористатись графіком 3.2.

Варіанти завдань

Приклад 3.2. Визначити час нагрівання заготовки із низьколегованої сталі діаметром D , мм, поміщеної в піч з постійною температурою $t_{\text{п}}$, °С.

Середня за масою температура металу в кінці нагрівання t_m , °С. Початкова температура сталі t_m^0 , °С. Марка сталі – табл. 3.2. Приведений коефіцієнт випромінювання $C_{\pi} = 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$.

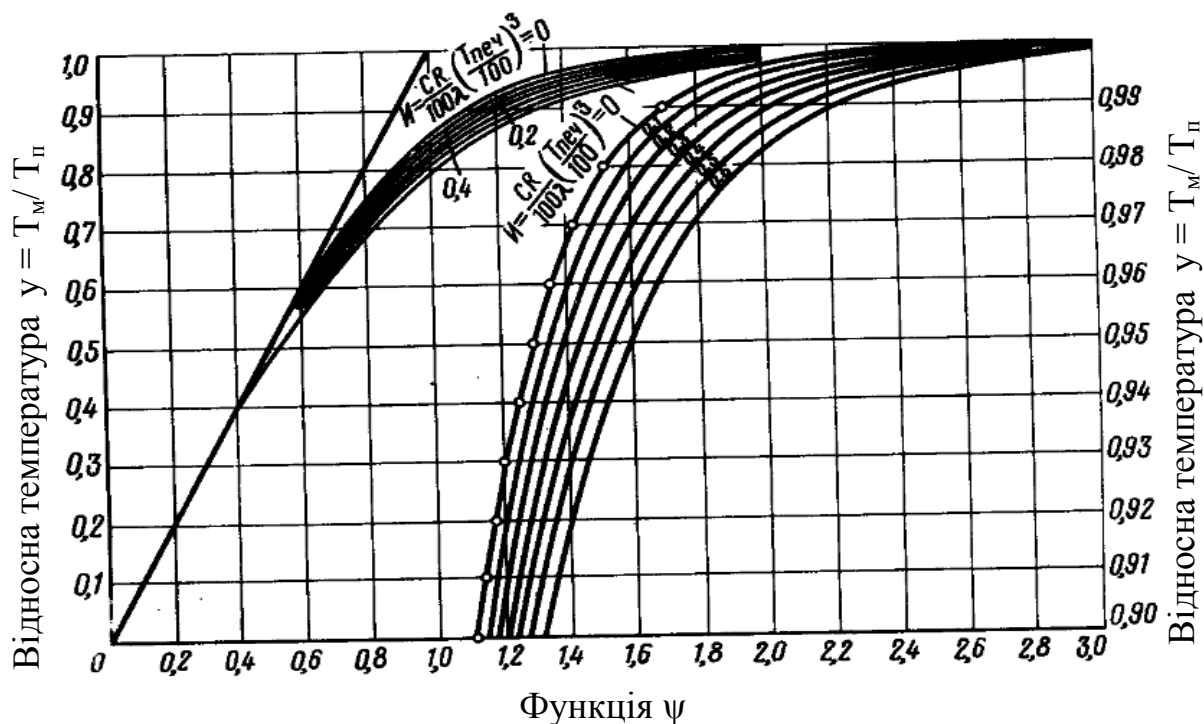


Рисунок 3.1 – Допоміжний графік для розрахунку нагрівання циліндра

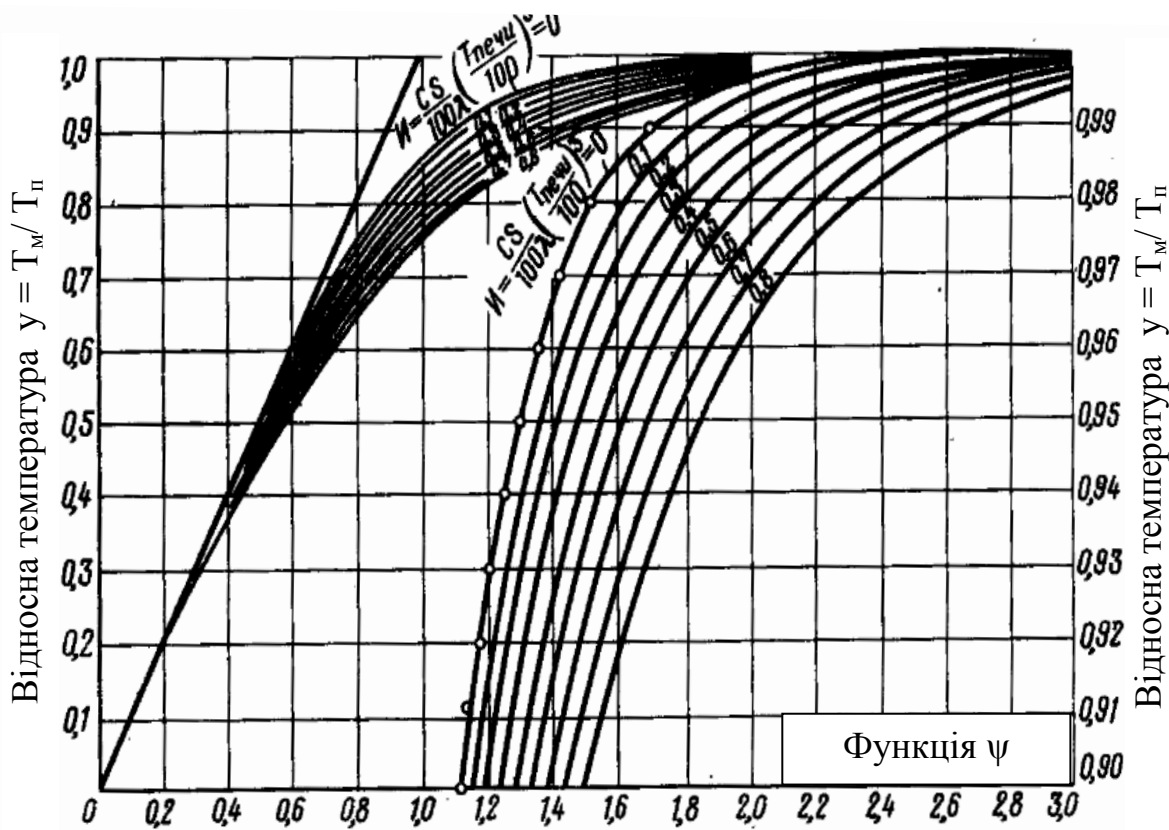


Рисунок 3.2 – Допоміжний графік для розрахунку нагрівання пластини

Таблиця 3.2 – Варіанти завдань

Варіант Т	D, мм	Марка сталі	t _п , °С	t _м , °С	t _м ⁰ , °С.
1	450	08	850	726	0
2	500	15	840	722	10
3	550	20	830	718	15
4	460	35	820	714	20
5	470	40	860	710	25
6	480	45	870	727	30
7	490	У8	880	729	35
8	510	У9	865	722	40
9	520	У12	855	718	45
10	530	20	845	714	50

Приклад 3.3. Для щільної камерної печі (рис. 3.3) визначити температуру відхідних газів. Температура металу: початкова $t'_m = 20$ °С, кінцева $t''_m = 1250$ °С. Теоретична температура горіння $t_t = 1900$ °С. Ефективна променепоглиняльна поверхня металу $H_{пр} = 1,085$ м². Витрата палива (мазуту) $B = 18,8 \times 10^{-3}$ кг/с. Кількість продуктів згорання при $\alpha = 1,15$, $V_r = 13,11$ м³/кг. Коефіцієнт корисної дії камери згорання $\eta_k = 0,92$.

Розв'язування

Безрозмірні температури:

Початкова металу

$$\theta'_m = \frac{T'_m}{T_t} = \frac{20 + 273}{1900 + 273} = 0,135.$$

Кінцева металу

$$\theta''_m = \frac{T''_m}{T_t} = \frac{1250 + 273}{1900 + 273} = 0,7.$$

Відхідних газів

$$\theta_{в.г.} = \frac{T_{в.г.}}{T_t}.$$

Задаємось попередньо температурою відхідних газів $t_{в.г.} = 1300$ °С, середня теплоємність газів $c_r = 1720$ Дж/(кг·К).

Приведена міра чорноти $\epsilon_b = 0,43$.

Визначимо критерій Больцмана

$$Bo = \frac{B \cdot V_r \cdot \bar{c}_r \cdot \eta_k}{10 \cdot c_0 \cdot H_{пр.} \cdot \left(\frac{T_r}{1000}\right)^3} = \frac{18,18 \cdot 10^{-3} \cdot 13,11 \cdot 1720 \cdot 0,92}{10 \cdot 5,67 \cdot 1,085 \cdot 2,173^3} = 0,69.$$

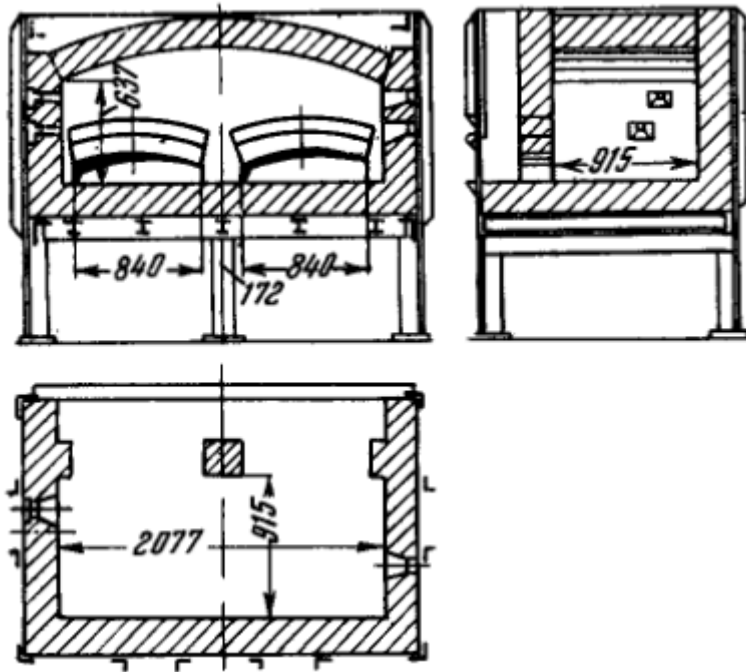


Рисунок 3.3 – Щілинна камерна піч

Умовний коефіцієнт забруднення променепоглиняльної поверхні прийнятий $\xi = 0,7$. Співвідношення променевого і конвективного теплообміну $\beta_{конв.}$ для даного типу печі можна взяти рівним 1,15;

$$m = (1 - \theta_M^4)^{1/2} = (1 - 0,7^4)^{1/2} = 0,87.$$

$$\theta_{в.г.} = \frac{-Bo + \sqrt{Bo^2 + 4 \cdot Bo \cdot \xi \cdot \beta_{конв.} \cdot m}}{2 \cdot \varepsilon_B \cdot \xi \cdot \beta_{конв.} \cdot m}.$$

$$\theta_{в.г.} = \frac{-0,69 + \sqrt{0,69^2 + 4 \cdot 0,69 \cdot 0,7 \cdot 0,43 \cdot 0,87 \cdot 1,15}}{2 \cdot 0,43 \cdot 0,7 \cdot 0,87 \cdot 1,15} = 0,74.$$

Температура відхідних газів рівна, °C:

$$t_{в.г.} = \theta_{в.г.} \cdot T_r - 273 = 0,74 \cdot 2173 - 273 = 1315,$$

що близько до раніше взятої.

Варіанти завдань

Для щілинної камерної печі визначити температуру відхідних газів. Температура металу: початкова $t'_m, ^\circ\text{C}$, кінцева $t''_m, ^\circ\text{C}$. Теоретична температура горіння $t_r, ^\circ\text{C}$. Ефективна променепоглиняльна поверхня металу $H_{\text{пр}}, \text{м}^2$. Витрата палива (мазуту) $B, \text{кг/с}$. Кількість продуктів згорання при $\alpha = 1,15, V_r = 13,11 \text{ м}^3/\text{кг}$. Коефіцієнт корисної дії камери згорання $\eta_k = 0,92$. Варіанти завдань наведено в таблиці 3.3

Таблиця 3.3 – Варіанти завдань

Варіант	$t'_m, ^\circ\text{C}$	$t''_m, ^\circ\text{C}$	t_r	Марка сталі	$H_{\text{пр}}$	B
1	0	900	1700	08	1,01	0,018
2	10	1000	1750	15	1,02	0,017
3	20	1100	1800	20	1,03	0,0175
5	30	1200	1850	35	1,04	0,0185
6	5	1250	1900	40	1,05	0,019
7	15	950	1910	45	1,06	0,0195
8	25	1150	1920	У8	1,07	0,0178
9	35	1050	19300	У9	1,09	0,016
10	40	1260	1940	У12	1,095	0,0177
11	20	1000	1100	40	1	0,01
12	25	1020	1160	15	1,1	0,012
13	30	950	1010	40	1,03	0,0185
14	40	970	1020	45	1,04	0,019
15	50	980	1030	У8	1,05	0,0195

4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ПЕЧІ З КРОКУЮЧИМ ПОДОМ

Приклад 4.1. Визначити мінімально необхідні продуктивність та тиск мазутного насоса для систем опалення мазутом марки 100 печі з крокуючим подом продуктивністю 300 тонн за годину для нагрівання блюмів середньовуглецевої сталі з початковою температурою металу $t_m^n = 0$ °С до кінцевої температури матеріалу $t_m^k = 1200$ °С при різниці температур по перебігу в кінці нагрівання $\Delta t_{\text{кін}} = 50$ °С при коефіцієнті корисної дії печі $\eta_{\text{п}} = 50\%$. Хімічний склад мазуту: $C^P = 86,5\%$; $H^P = 10,5\%$; $N^P = 0,3\%$; $O^P = 0,3\%$; $S^P = 0,3\%$; $W^P = 1,8\%$; $A^P = 0,3\%$; густина при $t = 20$ °С складає $\rho_{20} = 1000$ кг/м³, коефіцієнт кінематичної в'язкості при $t = 50$ °С становить $\nu_{50} = 750 \cdot 10^{-6}$ м²/с при $t = 100$ °С становить $\nu_{100} = 44 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $C_{\text{рм}} = 2$ кДж/(кг К). Піч оснащена механічними мазутними форсунками в кількості $m = 30$.

Для якісного розпилювання палива температура мазуту перед форсункою повинна бути $t_{m2} = 100$ °С, дійсна швидкість витікання $u_d \geq 40$ м/с, коефіцієнт швидкості $\phi_c = 0,8$. Для підігрівання мазуту з $t_{m1} = 50$ °С до $t_{m2} = 100$ °С використовується чотириходовий теплообмінник. Гріючим теплоносієм є насичена водяна пара з тиском $P_n = 127,5$ кПа, яка конденсується. Коефіцієнт теплопередачі підігрівача $k_n = 3600$ Вт/(м² К).

Мазутний насос з підігрівачем з'єднує трубопровід довжиною 300 м. На мазутопроводі від підігрівача до колектора роздачі на форсунки довжиною 50 м знаходиться два повороти на 45° ($z'_1 = 2$), чотири повороти на 90° ($z''_2 = 4$), чотири засувки ($z'''_3 = 4$, коефіцієнт місцевого опору засувки $\xi = 1,11$). Відстань від колектора до форсунки $l_1 = 10$ м. На цьому відрізку $z'_1 = 1$; $z''_2 = 3$; $z'''_3 = 2$. Діаметр мазутопроводу від насоса до місця роздачі на форсунки незмінний. Швидкість мазуту в мазутопроводі $u_m = 1$ м/с.

Розв'язування

Виконаємо принципову схему мазутопроводу (рис. 4.1).

Визначимо корисну теплоту, що витрачається на нагрівання металу $Q_{\text{кор}}$, кВт:

$$Q_{\text{кор}} = P \cdot (I_m^k - I_m^n),$$

де $P = 83,33$ кг/с – продуктивність печі;

$I_m^n = 0$ – ентальпія середньовуглецевої сталі при $t_m^n = 0$ °С;

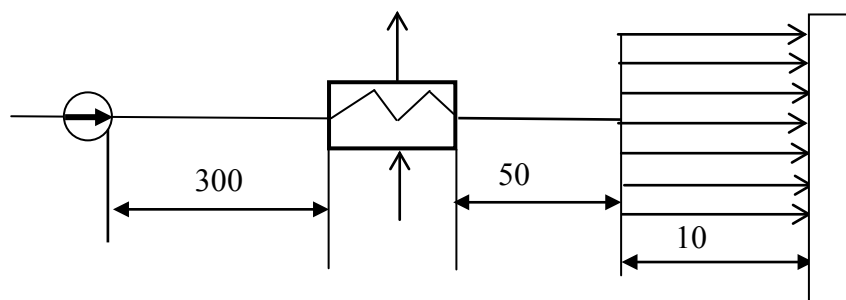


Рисунок 4.1 – Принципова схема мазутопроводу

$\Gamma_M^k = 804,3$ кДж/кг – ентальпія середньовуглецевої сталі при t_M^k .

$$Q_{\text{кор}} = 83,33 \cdot (804,3 - 0) = 67022,3.$$

Визначимо теплоту від горіння палива, кВт:

$$Q_{\text{хім}} = \frac{Q_{\text{кор}}}{\eta_{\text{п}}} = \frac{67022,3}{0,5} = 134044,6.$$

Нижча теплота згорання робочої маси мазуту може бути визначена формулою:

$$\begin{aligned} Q_p^H &= 339,1 C^p + 1256 \cdot H^p - 108,9 (O^p - S^p) - 25 \cdot (W^p + 9 \cdot H^p) = \\ &= 339,1 \cdot 86,5 + 1256 \cdot 10,5 - 108,9 \cdot (0,3 - 0,3) - 25 \cdot (1,8 + 9 \cdot 10,5) = \\ &= 40045 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

Визначимо витрати палива при роботі печі, кг/с:

$$B = \frac{Q_{\text{хім}}}{Q_p^H} = \frac{134000}{40045} = 3,35.$$

Густина мазуту при $t_M = 100$ °С, кг/м³:

$$\rho_{100} = \rho_{20} \cdot \frac{20 + 273}{100 + 273} = 1000 \cdot \frac{293}{373} = 786.$$

Визначимо теоретичну швидкість витікання мазуту u_t , м/с:

$$u_t = \frac{u_d}{\varphi_c} = \frac{40}{0,8} = 50.$$

Необхідний надмірний тиск мазуту перед соплом, МПа:

$$P_c = \frac{\rho_{100} \cdot u_t^2}{2} = \frac{786 \cdot 50^2}{2} = 0,983.$$

Визначимо витрату мазуту на одну форсунку, кг/с:

$$B_i = \frac{B}{m} = \frac{3,35}{30} = 0,11.$$

Площа прохідного перерізу мазутопроводу від колектора роздачі до форсунки, м²:

$$F_i = \frac{B_i}{\rho_{100} \cdot u_i} = \frac{0,11}{781 \cdot 1} = 1,4 \cdot 10^{-4}.$$

Діаметр мазутопроводу:

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \cdot F_i}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,4 \cdot 10^{-4}}{3,14}} = 0,014.$$

Вибираємо стандартний трубопровід діаметром 20×3, внутрішнім діаметром $d_i = 0,014$ м.

Визначимо значення критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{u_i \cdot d_i}{\nu_{100}} = \frac{1 \cdot 0,014}{44 \cdot 10^{-6}} = 318.$$

Режим руху ламінарний.

Визначимо для ламінарного режиму руху значення коефіцієнта тертя λ_1 :

$$\lambda_1 = \frac{64}{Re} = \frac{64}{318} = 0,2.$$

Визначимо сумарні втрати тиску від колектора роздачі до форсунки, Па:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= (z'_1 \cdot \xi_{45} + z''_2 \cdot \xi_{90} + z'''_3 \cdot \xi) \cdot \frac{\rho_{100} \cdot u_i^2}{2} + \lambda_1 \frac{l'}{d_i} \frac{\rho_{100} \cdot u_i^2}{2} = \\ &= (1 \cdot 0,15 + 3 \cdot 0,29 + 2 \cdot 1,11) \frac{786 \cdot 1^2}{2} + 0,2 \frac{10}{0,014} \frac{786 \cdot 1^2}{2} = 0,057. \end{aligned}$$

Визначимо площу перерізу мазутопроводу від підігрівача до колектора роздачі (швидкість мазуту $u = 1$ м/с), м²:

$$F'_M = \frac{B}{\rho_{100} \cdot u} = \frac{3,35}{786 \cdot 1} = 0,00426.$$

Діаметр мазутопроводу, м:

$$d'_M = \sqrt{\frac{4 \cdot F'_M}{\pi}} = 0,074.$$

Вибираємо стандартний трубопровід діаметром 83×4,5.

Визначимо число Рейнольдса для мазутопроводу від підігрівника до колектора роздачі:

$$Re = \frac{u_i \cdot d'_M}{\nu_{100}} = \frac{1 \cdot 0,074}{44 \cdot 10^{-6}} = 1682.$$

Режим руху ламінарний.

Визначимо коефіцієнт тертя λ'_M :

$$\lambda'_M = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1682} = 0,038.$$

Визначимо сумарні втрати тиску на мазутопроводі від підігрівника до колектора роздачі, МПа:

$$\begin{aligned} \Delta P'_M &= (z'_1 \cdot \xi_{45} + z''_2 \cdot \xi_{90} + z'''_3 \cdot \xi) \cdot \frac{\rho_{100} \cdot u^2}{2} + \lambda'_M \frac{l'}{d_i} \frac{\rho_{100} \cdot u^2}{2} = \\ &= (2 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,29 + 4 \cdot 1,11) \frac{786 \cdot 1^2}{2} + 0,038 \frac{50}{0,074} \frac{786 \cdot 1^2}{2} = 0,012. \end{aligned}$$

Визначимо кількість теплоти, необхідну для підігрівання мазуту, кВт:

$$Q = B \cdot C_{pm}(T_{M2} - T_{M1}) = 3,35 \cdot 2(373 - 323) = 335.$$

За тиском насиченої водяної пари $P_H = 127,5$ кПа визначимо параметри водяної пари $T_H = 380$ К; $I'' = 2685$ кДж/кг; $I' = 447$ кДж/кг.

Визначимо середньологарифмічну різницю температур в підігрівачі мазуту, °С:

$$\Delta T_L = \frac{T_{M2} - T_{M1}}{\ln \frac{T_{M1} - T_{H1}}{T_{M2} - T_{H1}}} = \frac{373 - 323}{\ln \frac{57}{7}} = 23,8.$$

Визначимо густину теплового потоку, Вт/м²:

$$q = k \cdot \Delta T_{\text{г}} = 3600 \cdot 23,8 \cdot 10^{-3} = 85,6.$$

Площа поверхні нагрівання, м²:

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{335}{85,6} = 3,92.$$

Визначимо сумарну довжину мазутопроводу в підігрівачі мазуту, м:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_{\text{вн}}} = \frac{3,92}{3,14 \cdot 0,074} \approx 17.$$

Розрахунок за внутрішнім діаметром мазутопроводу забезпечує запас площі поверхні нагрівання.

В чотириходовому нагрівачі є три повороти на 180 °С. Розрахунок ходу мазуту з мазутного підігрівача виконуємо при середній температурі мазуту, °С:

$$T_{\text{с}} = \frac{T_{\text{м1}} + T_{\text{м2}}}{2} = \frac{323 + 373}{2} = 348.$$

При цій температурі коефіцієнти кінематичної в'язкості та густина мазуту становлять:

$$\begin{aligned} \nu_{75} &= 150 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}. \\ \rho_{75} &= \rho_{20} \cdot \frac{293}{348} = 1000 \cdot \frac{293}{348} = 842 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Визначимо середню швидкість руху мазуту в мазутному підігрівачі, м/с:

$$\bar{u} = \frac{3,35 \cdot 4}{842 \cdot \pi \cdot 0,074^2} = 0,93.$$

Визначимо число Рейнольдса для цих умов:

$$Re_{\text{п}} = \frac{0,93 \cdot 0,074}{150 \cdot 10^{-6}} = 459.$$

Режим руху ламінарний.

Значення коефіцієнта гідравлічного тертя становить:

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{64}{Re_{\text{п}}} = \frac{64}{459} = 0,139.$$

Втрати тиску в підігрівачі мазуту, МПа:

$$\begin{aligned}\Delta P_{\Pi} &= (n \cdot \xi_{180} + \lambda_{\Pi} \frac{L}{d_{\text{BH}}}) \cdot \frac{\rho_{75} \cdot \bar{u}^2}{2} = \\ &= (4 \cdot 0,26 + 0,139 \cdot \frac{17}{0,074}) \cdot \frac{842 \cdot 0,93^2}{2} = 0,012.\end{aligned}$$

Розрахунки мазутопроводу від насоса до підігрівача виконуємо при $T_{\text{M1}}=323 \text{ K}$: $v_{50} = 750 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\rho_{50} = 1000 \cdot \frac{293}{323} = 907 \text{ кг/м}^3$.

Швидкість руху мазуту на цьому відрізку мазутопроводу, м/с:

$$u_{\text{M}}'' = \frac{3,35 \cdot 4}{907 \cdot 3,14 \cdot 0,074^2} = 0,86 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса

$$Re_{\text{M}}'' = \frac{0,86 \cdot 0,074}{750 \cdot 10^{-6}} = 84,85.$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя:

$$\lambda_{\text{M}}'' = \frac{64}{Re_{\text{M}}''} = \frac{64}{84,85} = 0,754.$$

Визначимо втрати тиску на відрізку мазутопроводу від насоса до підігрівача мазуту, МПа:

$$\Delta P_{\text{M}}'' = \lambda_{\text{M}}'' \cdot \frac{1}{d_{\text{BH}}} \cdot \frac{\rho_{50} \cdot u_{\text{M}}''^2}{2} = 0,754 \cdot \frac{300}{0,074} \cdot \frac{907 \cdot 0,86^2}{2} = 1,025.$$

Таким чином сумарні втрати тиску становлять, МПа:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_i + \Delta P_{\text{M}}' + \Delta P_{\Pi} + \Delta P_{\text{M}}'' = 0,057 + 0,012 + 0,012 + 1,025 = 1,106.$$

Мінімальний тиск на вході в мазутопровід становить, МПа:

$$P_{\text{min}} = P_c + \Delta P_{\Sigma} = 0,983 + 1,106 \approx 2,09$$

Таким чином продуктивність мазутного насоса повинна бути $V = 3,35 \text{ кг/с}$ при $P_{\text{min}} = 2,09 \text{ МПа}$.

Варіанти завдань

Визначити мінімально необхідні продуктивність та тиск мазутного насоса для системи опалення мазутом М100 печі з крокуючим подом, G , т/год для нагрівання сталевих зливків сталі марки від $t'_m = 50$ °С до t''_m , °С. ККД печі η . Теплота згорання мазуту $Q_H^p = 39$ МДж/кг. Кількість мазутних форсунок $m = 30$, температура мазуту перед форсункою 100 °С, дійсна швидкість витікання $u_d \geq 40$ м/с, коефіцієнт швидкості $\varphi_c = 0,8$. Для підігрівання мазуту від $t'_{\text{маз}} = 50$ °С до $t''_{\text{маз}} = 110$, °С використовується двоходовий теплообмінник з $K = 3500$ Вт/(м²К). Гріючий теплоносій – насичена водяна пара з P_H , кПа, яка конденсується. Мазутний насос з підігрівачем з'єднує трубопровід довжиною L_1 , м. На мазутопроводі від підігрівача до колектора роздачі на форсунки L_2 , м знаходиться два повороти на 45°, 4 повороти на 90°, 4 засувки. Відстань від колектора до форсунки $L=7$ (тут є: 2 засувки, один поворот на 45°, 3 повороти на 90°. W мазуту 1,5 м/с. Дані для розрахунків взяти з таблиці 4.1. Схема до прикладу наведена на рисунку 4.1

Таблиця 4.1 – Дані для розрахунків

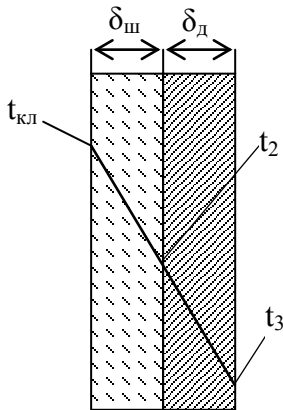
Остання цифра шифру	Марка сталі	t''_m	η	Передост. цифра шифру	G , т/год	P_H , кПа	L_1 , м	L_2 , м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	У8	1100	41	0	250	120	200	35
1	У9	1250	42	1	300	130	210	30
2	У12	1300	43	2	380	150	220	25
3	08	1150	44	3	390	160	230	45
4	10	1000	45	4	360	125	100	37
5	15	1100	41	5	370	135	120	27
6	20	1250	42	6	250	155	140	32
7	35	1300	43	7	300	165	150	50
8	40	1150	44	8	380	120	160	15
9	45	1000	45	9	390	130	170	38

5 РОЗРАХУНОК ТЕПЛОТРАТ З ПОВЕРХОНЬ ПЕЧІ

Для визначення тепловтрат через поверхні печі необхідно визначити температури зовнішніх стін печі та питомі теплові потоки через ці стіни.

5.1 Розрахунок тепловтрат через бічні стіни

Характер температурної кривої $t_{\text{кл}}-t_3$, зображеної на рис.5.1. невідомий. Тому спочатку бувають температуру зовнішньої поверхні шару ізоляції $t_3=80...100$ °С. При відомому значенні температури кладки $t_{\text{кл}}$ визначається гранична температура між кладкою та ізоляцією t_2 : $t_2 = 0,5(t_{\text{кл}}+t_3)$. Визначаються середні температури шарів вогнетривкої шамотної кладки $\bar{t}_{\text{ш}}$ та ізоляції з діатомітової цегли $\bar{t}_{\text{д}}$:



$$\bar{t}_{\text{ш}} = 0,5(t_{\text{кл}} + t_2), \quad \bar{t}_{\text{д}} = 0,5(t_3 + t_2).$$

Далі визначають коефіцієнти теплопровідності для шамоту та діатоміту за емпіричними формулами:

$$\lambda_{\text{ш}} = 0,7 + 0,00064 \cdot \bar{t}_{\text{ш}}, \quad \lambda_{\text{д}} = 0,7 + 0,000233 \cdot \bar{t}_{\text{д}}.$$

Рисунок 5.1 – Розподіл температур по товщині бічної стіни печі

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції у навколишнє середовище при вільній конвекції $\alpha_{\text{к}}$ використовують критеріальне рівняння вигляду

$$\text{Nu} = c \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n, \quad (5.1)$$

де $\text{Gr} = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta t$ – критерій Грасгофа, що характеризує інтенсивність

вільного руху теплоносія та виражає співвідношення між підйомними силами, що виникають внаслідок різниці густини рідини, та силами молекулярного тертя;

l – визначальний лінійний розмір поверхні теплообміну, що залежить від форми цієї поверхні. Для бічних стін печі цей розмір визначається висотою печі, тобто $l=h$;

β – коефіцієнт об'ємного розширення, для повітря $\beta = 1/T_{\text{пш}}$;

$T_{\text{пш}}$ – температура прилеглої поверхні повітря, К. Ця температура визначається із співвідношення $t_{\text{пш}} = t_3 + t_{\text{нс}}$. Залежно від $t_{\text{пш}}$ визначають всі фізичні константи, що входять до рівняння для визначення критеріїв. Конс-

танта c та показник степеня n залежать від режиму руху газу і визначаються з дослідних даних М. А. Міхеєва:

Таблиця 5.1 – Дані для критеріального рівняння 5.1

$Gr \cdot Pr$	c	n
$10^{-3} - 10^3$	1,18	0,125
$10^3 - 10^8$	0,5	0,25
$>10^8$	0,135	0,33

Після визначення Nu розраховують коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_k^{бичн}$.

Питомий тепловий потік q визначають за формулою, Вт/м²:

$$q = \frac{t_{кл} - t_{нс}}{\frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} + \frac{\delta_{д}}{\lambda_{д}} + \frac{1}{\alpha_k^{бичн}}}.$$

Знаючи тепловий потік q , визначають температуру на межі між шарами шамотної кладки та діатомітової теплоізоляції t_2 , а також температуру зовнішньої поверхні ізоляції t_3 :

$$t_2 = t_{кл} - q \cdot \frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}},$$

$$t_3 = t_2 - q \cdot \frac{\delta_{д}}{\lambda_{д}}.$$

Якщо отримані значення t_2 і t_3 відрізняються від розрахункових більше як на 5%, то розрахунок повторюють, прийнявши нові значення t_2 і t_3 .

5.2 Розрахунок тепловтрат через склепіння печі

Виходячи з практичних рекомендацій для горизонтальних плоских поверхонь, повернутих догори, що віддають теплоту в навколишнє середовище, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k приблизно на 30% більший, ніж для вертикальних стін, тобто $\alpha_k^{скл} \approx 1,3 \cdot \alpha_k^{бичн}$. Визначивши таким чином $\alpha_k^{скл}$, розраховують тепловий потік q та температури t_2 і t_3 (рис. 5.2)

Попередньо t_2 і t_3 беруться, розраховуються і уточнюються за схемою, наведеною в п. 5.1. За визначальний лінійний розмір l горизонтальних поверхонь теплообміну береться розмір мінімальної сторони поверхонь, тобто $l = b$.

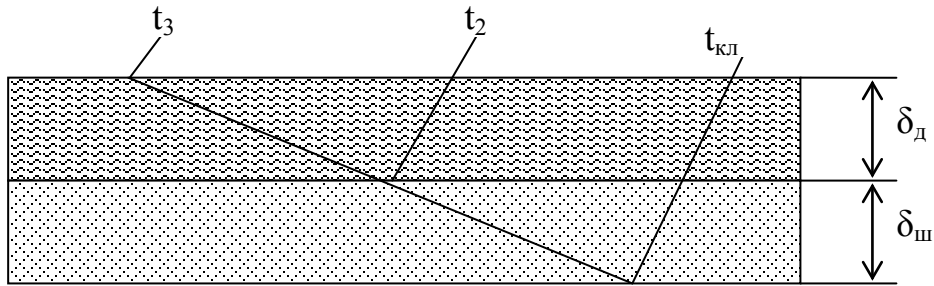


Рисунок 5.2 – Розподіл температур по товщині склепіння печі

5.3 Розрахунок тепловтрат через під печі

За практичними рекомендаціями для горизонтальних плоских поверхонь, повернутих донизу, коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k приблизно на 30% менший, ніж для вертикальних, тобто $\alpha_k^{\text{поду}} \approx 0,7 \cdot \alpha_k^{\text{бічн}}$.

Розподіл температур по товщині поду печі показано на рис. 5.3

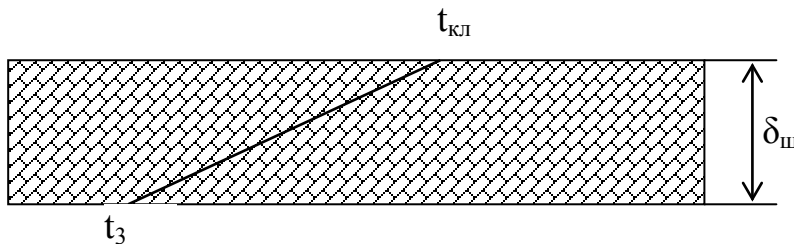


Рисунок 5.3 – Розподіл температур по товщині поду печі

Числове значення $\alpha_k^{\text{поду}}$ дає можливість визначити q , використовуючи залежність, Вт/м^2

$$q = \frac{t_{\text{кл}} - t_{\text{нс}}}{\frac{\delta_{\text{ш}}}{\lambda_{\text{ш}}} + \frac{1}{\alpha_k^{\text{поду}}}}$$

Для визначення $\lambda_{\text{ш}}$ попередньо задаються температурою $t_3 = 80..100 \text{ }^\circ\text{C}$, визначають $t_{\text{ш}} = 0,5(t_{\text{кл}} + t_3)$, а потім, $^\circ\text{C}$

$$t_3 = t_2 - q \cdot \frac{\delta_d}{\lambda_d}$$

Ця температура перевіряється також за наведеною вище методикою. Таким чином у результаті вказаних розрахунків (п. 5.1, 5.2, 5.3) стають відомими коефіцієнти тепловіддачі конвекцією $\alpha_k^{\text{скл}}$, $\alpha_k^{\text{бічн}}$, $\alpha_k^{\text{поду}}$ та відповідні температури зовнішніх поверхонь огороження печі.

5.4 Розрахунок втрат теплоти в навколишнє середовище

Теплота від стін у навколишнє середовище передається не лише конвекцією, а й випромінюванням.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначається за формулою, Вт/(м²К)

$$\alpha_p = \frac{C_{зв} \left[\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{нс}}{100} \right)^4 \right]}{T_3 - T_{нс}},$$

де $C_{зв}$ – зведений коефіцієнт випромінюванням, $C_{зв} = C_0 \cdot \varepsilon$;

ε – ступінь чорноти стінок (можна взяти $\varepsilon = 0,8$); $C_0 = 5,67$ Вт/(м²К⁴).

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі від відповідної поверхні печі в навколишнє середовище дорівнює, Вт/(м²К):

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_k + \alpha_p.$$

Теплові втрати від відповідної поверхні, Вт

$$Q = F \cdot \alpha_{\Sigma} \cdot (t_3 - t_{нс}).$$

5.5 Розрахунок втрат теплоти випромінюванням через садочне вікно

Внутрішню та зовнішню поверхні вікна можна вважати абсолютно чорними, тому що площа внутрішньої поверхні значно більша від вікна. Тому для розрахунку використовують залежність, Вт:

$$Q_{св}^{випр} = C_0 \left(\frac{T_{п}}{100} \right)^4 \cdot \Phi \cdot F \cdot \Theta,$$

де $T_{п}$ – температура печі, $T_{п} = (t_{кл} + 50) + 273$, К;

Θ – ступінь закриття садочного вікна;

Φ – коефіцієнт діафрагмування, визначається за номограмою;

F – площа отвору, м².

Результати розрахунку зводяться у таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Результати розрахунку

Поверхня печі	F, м ²	t _{кл} , °C	t ₂ , °C	t ₃ , °C	q, Вт/м ²	Втрати теплоти Q _{втр} , Вт
1	2	3	4	5	6	7
Бічна						
Склепіння						
Під						
Вікно						
Всього						

Приклад 5.1. Стіни та склепіння нагрівальної печі складаються з двох шарів: шамотної кладки завтовшки $\delta_{ш}$, м, та діатомітової ізоляції завтовшки $\delta_{д}$, м. Висувний під печі завтовшки $\delta_{п}$, м виконаний тільки із шару шамотної цегли. Розміри робочого простору печі, м: ширина $b = 1,1$ м, довжина $a = 2$ м, висота $h = 0,85$ м. Температура, °C: внутрішньої поверхні кладки $t_{кл} = 1300$ °C, навколишнього середовища (повітря) $t_{н.с.} = 15$ °C. Визначити питомий тепловий потік q , Вт/м² та втрати теплоти через стіни, склепіння та під печі, температури зовнішньої поверхні стін та склепіння. Визначити також втрати теплоти випромінюванням через садочне вікно розміром $0,1 \times 0,1$, яке на 50% зачинене водоохолоджуваною засувкою. Товщина кладки садочного вікна $\delta_{ш} + \delta_{д}$. Температуру робочого простору печі прийняти $t_{п} = t_{кл} + 50$. Нарисувати розрахункову схему печі.

Таблиця 5.3 – Варіанти завдань

Остання цифра шифру	$\delta_{ш}$, м	$\delta_{д}$, м	$\delta_{п}$, м	Передостання цифра шифру	b, м	a, м	h, м	t _{кл} , °C
0	0,24	0,123	0,45	0	1,15	2,05	0,86	1299
1	0,23	0,124	0,46	1	1,16	2,06	0,87	1285
2	0,25	0,125	0,47	2	1,2	2,1	0,9	1250
3	0,24	0,126	0,44	3	1,21	2,2	1	1310
4	0,23	0,123	0,45	4	1,15	2,05	0,86	1315
5	0,25	0,124	0,46	5	1,16	2,06	0,87	1299
6	0,24	0,125	0,47	6	1,2	2,1	0,9	1285
7	0,23	0,126	0,44	7	1,21	2,2	1	1250
8	0,25	0,124	0,45	8	1,15	2,05	0,86	1310
9	0,26	0,125	0,46	9	1,16	2,06	0,87	1315

Методика розв'язання задачі наведена також в літературному джерелі [4] С. 309 – 323.

6 РОЗРАХУНОК НЕПОВНОГО ГОРІННЯ ПАЛИВА

На практиці неповне горіння з утворенням CO має місце в шахтних печах, що використовують як паливо кокс, наприклад, у вагранках для переплавки чавуну на машинобудівних заводах. Частина вуглецю коксу в кількості y_H згоряє в оксид вуглецю CO, а інша частина в кількості $(1 - y_H)$ – у двооксид вуглецю CO₂. Величину y_H легко обчислити, знаючи вміст оксиду вуглецю CO у продуктах згорання в %, та загальну кількість сухих газів V_{cr} :

$$y_H = \frac{126 \cdot CO \cdot V_{cr}}{235 \cdot C^p}.$$

Розрахункові формули за неповного згорання вуглецю при $\alpha < 1$ мають вигляд:

витрата повітря на згорання 1 кг коксу, м³/кг

$$V_{пов} = 0,0889 \cdot [(1 - y_H) \cdot C^p + 0,375 \cdot S^p] + \\ + 0,0445 \cdot y_H \cdot C^p + 0,265 \cdot H^p - 0,033 \cdot O^p;$$

об'єм триатомних газів, м³/кг

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot [(1 - y_H) \cdot C^p + 0,375 \cdot S^p];$$

об'єм оксиду вуглецю, м³/кг

$$V_{CO} = 0,01866 \cdot y_H \cdot C^p;$$

об'єм азоту, м³/кг

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V_{пов} + 0,8 \cdot \frac{N^p}{100};$$

об'єм водяної пари, м³/кг

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V_{пов};$$

об'єм сірчистого газу, м³/кг

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot S^p.$$

Коефіцієнт витрати повітря визначимо з рівняння

$$CO = 69,4 \cdot (1 - \alpha).$$

Користуючись даною методикою, розв'язати приклад 6.1

Приклад 6.1. Розрахувати процес згорання коксу у вагранці, якщо частка вуглецю, що перетворюється на оксид вуглецю (CO), становить $y_H = 0,26$. Склад коксу, %:

Таблиця 6.1 – Склад палива для розрахунків

Вар.	C ^p	H ^p	S ^p	N ^p	O ^p	A ^p	W ^p
1	48,7	3,3	2,8	0,7	4,3	32,2	8
2	52,6	3,3	1	1,5	4,2	29,4	8
3	44,2	2,9	2,5	1,5	8,6	28,8	11,5
4	65	3,4	0,7	0,5	7	17,4	6
5	42,6	3,3	0,9	8	3,4	28,4	14
6	66	3,5	1,6	3,5	0,4	16,5	8,5
7	59,6	3,8	0,8	1,3	5,4	23,6	5,5
8	45	2,6	1,7	0,4	9,9	11,4	29
9	43,4	2,9	0,8	0,8	7	38,1	7
10	37,3	3,1	2	0,5	9,3	34,8	13
11	48	2,6	1,7	0,4	9,9	11,4	26
12	44	2,9	0,8	0,8	7,6	38,1	7
13	47	3,1	2,3	0,5	9,3	24,8	13
14	42,7	1,7	1,3	0,4	8,6	17,3	28
15	49,8	3,3	2,8	0,9	6,2	27	10
16	48,7	3,3	2,8	0,7	4,3	32,2	8
17	44,2	2,9	2,5	1,5	8,6	28,8	11,5
18	52,6	3,3	1	1,5	4,2	29,4	8
19	19,5	1,7	1,9	0,2	6,1	16,6	54
20	48,6	3,5	5,3	0,6	4	32	6
21	41,5	3,2	4,3	0,5	5,1	37,9	7,5
22	65	3,4	0,7	0,5	7	17,4	6
23	56,2	3,3	1,3	0,7	9,2	18,8	10,5
24	44,6	2,9	1,1	0,7	10,5	25,7	14,5
25	47,7	2,5	0,5	0,4	10,5	16,4	22
26	45,4	2,4	1,2	0,5	9,5	13	28

7 МАТЕРІАЛЬНИЙ ТА ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ВАПНЯКОВО-ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ

Вапняково-випалювальні печі (рис. 7.1) широко використовуються в різних галузях народного господарства, а теплотехнологічні процеси, які протікають в шахтних печах, багатогранні і мають місце в інших пічних установках (спалювання палива в щільному шарі, рух газів в каналах між шматками шихти, тепловіддача випромінюванням та конвекцією в специфічних умовах, розкладання сировини заданого елементного складу та розмірів, втрата теплоти та ін.).

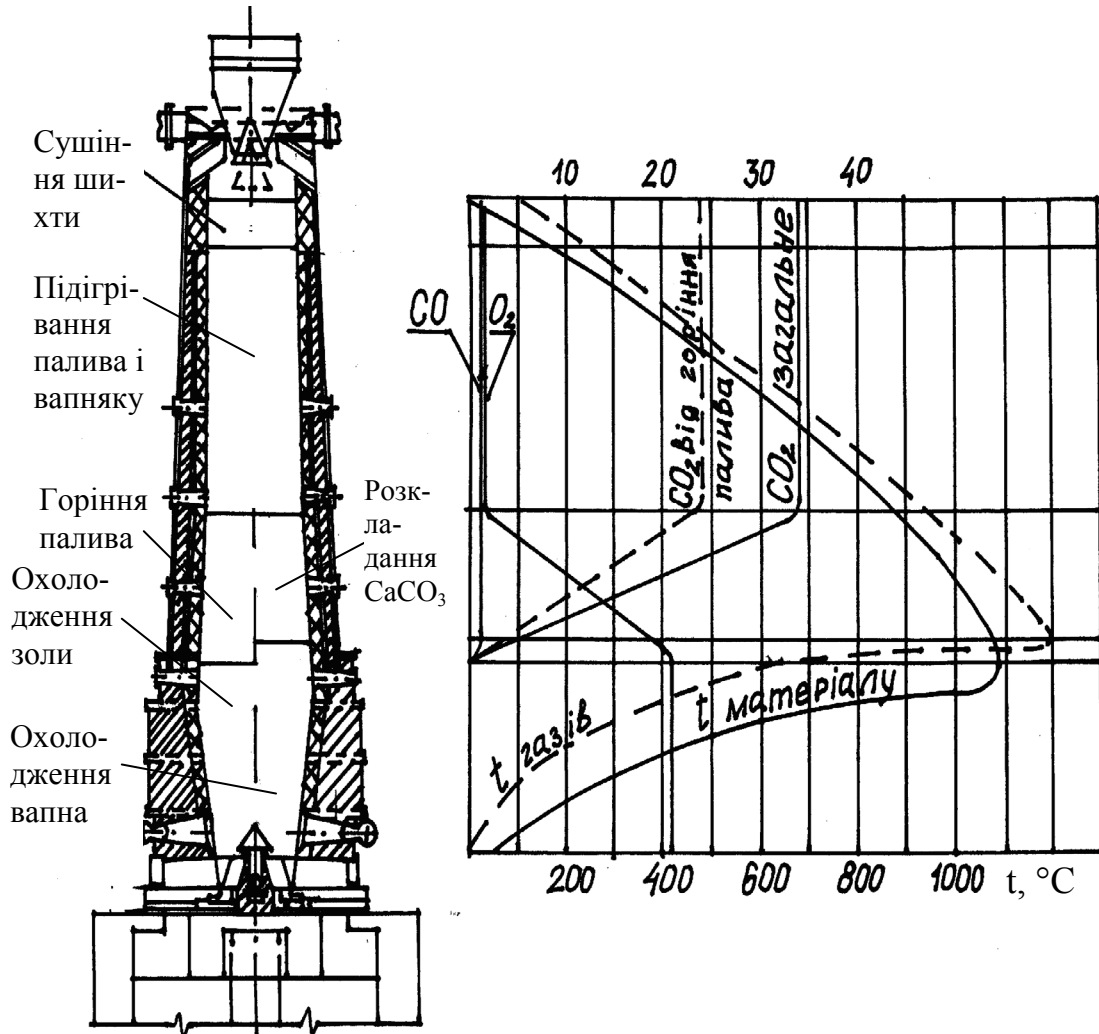


Рисунок 7.1 – Схема розташування зон зміни складу та температури газів по висоті печі

Принцип дії вапняково-випалювальної печі. Шихта (суміш палива та карбонатної сировини) завантажується у піч зверху (рис. 7.1) та під власною масою рухається вниз, а готове вапно безперервно вивантажується знизу печі. Матеріал по шахті проходить послідовно три технологічні зони: зону підігрівання, зону випалювання та зону охолодження. В зоні піді-

грівання з шихти випаровується волога, потім відбувається її нагрівання до 900 °С за рахунок теплоти газоподібних продуктів, які рухаються із зони випалювання. В зоні випалювання відбувається горіння палива та розкладання вапняку на вапно та вуглекислий газ за температури 1000...1200 °С. Зона випалювання розташована у середній частині шахти печі та займає 20...30% її корисної висоти, верхня межа зони випалювання, у якій розкладається вапняк, збігається з нижньою межею зони підігрівання. Знизу зона випалювання обмежена площиною, в якій зупиняється споживання теплоти на розкладання вапняку. В шахтній печі виділяють ще зону горіння, в якій виникає вигорання палива з утворенням двоокису вуглецю.

Продукти згорання палива та надлишок повітря, змішуючись з вуглекислим газом, що виділяється при розкладанні вапняку, утворюють пічний газ, який і надходить в зону підігрівання. В зоні охолодження температура вапна понижується; повітря, яке необхідне для згорання палива – надходить у піч знизу та, рухаючись уверх, нагрівається за рахунок теплоти вапна, а вапно охолоджується.

Зона підігрівання займає 45...55% корисної висоти шахти печі. Верхня межа зони підігрівання знаходиться на рівні відбору пічного газу, нижня – збігається з площиною, в якій температура вапна досягає температури його розкладання – 900 °С. В зоні підігрівання після підсушування шихти виділяються леткі речовини палива та відбувається підігрівання його до температури запалювання.

Послідовність розрахунку

1. На підставі матеріального балансу складається тепловий баланс I зони, за допомогою якого визначається витрата теплоти (палива) на отримання 1 кг СаО (зона I включає у себе зону випалювання та охолодження, а зона II – зону підігрівання).

2. Складається тепловий баланс II зони, за допомогою якого визначається температура пічного газу. При цьому можливі два варіанти: $t''_{п.г.} > t_n$ або $t''_{п.г.} < t_n$, де t_n – температура насичення водяної пари, яка відповідає їх парціальному тиску в пічному газі.

Якщо $t''_{п.г.} > t_n$, розрахунок закінчено. При $t''_{п.г.} < t_n$ водяна пара в складі пічних газів буде конденсуватися на виході з печі, тому задаються новим значенням $t'_{п.г.}$, збільшивши його на 10 °С, тобто беруть $t'_{п.г.} = 920$ °С та повторюють розрахунок, і так до тих пір (кожний раз, збільшуючи $t_{п.г.}$ на 10 °С), поки не отримають $t''_{п.г.} > t_n$. Після цього проводиться розрахунок за зонами – визначаються висоти зон підігрівання, випалювання та охолодження, а також діаметр печі.

Наведемо методику складання теплового та матеріального балансів вапняково-випалювальної печі на конкретному прикладі. Початкові дані для розрахунків:

1. Характеристика карбонатної сировини: склад в сухій сировині: карбонату кальцію $(CaCO_3)_{с.к.с.} = 95,4\%$; (с.к.с. – суха карбонатна сировина);

карбонату магнію $(\text{MgCO}_3)_{\text{к.к.с}} = 1,7\%$; вміст води в карбонатній сировині $(\text{H}_2\text{O})_{\text{н.к.с}} = 1\%$; розмір шматків карбонатної сировини максимальний $d_{\text{к.с.}}^{\text{max}} = 120$ мм; $d_{\text{к.с.}}^{\text{нас}} = 60$ мм; щільність насипна $\rho_{\text{к.с.}}^{\text{нас}} = 2000$ кг/м³, щільність об'ємна (здавана) $\rho_{\text{к.с.}}^{\text{об}} = 1000$ кг/м³;

2. Характеристика палива: елементарний склад палива за робочою масою $C^p = 83\%$; $H^p = 1\%$; $A^p = 12\%$; $W^p = 2\%$; $O^p = 1\%$; $S^p = 0,5\%$; $N^p = 0,5\%$; $\rho_{\text{пал}}^{\text{нас}} = 870$ кг/м³; $\rho_{\text{пал}}^{\text{об}} = 1380$ кг/м³;

3. Характеристика вапна: щільність насипна та об'ємна становлять: $\rho_{\text{в}}^{\text{нас}} = 1000$ кг/м³; $\rho_{\text{в}}^{\text{об}} = 2000$ кг/м³;

4. Технологічні показники печі: знімання вапна (100% CaO) з 1 м² поперечного перерізу шахти печі за годину, $M_{\text{CaO}} = 500$ кг/(м²·год); ступінь випалювання $\sigma = 94,8\%$; температура розкладання CaCO₃, $t_p = 900$ °C (вибирається орієнтовно); температура вивантаженого вапна $t''_{\text{в}} = 50$ °C; температура навколишнього середовища $t_{\text{н.с}} = 0$ °C; коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,1$; втрати теплоти від механічного недопалювання $q_4 = 4,9\%$; втрати теплоти від хімічного недопалювання $q_3 = 7,9\%$; втрати теплоти на навколишнє середовище $q_5 = 3\%$ від $Q_{\text{н}}^p$.

Матеріальний баланс I зони печі

Проектний розрахунок вапняково-випалювальної печі базується на законі зберігання маси матеріалів, які піддаються тепловій обробці, в результаті чого з вхідних матеріалів (вапняк, паливо, повітря) отримують продукти (вапно та пічний газ), які відрізняються від них властивостями. Матеріальні баланси окремих зон печі використовуються для встановлення норм витрат вапняку, виходу натурального вапна та пічного газу, а також для складання теплових балансів зон печі.

За тепловими балансами визначаються витрата палива та температура пічних газів на виході з печі. Дані теплового балансу дозволяють визначити ККД печі.

Розрахунок матеріальних балансів вапняково-випалювальної печі рекомендовано вести на 1 кг CaO; об'єм повітря та газів зведений до нормальних умов, тобто $t = 0$ °C, $P = 0,102$ МПа (760 мм рт. ст.).

Розв'язування

Теплота згорання палива, кДж/кг [8]:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^p &= 338 \cdot C^p + 1025 \cdot H^p - 108,5 \cdot (O^p - S^p) - 25 \cdot W^p = \\ &= 338 \cdot 83 + 1025 \cdot 1 - 108,5 \cdot (1 - 0,5) - 25 \cdot 2 = 28974,55. \end{aligned}$$

Залишки палива, що не згоріли, кг/кг CaO

$$\begin{aligned} a_{\text{п}} &= G_{\text{пал}}^p \cdot 10^{-2} [q_4 + (1 - q_4 \cdot 10^{-2}) (A^p + 0,5 \cdot S^p)] = \\ &= G_{\text{пал}}^p \cdot 10^{-2} [4,9 + (1 - 4,9 \cdot 10^{-2}) (12 + 0,5 \cdot 0,5)] = 0,17 \cdot G_{\text{пал}}^p, \end{aligned}$$

де $G_{\text{пал}}^{\text{P}}$ – питома витрата палива, кг/кг СаО.

Кількість вуглецю, що згорів в печі, на 1 кг палива, %

$$C_{\text{сп}}^{\text{P}} = (1 - q_4 \cdot 10^{-2}) (C^{\text{P}} - 1,5H^{\text{P}}) = (1 - 4,9 \cdot 10^{-2}) (83 - 1,5 \cdot 1) = 77,5065.$$

Питома витрата сухої карбонатної речовини

$$G_{\text{с.к.с.}} = 1,786 \cdot 10^4 / [(CaCO_3)_{\text{с.к.с.}} \cdot \delta] = 1,786 \cdot 10^4 / [95,4 \cdot 94,8] = 1,975.$$

Питома витрата натуральної карбонатної речовини

$$G_{\text{н.к.с.}} = G_{\text{с.к.с.}} / [1 - (H_2O)_{\text{н.к.с.}} \cdot 10^{-2}] = 1,975 / [1 - 1 \cdot 10^{-2}] = 1,995.$$

Питомий вихід натурального вапна, кг/кг СаО

$$\begin{aligned} G_{\text{н.в.}} &= G_{\text{с.к.с.}} [1 - 0,52 \cdot (MgCO_3)_{\text{с.к.с.}} \cdot 10^{-2} - 0,7857 + a_{\text{п}}] = \\ &= 1,975 \cdot [1 - 0,52 \cdot 1,7 \cdot 10^{-2}] - 0,7857 + 0,17 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} = 1,1717 + 0,17 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Кількість карбонатної сировини, що надходить в зону випалювання, кг/кг

$$\begin{aligned} G_{\text{н.в.}} &= G_{\text{с.к.с.}} [1 - 0,52 \cdot (MgCO_3)_{\text{с.к.с.}} \cdot 10^{-2}] = \\ &= 1,975 \cdot [1 - 0,52 \cdot 1,7 \cdot 10^{-2}] = 1,9574. \end{aligned}$$

Питома витрата палива, що надходить в зону випалювання, кг/кг СаО

$$\begin{aligned} G'_{\text{пал}} &= G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot (C^{\text{P}} - 1,5H^{\text{P}} + A^{\text{P}} + 0,5S^{\text{P}}) \cdot 10^{-2} = \\ &= G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot (83 - 1,5 \cdot 1 + 12 + 0,5 \cdot 0,5) \cdot 10^{-2} = 0,9375 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Питома витрата повітря, м³/кг

$$V_{\text{пов}} = 8,9 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot C_{\text{сп}}^{\text{P}} \cdot 10^{-2} \cdot \alpha = 8,9 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 77,5065 \cdot 10^{-2} \cdot 1,1 = 7,5879 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}.$$

Об'єм компонентів сухих пічних газів, які виходять із I зони печі на 1 кг СаО, м³/кг

Об'єм окису вуглецю, м³/кг

$$\begin{aligned} V'_{\text{CO}} &= 0,79 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot q_{\text{CO}} \cdot 10^{-6} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{P}} = 0,79 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 7,9 \cdot 10^{-6} \cdot 28974,55 = \\ &= 0,1808 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Об'єм вуглекислого газу, м³/кг

$$\begin{aligned} V'_{\text{CO}_2} &= 0,4 + 1,855 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot C_{\text{сп}}^{\text{P}} \cdot 10^{-2} - 0,79 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{P}} \cdot q_{\text{CO}} \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,4 + 1,855 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 77,5065 \cdot 10^{-2} - 0,79 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 28974,55 \cdot 7,9 \cdot 10^{-6} = \end{aligned}$$

$$= 0,4 + 1,2569 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}.$$

Об'єм кисню в пічному газі, м³/кг

$$\begin{aligned} V'_{\text{O}_2} &= 0,21 \cdot V_{\text{пов}} (\alpha - 1) / \alpha + 0,7 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot \text{O}^{\text{P}} \cdot 10^{-2} + 0,5 \cdot V'_{\text{CO}} = \\ &= 0,21 \cdot 7,5879 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot (1,1 - 1) / 1,1 + 0,7 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 1 \cdot 10^{-2} + 0,5 \cdot 0,1808 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Об'єм азоту в пічному газі, м³/кг

$$\begin{aligned} V'_{\text{N}_2} &= 0,79 \cdot V_{\text{пов}} + 0,8 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot \text{N}^{\text{P}} \cdot 10^{-2} = 0,79 \cdot 7,5879 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} + \\ &+ 0,8 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 0,5 \cdot 10^{-2} = 5,9944 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} + 0,004 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} = 5,9984 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Об'єми водню та метану в пічному газі беремо рівними нулю $V'_{\text{N}_2} = 0$, $V'_{\text{CN}_4} = 0$.

Об'єм сухого пічного газу, який виходить з I в II зону печі, м³/кг

$$\begin{aligned} V'_{\text{с.п.г}} &= \sum_{i=0}^n V_{\text{г}} = V'_{\text{CO}_2} + V'_{\text{CO}} + V'_{\text{O}_2} + V'_{\text{N}_2} + V'_{\text{CH}_4} + V'_{\text{H}_2} = 0,4 + 1,2569 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} + \\ &+ 0,1808 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} + 0,24226 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} + 5,9984 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} = 0,4 + 7,678 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Визначимо густини компонентів пічного газу за температури $t = 0$ °C [11], кДж/(м³·К):

$$\rho_{\text{CO}_2}^0 = 1,977; \rho_{\text{CO}}^0 = 1,25; \rho_{\text{N}_2}^0 = 1,429; \rho_{\text{O}_2}^0 = 1,257.$$

Витрата матеріалів та газоподібних продуктів з I зони печі

$$\begin{aligned} G'_{\text{вид}} &= G_{\text{н.в.}} + V'_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2}^0 + V'_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}}^0 + V'_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2}^0 + V'_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{O}_2}^0 = 1,1717 + \\ &+ 0,17 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} + (0,4 + 1,2569 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}) \cdot 1,977 + 0,1808 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 1,25 + \\ &+ 0,24226 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 1,429 + 5,9984 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 1,257 = 1,9625 + 10,7669 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Надходження матеріалів в першу зону печі:

$$\begin{aligned} G'_{\text{прих}} &= G'_{\text{к.с.}} + G_{\text{пал}}^{\text{P}} + V_{\text{пов}} \cdot \rho_{\text{пов}}^0 = 1,975 + G_{\text{пал}}^{\text{P}} + 7,5879 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \cdot 1,293 = \\ &= 1,975 + 10,748 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}. \end{aligned}$$

Перевірка матеріального балансу I зони печі

$$G'_{\text{прих}} = G'_{\text{вих}} = 1,9625 + 10,7669 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}} \approx 1,975 + 10,748 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{P}}.$$

Отже, витратна і приходна частина балансів майже однакові.

Тепловий баланс I зони печі

Температура карбонатної сировини та палива, що надходить в I зону з II зони печі, береться $t''_{\text{к.с.}} = t_p = 900 \text{ }^\circ\text{C}$, $t''_{\text{пал.}} = t''_{\text{к.с.}} = t_p = 900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Питома теплоємність карбонатної сировини та палива при $t''_{\text{к.с.}} = t''_{\text{п.}}$

$$C_{\text{CaCO}_3} = 1,11 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)} [11].$$

Температура повітря, що надходить в I зону печі, береться $t'_{\text{пов.}} = t_{\text{нс}} = 0$.

Питома теплоємність повітря при $t''_{\text{п.}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ – $C'_{\text{пов.}} = 1,297 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{K)}$ (додаток А).

Температура пічного газу, що виходить з I в II зону печі (на межі зон випалювання і підігрівання), береться $t_p + 10 = 900 + 10 = 910 \text{ }^\circ\text{C}$

$$t'_{\text{пг.}} = t_p + 10 = 900 + 10 = 910.$$

Питома теплоємність компонентів пічного газу при $t''_{\text{пг.}} = 910 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{кДж/(м}^3\cdot\text{K)}$ (додаток А).

$$C'_{\text{CO}_2} = 2,17; C'_{\text{CO}} = 1,4; C'_{\text{N}_2} = 1,39.$$

Фізична теплота, яка вноситься підігрітою карбонатною сировиною в I зону із II зони, кДж/кг :

$$Q'_{\text{к.с.}}{}^\phi = G'_{\text{к.с.}} \cdot c_{\text{CaCO}_3} \cdot t''_{\text{к.с.}} = 1,9574 \cdot 1,11 \cdot 900 = 1955,4.$$

Фізична теплота з підігрітим паливом, кДж/кг

$$Q'_{\text{пал.}}{}^\phi = G'_{\text{пал.}} \cdot C''_{\text{пал.}} \cdot t''_{\text{пал.}} = 0,9375 \cdot G_{\text{пал.}}^{\text{p}} \cdot 1,47 \cdot 900 = 1240 \cdot G_{\text{пал.}}^{\text{p}}.$$

Фізична теплота, яка надходить в I зону з повітрям, кДж/кг

$$Q'_{\text{пов.}} = V_{\text{пов.}} \cdot C'_{\text{пов.}} \cdot t'_{\text{пов.}} = 0.$$

Хімічна теплота палива, кДж/кг

$$Q_{\text{пал.}}^{\text{x}} = G_{\text{пал.}}^{\text{p}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{p}} = G_{\text{пал.}}^{\text{p}} \cdot 28974,55.$$

Надходження теплоти в I зону печі

$$\begin{aligned} Q'_{\text{надх}} &= Q'_{\text{к.с.}}{}^\phi + Q_{\text{пал.}}^{\text{x}} + Q'_{\text{пал.}}{}^\phi + Q'_{\text{пов.}} = 1955,4 + G_{\text{пал.}}^{\text{p}} \cdot 28974,55 + 1240 \cdot G_{\text{пал.}}^{\text{p}} + 0 = \\ &= 30214,55 \cdot G_{\text{пал.}}^{\text{p}} + 1955,4. \end{aligned}$$

Втрати теплоти з I зони печі

Втрати теплоти з хімічним недопалюванням, кДж/кг

$$Q_{\text{хім}} = G_{\text{пал}}^p \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot q_3 \cdot 10^{-2} = G_{\text{пал}}^p \cdot 28974,55 \cdot 7,9 \cdot 10^{-2} = 2288,99 \cdot G_{\text{пал}}^p .$$

Втрати теплоти на дисоціацію CaCO_3 за рекомендаціями [11, 12] становить $Q_{\text{CaCO}_3} = 3184$ кДж.

Втрати теплоти з механічним недопалом, кДж/кг

$$Q_{\text{мех.}} = G_{\text{пал}}^p \cdot Q_{\text{н}}^p \cdot q_4 \cdot 10^{-2} = G_{\text{пал}}^p \cdot 28974,55 \cdot 4,9 \cdot 10^{-2} = 1419,753 \cdot G_{\text{пал}}^p .$$

Втрати теплоти з вивантаженням вапном, кДж/кг

$$Q_{\text{н.в.}} = G_{\text{н.в.}} \cdot c''_{\text{в}} \cdot t''_{\text{в}} = (1,1717 + 0,17 \cdot G_{\text{пал}}^p) \cdot 0,79 \cdot 50 = 46,282 + 6,715 \cdot G_{\text{пал}}^p ,$$

де теплоємність вапна при температурі $50 \text{ }^\circ\text{C}$ – $c''_{\text{в}} = 0,79$ кДж/(кг·К) [11].

Теплота сухого пічного газу, який надходить з I зони в II зону печі, кДж/кг

$$\begin{aligned} Q'_{\text{с.п.г}} &= (V'_{\text{CO}_2} \cdot C'_{\text{CO}_2} + V'_{\text{CO}} \cdot C'_{\text{CO}} + V'_{\text{O}_2} \cdot C'_{\text{O}_2} + V'_{\text{N}_2} \cdot C'_{\text{N}_2} + V'_{\text{H}_2} \cdot C'_{\text{H}_2} + \\ &+ V'_{\text{CH}_4} \cdot C'_{\text{CH}_4}) t'_{\text{п.г}} = ((0,4 + 1,2569 \cdot G_{\text{пал}}^p) \cdot 2,17 + 0,1808 \cdot G_{\text{пал}}^p \cdot 1,4 + \\ &+ 0,24226 \cdot G_{\text{пал}}^p \cdot 1,46 + 5,9984 \cdot G_{\text{пал}}^p \cdot 1,39) \times 910 = 10621 \cdot G_{\text{пал}}^p + 789,88 . \end{aligned}$$

Втрати теплоти в навколишнє середовище для I зони печі, кДж/кг

$$Q_{\text{навк.с.}} = q_5 \cdot 10^{-2} \cdot G_{\text{пал}}^p \cdot Q_{\text{н}}^p = 3 \cdot 10^{-2} \cdot G_{\text{пал}}^p \cdot 28974,55 = 869,2365 \cdot G_{\text{пал}}^p .$$

Втрати теплоти з леткими речовинами, кДж/кг

$$\begin{aligned} Q_{\text{лет}} &= G_{\text{пал}}^p \cdot (1634 \cdot H^p + 45,7 \cdot S^p) = G_{\text{пал}}^p (1634 \cdot 1 + 45,7 \cdot 0,5) = \\ &= 1657,75 \cdot G_{\text{пал}}^p . \end{aligned}$$

Втрати теплоти в I зоні печі, кДж/кг

$$\begin{aligned} Q'_{\text{втр}} &= Q_{\text{CaCO}_3} + Q_{\text{мех}} + Q_{\text{хім}} + Q_{\text{н.в.}} + Q_{\text{с.п.г}} + Q_{\text{навк.с.}} + Q_{\text{лет}} = 3184 + \\ &+ 1419,753 \cdot G_{\text{пал}}^p + 2288,99 \cdot G_{\text{пал}}^p + 46,282 + 6,715 \cdot G_{\text{пал}}^p + 10621 \cdot G_{\text{пал}}^p + \\ &+ 789,88 + 869,2365 \cdot G_{\text{пал}}^p + 1657,75 \cdot G_{\text{пал}}^p = 16863,4 \cdot G_{\text{пал}}^p + 4020,162 . \end{aligned}$$

Прирівнюючи $Q'_{\text{втр}} = Q'_{\text{надх}}$, знаходимо питому витрату палива, кг/кг СаО

$$G_{\text{пал}}^p = 0,15465 .$$

Матеріальний баланс другої зони печі

Частину складових матеріального балансу II зони печі беремо із матеріального балансу I зони печі. Визначимо відсутні складові балансу II зони печі.

Об'єм газів, який не змінюється при проходженні II зони, м³/кг СаО:

$$V''_{CO} = V'_{CO} = 0,1808 \cdot 0,15465 = 0,15465;$$

$$V''_{O_2} = V'_{O_2} = 0,24226 \cdot 0,15465 = 0,0375;$$

$$V''_{N_2} = V'_{N_2} = 5,9984 \cdot 0,15465 = 0,9276;$$

$$V'_{CO_2} = 0,4 + 1,2569 \cdot G_{пал}^P = 0,4 + 1,2569 \cdot 0,15465 = 0,5944.$$

Надходження матеріалів та газоподібних продуктів в II зону печі, кг/кг

$$\begin{aligned} G''_{прих} &= G_{нкс} + G_{пал}^P + V'_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2}^0 + V'_{CO} \cdot \rho_{CO}^0 + V'_{O_2} \cdot \rho_{O_2}^0 + V'_{N_2} \cdot \rho_{N_2}^0 = \\ &= 1,995 + 0,15465 + 0,5944 \cdot 1,977 + 0,15465 \cdot 1,25 + 0,0375 \cdot 1,429 + \\ &\quad + 0,9276 \cdot 1,251 = 4,73195. \end{aligned}$$

Витрата матеріалів та газоподібних продуктів з другої зони печі

Питома витрата карбонатної сировини, яка надходить з I в II зону печі
 $G'_{к.с} = 1,9574$ кг/кг.

Питома витрата палива, яка надходить з I в II зону печі, кг/кг СаО

$$G'_{пал} = 0,9375 \cdot G_{пал}^P = 0,9375 \cdot 0,15465 = 0,14498.$$

Вихід пічного газу з другої зони печі

Об'єм вуглекислого газу V''_{CO_2} складається з об'єму вуглекислого газу, що надходить із зони I в зону II, а також з газу, який виділяється в зоні II під час розкладання $MgCO_3$ у кількості, м³/кг

$$V_{CO_2}^{розкл} = 0,265 \cdot (MgCO_3)_{с.к.с.} \cdot 10^{-2} \cdot G_{с.к.с.}$$

тоді

$$\begin{aligned} V''_{CO_2} &= V'_{CO_2} + 0,265 \cdot (MgCO_3)_{с.к.с.} \cdot 10^{-2} \cdot G_{с.к.с.} = \\ &= 0,5944 + 0,265 \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} \cdot 1,975 = 0,6033. \end{aligned}$$

Об'єм водяної пари, що виходить із зони II, складається з об'єму водяної пари із палива та з карбонатної сировини, м³/кг

$$V''_{в.п.} = 1,244 \cdot (G_{пал}^P \cdot W^P + G_{н.к.с.} \cdot (H_2O)_{н.к.с.}) \cdot 10^{-2} =$$

$$= 1,244 \cdot (0,15465 \cdot 2 + 1,995 \cdot 1) \cdot 10^{-2} = 0,0287.$$

Витрата матеріалів та газоподібних продуктів з II зони печі, кг/кг

$$G''_{\text{витр.}} = G'_{\text{к.с.}} + G'_{\text{пал}} + V''_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2}^{\circ} + V''_{\text{CO}} \cdot \rho_{\text{CO}}^{\circ} + V''_{\text{O}_2} \cdot \rho_{\text{O}_2}^{\circ} + V''_{\text{N}_2} \cdot \rho_{\text{N}_2}^{\circ} + \\ + V''_{\text{H}_2} \cdot \rho_{\text{H}_2}^{\circ} + V''_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4}^{\circ} + V''_{\text{в.п.}} \cdot \rho_{\text{в.п.}}^{\circ},$$

$$G''_{\text{витр.}} = 1,9574 + 0,14498 + 1,1927 + 0,1933 + 0,0536 + 1,16043 + 0,023 = \\ = 4,7254.$$

Перевірка матеріального балансу другої зони печі

$$\Delta = \frac{G''_{\text{прих}} - G''_{\text{витр.}}}{G''_{\text{прих}}} \cdot 100 = \frac{4,73195 - 4,7254}{4,73195} \cdot 100 = 0,14\%.$$

Тепловий баланс другої зони печі

Рівняння теплового балансу II зони (на підставі матеріального балансу):

$$Q''_{\text{к.с.}}^{\phi} + Q''_{\text{пал}}^{\phi} + Q'_{\text{с.п.г.}} + Q'_{\text{в.п.}} + Q_{\text{хім}} + Q_{\text{лет}} = Q'_{\text{к.с.}}^{\phi} + Q'_{\text{пал}}^{\phi} + \\ + Q''_{\text{с.п.г.}} + Q''_{\text{в.п.}} + Q_{\text{хім}} + Q_{\text{лет}} + Q_{\text{MgCO}_3} + Q''_{\text{н.с.}}$$

Надходження теплоти. Фізична теплота, яка вноситься карбонатною сировиною, що надходить в II зону, кДж/кг

$$Q''_{\text{к.с.}}^{\phi} = G_{\text{н.к.с.}} \cdot c_{\text{CaCO}_3} \cdot t'_{\text{к.с.}} = 0.$$

В проектних розрахунках можна брати $t'_{\text{к.с.}} = t_{\text{н.с.}} = 0$, тому $Q''_{\text{к.с.}}^{\phi} = 0$.

Фізична теплота палива, що надходить в II зону, кДж/кг

$$Q'_{\text{пал}}^{\phi} = G_{\text{пал}}^{\text{р}} \cdot c_{\text{пал}} \cdot t'_{\text{пал}} = 0.$$

Тут також вибрано $t'_{\text{пал}} = t_{\text{н.с.}} = 0$.

Теплота сухих пічних газів, що надходять в II зону з I зони $Q'_{\text{с.п.г.}}$, визначається за формулою, кДж/кг

$$Q'_{\text{с.п.г.}} = 10621 \cdot G_{\text{пал}}^{\text{р}} + 789,88 = 10621 \cdot 0,15465 + 789,88 = 2432,42.$$

Оскільки $Q_{\text{хім}}$ та $Q_{\text{лет}}$ входять в праву та ліву частину теплового балансу другої зони печі, то їх можна повністю усунути. Тому рівняння теплового балансу має вигляд

$$Q'_{\text{с.п.г.}} = Q'_{\text{к.с.}}^{\phi} + Q'_{\text{пал}}^{\phi} + Q''_{\text{с.п.г.}} + Q''_{\text{в.п.}} + Q_{\text{MgCO}_3} + Q''_{\text{н.с.}}$$

Витрати теплоти. Фізична теплота, що вноситься з підігрітою карбонатною сировиною з другої зони в першу, кДж/кг

$$Q'_{\text{к.с.}} = G'_{\text{к.с.}} \cdot c_{\text{CaCO}_3} \cdot t''_{\text{к.с.}} = 1,9574 \cdot 1,1 \cdot 900 = 1937,8.$$

Фізична теплота, що виноситься з підігрітим паливом з другої зони в першу, кДж/кг

$$Q''_{\text{пал}} = G'_{\text{пал}} \cdot c_{\text{пал}} \cdot t''_{\text{пал}} = 0,9375 \cdot 0,15465 \cdot 1,43 \cdot 900 = 186,595.$$

Витрата теплоти на дисоціацію MgCO_3 , кДж/кг:

$$Q_{\text{MgCO}_3} = 1144 \cdot G_{\text{с.к.с.}} \cdot (\text{MgCO}_3)_{\text{с.к.с.}} \cdot 10^{-2} = 1144 \cdot 1,975 \cdot 1,7 \cdot 10^{-2} = 38,41.$$

Теплота водяної пари, що виходить з другої зони, кДж/кг

$$\begin{aligned} Q''_{\text{в.п.}} &= V''_{\text{в.п.}} \cdot (2493 + c''_{\text{H}_2\text{O}} \cdot t''_{\text{п.г.}}) = 0,0287 \cdot (2493 + 1,505 \cdot t''_{\text{п.г.}}) = \\ &= 71,549 + 0,0432 \cdot t''_{\text{п.г.}}. \end{aligned}$$

Теплота сухих пічних газів, що виходять із зони II печі, кДж/кг

$$\begin{aligned} Q''_{\text{с.п.г.}} &= (V''_{\text{CO}_2} \cdot C''_{\text{CO}_2} + V''_{\text{CO}} \cdot C''_{\text{CO}} + V''_{\text{O}_2} \cdot C''_{\text{O}_2} + V''_{\text{N}_2} \cdot C''_{\text{N}_2}) \cdot t''_{\text{п.г.}} = \\ &= (0,6033 \cdot 1,7 + 0,15465 \cdot 1,302 + 0,0375 \cdot 1,318 + 0,9276 \cdot 1,3) \cdot t''_{\text{п.г.}} = \\ &= 2,4823 \cdot t''_{\text{п.г.}}, \end{aligned}$$

де теплоємності газів C''_{CO_2} , C''_{CO} , C''_{O_2} , C''_{N_2} беремо при температурі $t''_{\text{п.г.}} = 100$ °С (попередньо задаємось) з додатка А.

Втрати теплоти у навколишнє середовище беремо $Q''_{\text{н.с.}} = 40$ кДж (на підставі дослідних даних [12]).

Витрати теплоти, кДж/кг:

$$\begin{aligned} 1937,8 + 186,595 + 2,4823 \cdot t''_{\text{п.г.}} + 71,549 + 0,0432 \cdot t''_{\text{п.г.}} + 38,41 + 40 = \\ = 2274,254 + 2,5255 \cdot t''_{\text{п.г.}}. \end{aligned}$$

Прирівнюємо статті надходження та витрати теплоти

$$2432,42 = 2274,254 + 2,5255 \cdot t''_{\text{п.г.}}$$

і знаходимо температуру пічних газів на виході з печі $t''_{\text{п.г.}} = 63$ °С.

За рекомендаціями [12], якщо $t''_{\text{п.г.}}$ розрахована на підставі теплового балансу, відрізняється від прийнятої не більше як на 50...80 °С, то значення питомих теплоємностей не уточнюється. Якщо різниця становить

100 °С і більше, то задаються значеннями питомих теплоємностей для розрахованого значення $t''_{п.г.}$ та повторюють розрахунок.

Розрахована таким чином температура відхідних пічних газів повинна бути більша за температуру насичення водяної пари $t''_н$.

Вологовміст пічного газу на виході з печі, кг/кг

$$d_{п.г.} = 0,5 \cdot \frac{V''_{в.п.}}{V''_{с.п.г.}} = 0,5 \cdot \frac{0,0287}{0,6033 + 0,15465 + 0,0375 + 0,9276} = 0,00839.$$

Парціальний тиск, Па

$$P_{в.п.} = P_{п.г.} \cdot d_{п.г.} / (0,622 + d_{п.г.}) = 10^5 \cdot 0,00833 / (0,622 + 0,00833) = 1321,5.$$

За відповідними таблицями [12] визначаємо температуру насичення водяної пари $t''_н = 11,2$ °С. Оскільки $t''_{п.г.} > t''_н$, то розрахунок завершено. Якщо $t''_{п.г.} < t''_н$ – задаються новим значенням $t'_{п.г.}$, збільшивши його на 10 °С, тобто беруть $t'_{п.г.} = 920$ °С та повторюють розрахунок, і так до того часу (кожен раз збільшуючи $t'_{п.г.}$ на 10 °С), поки не отримують $t''_{п.г.} > t''_н$.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Щукин А. А. Промышленные печи и газовое хозяйство заводов / Щукин А. А. – М. : Энергия, 1973. – 224 с.
2. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики) : справочное издание / Винтовкин А. А., Ладыгин М. Г., Гусовский В. Л. – М. : Машиностроение, 2001. – 496 с.
3. Маслов В. А. Топливосжигающие и теплогенерирующие устройства / Маслов В. А. – Мариуполь : ПДТУ, 2002. – 224 с.
4. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки. Ч. 1. : підручник / Ткаченко О. О. – [2-ге вид.]. – Х. : "Ранок", 2008. – 336 с.
5. Ткаченко О. О. Високотемпературні процеси та установки. Ч. 2. : підручник / Ткаченко О. О. – [2-ге вид.]. – Х. : "Ранок", 2008. – 160 с.
6. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : справочник / [А. М. Бакластов, В. М. Бродянский, Б. П. Голубев и др.]; под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина.– М. : Энергоатомиздат, 1983. – 552 с.
7. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.
8. Тепло- і масообмінні апарати і установки промислових підприємств. Ч.1 / [за ред. Б. О. Левченко]. – Харків : ХДПУ, 1999. – 420 с.
9. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – [Изд. 3-е перераб. и доп.] – СПб. : Изд. НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
10. Исламов М. Ш. Проектирование и эксплуатация промышленных печей / Исламов М. Ш. – Л. : Химия, 1986. – 280 с.
11. Табунщиков Н. П. Производство извести / Табунщиков Н. П. – М. : Химия, 1974. – 240 с.
12. Ларюшкін Є. П. Промислові печі та пічне устаткування / Ларюшкін Є. П. – Вінниця : ВДТУ, 2001 – 106 с.
13. Котлы утилизаторы и котлы энерготехнологические: [отраслевой каталог]. – М. : НИИЭИНФОРМЭНЕРГОМАШ, 1985. – 83 с.
14. Безгрешнов А. Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах / А. Н. Безгрешнов, Ю. М. Ликов. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 246 с.
15. Титар С. С. Задачник з основ теплоенергетики / Титар С. С. – Одеса, 1998. – 142 с.

Додаток А

Таблиця А.1 – Середні ізобарні теплоємності газів при атмосферному тиску 0,101 МПа (760 мм рт. ст.), кДж/(м³·К).

t ₀ , С	CO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O	Сухе повітря	CO	H ₂	CH ₄	SO ₂
0	1,5998	1,2946	1,3059	1,4943	1,2971	1,2992	1,2766	1,55	1,733
100	1,7002	1,2958	1,3176	1,5052	1,3004	1,3017	1,2908	1,6421	1,813
200	1,7873	1,2996	1,3352	1,5223	1,3071	1,3071	1,2971	1,7589	1,888
300	1,8627	1,3067	1,3561	1,5424	1,3172	1,3167	1,2992	1,8862	1,955
400	1,9296	1,3163	1,3775	1,5654	1,3289	1,3289	1,3021	2,0155	2,018
500	1,9887	1,3276	1,3980	1,5897	1,3427	1,3427	1,3050	2,1403	2,068
600	2,0411	1,3402	1,4168	1,6148	1,3565	1,3574	1,3080	2,2609	2,114
700	2,0883	1,3536	1,4344	1,6412	1,3708	1,3720	1,3121	2,3768	2,152
800	2,1311	1,3670	1,4499	1,6680	1,3842	1,3862	1,3167	2,4941	2,181
900	2,1692	1,3796	1,4645	1,6957	1,3976	1,3996	1,3226	2,6025	2,215
1000	2,2035	1,3917	1,4775	1,7229	1,4097	1,4126	1,3289	2,6992	2,236
1100	2,2349	1,4034	1,4892	1,7501	1,4214	1,4248	1,336	2,7863	2,261
1200	2,2638	1,4143	1,5005	1,7769	1,4327	1,4361	1,3431	2,8629	2,278
1300	2,2898	1,4252	1,5106	1,8028	1,4432	1,4465	1,3511	–	2,295
1400	2,3136	1,4348	1,5202	1,8280	1,4528	1,4566	1,3590	–	–
1500	2,3354	1,444	1,5294	1,8527	1,4620	1,4658	1,3674	–	–
1600	2,3555	1,4528	1,5378	1,8761	1,4708	1,4746	1,3754	–	–
1700	2,3743	1,4612	1,5462	1,8996	1,4788	1,4825	1,3833	–	–
1800	2,3915	1,4687	1,5541	1,9213	1,4867	1,4901	1,3917	–	–
1900	2,4074	1,4758	1,5617	1,9423	1,4939	1,4972	1,3996	–	–
2000	2,4221	1,4825	1,5692	1,9628	1,5010	1,5039	1,4076	–	–
2100	2,4359	1,4892	1,5759	1,9824	1,5072	1,5102	1,4185	–	–
2200	2,4484	1,4951	1,5830	2,0009	1,5135	1,5160	1,4227	–	–
2300	2,4602	1,5010	1,5897	2,0189	1,5194	1,5215	1,4302	–	–
2400	2,4710	1,5064	1,5964	2,0365	1,5253	1,5269	1,4373	–	–
2500	2,4811	1,5114	1,6027	2,0528	1,5303	1,5320	1,4449	–	–

Додаток Б

Таблиця Б.1 – Середня \bar{c}_p в інтервалі температур $0...t$, °С та справжня c_p теплоємності заліза та деяких відпалених вуглецевих сталей, Дж/(кг·К)

Температура, °С	Теплоємність	Чисте залізо	Марка сталі							
			08	15	20	35	40	45	У8	У12
50	\bar{c}_p	453	476	452	483	456	483	452	444	444
	c_p	456	482	465	486	465	486	469	469	461
100	\bar{c}_p	463	482	465	486	469	486	473	477	469
	c_p	477	494	486	494	490	494	490	498	481
200	\bar{c}_p	481	498	486	498	490	497	494	511	503
	c_p	523	532	532	528	532	523	536	544	536
300	\bar{c}_p	503	514	515	514	511	512	515	528	519
	c_p	568	565	578	565	569	561	569	578	569
400	\bar{c}_p	524	533	532	533	532	529	536	548	536
	c_p	603	611	620	611	611	599	611	624	611
500	\bar{c}_p	546	555	565	555	553	550	553	565	553
	c_p	666	682	687	682	666	670	657	662	649
600	\bar{c}_p	573	584	586	584	578	574	578	594	720
	c_p	754	770	774	770	754	720	729	779	733
700	\bar{c}_p	611	626	620	636	611	628	611	624	611
	c_p	921	857	942	845	913	809	884	900	892
750	\bar{c}_p	636	653	666	670	695	678	700	745	708
	c_p	1130	1123	1528	1430	1319	1700	1476	837	1025
800	\bar{c}_p	663	695	691	703	708	674	720	724	712
	c_p	795	875	963	842	837	561	670	666	687
900	\bar{c}_p	672	703	708	703	699	657	703	724	703
	c_p	661	745	670	649	574	586	582	653	704
1000	\bar{c}_p	678	695	–	695	–	653	–	703	699
	c_p	628	666	–	649	–	628	628	636	692
1100	\bar{c}_p	666	695	–	691	–	649	–	669	695
1200	\bar{c}_p	666	687	–	687	–	649	–	695	691
1300	\bar{c}_p	662	687	–	687	–	653	–	695	687

Додаток В
Таблиця В.1 – Теплопровідність відпалених вуглецевих сталей λ ,
Вт/(м·К)

Температура, °С	Марка сталі								
	08	10	15	20	35	40	45	У8	У12
	Температура відпалу, °С								
	930	930	900	930	850	860	860	800	800
0	65,1	59,5	52,3	51,9	47,9	51,9	48,1	50,4	45,2
50	62,8	58,6	53,2	51,5	48,8	51,5	48,1	49,8	45,2
100	60,2	57,7	53,4	51	49,4	50,6	48,1	48,6	44,8
150	57,7	55,2	53,6	49,9	49,3	49,8	47,7	47,3	43,4
200	55,6	53,5	53,3	48,5	49,1	48,1	46,5	45,6	42,7
250	53	51,5	51,6	46,5	48	46,9	45,1	43,5	41
300	50,9	49,4	49,3	44,4	46,5	45,6	44	41,6	40,2
350	48,5	47,7	47,6	43,6	45	44,3	43	40,2	38,5
400	46,5	44,8	46	42,7	43,7	41,9	41	38,3	37,2
450	43,5	42,3	44,3	41	42	40	39,8	36,6	36
500	41	40,2	42,8	39,3	40,6	38,1	38,5	35,4	34,6
550	39,4	38,1	41	37,7	39,3	36	36,9	34,2	33,5
600	37,4	36	39,1	35,6	37,9	33,5	36	33	32
650	36	34	37,4	33,9	36,3	32	33,6	31,7	30
700	34	31,9	35,7	31,9	34,8	30	31,4	30,4	28,3
750	31,9	29,8	33,7	28,5	30	27	28,5	27,1	27
800	30,1	28,5	32,1	25,9	28,6	24,8	26,7	24,3	23,7
850	27,7	27,2	29,8	25,9	28,1	24,8	25,5	24,3	23,7
900	27,2	26,7	29,5	26,4	28	25,7	25,9	25,4	24,8
950	27,2	27,2	29,1	27,2	–	26	25,9	26,2	25,7
1000	27,7	27,7	28,8	27,7	–	26,9	26,7	26,9	26
1050	28	28	–	28	–	27,2	27,2	27,7	26,9
1100	28,5	28,5	–	28,5	–	28	28	28,6	27,2
1150	29,3	29,3	–	29,3	–	28,7	29	29	28
1200	29,8	29,8	–	29,8	–	29,5	29,8	29,8	28,6

Додаток Г
Таблиця Г.1 – Температуропровідність деяких відпалених вуглецевих сталей $\alpha \cdot 10^5, \text{ м}^2/\text{с}$

Температура, °С	Чисте залізо	Марка сталі								
		08	10	15	20	35	40	45	У8	У12
0	2,2	–	–	1,5	–	1,39	–	1,33	1,28	–
50	2	–	–	1,42	–	1,33	–	1,28	1,25	–
100	1,83	1,56	1,49	1,39	1,32	1,3	1,3	1,25	1,19	1,15
200	1,54	1,35	1,29	1,25	1,18	1,19	1,18	1,14	1,08	1,03
300	1,29	1,16	1,14	1,11	1,03	1,06	1,05	1,03	0,972	0,917
400	1,08	0,987	0,958	0,972	0,889	0,917	0,902	0,889	0,833	0,792
500	0,87	0,791	0,764	0,805	0,75	0,805	0,736	0,778	0,75	0,694
600	0,69	0,639	0,611	0,667	0,614	0,667	0,611	0,639	0,583	0,583
650	0,59	0,569	0,541	0,583	0,541	0,583	0,555	0,556	0,556	0,528
700	0,52	0,459	0,43	0,5	0,43	0,5	0,389	0,5	0,472	0,421
750	0,37	0,431	0,375	0,36	0,375	0,306	0,403	0,222	0,444	0,346
800	0,48	0,472	0,403	0,444	0,431	0,444	0,528	0,5	0,528	0,528
850	0,53	0,444	0,43	0,417	0,5	0,639	0,514	–	0,556	0,528
900	0,62	0,472	0,486	0,583	0,528	0,639	0,528	–	–	0,528
950	0,66	0,528	0,542	–	0,542	–	0,542	–	–	0,542
1000	0,66	0,542	0,556	–	0,57	–	0,556	–	–	0,556
1050	0,67	0,556	0,57	–	0,57	–	0,57	–	–	0,57

Додаток Д
Таблиця Д.1 – Густина деяких відпалених вуглецевих сталей $\rho, \text{ кг/м}^3$

Температура, °С	Марка сталі								
	08	10	15	20	35	45	У8	У9	У12
20	7871	7856	7850	7859	7826	7826	7839	7745	7830
100	7846	7832	7827	7834	7804	7799	7817	7726	7809
200	7814	7800	7794	7803	7771	7769	7786	7717	7781
300	7781	7765	7759	7770	7737	7735	7752	7690	7749
400	7445	7730	7724	7736	7700	7698	7714	7686	7713
500	7708	7692	7687	7699	7662	7662	7676	7655	7675
600	7668	7653	7648	7659	7623	7625	7638	7622	7634
700	7628	7613	7611	7617	7583	7587	7600	7586	7592
800	7598	7582	7599	7624	7600	7595	7852	7568	7565
900	7602	7594	7584	7600	7549	–	–	7523	7489

Додаток Е

Таблиця Е.1 – Фізичні параметри димових газів при атмосферному тиску (0,101 МПа, CO₂ = 13%; H₂O = 11%; N₂ = 76%)

T, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(м ³ ·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^4$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,295	1,3562	2,28	0,169	12,2	0,72
100	0,95	1,3712	3,129	0,308	21,54	0,69
200	0,748	1,3875	4,012	0,489	32,8	0,67
300	0,617	1,4054	4,838	0,699	45,81	0,65
400	0,525	1,4234	5,699	0,943	60,38	0,64
500	0,457	1,4424	6,559	1,211	76,3	0,63
600	0,405	1,4615	7,42	1,509	93,61	0,62
700	0,363	1,4807	8,268	1,838	112,1	0,61
800	0,33	1,4994	9,153	2,197	131,8	0,6
900	0,301	1,517	10,013	2,58	152,5	0,59
1000	0,275	1,5337	10,897	3,034	174,3	0,58
1100	0,257	1,5496	11,746	3,455	197,1	0,57
1200	0,24	1,5646	12,619	3,924	221	0,56

Додаток Ж

Таблиця Ж.1 – Фізичні параметри сухого повітря при атмосферному тиску (0,101 МПа)

T, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(м ³ ·К)	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$a \cdot 10^4$, м ² /с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
0	1,293	1,2971	2,442	0,188	13,28	0,707
50	1,093	1,2988	2,826	0,257	177,95	0,698
100	0,946	1,3004	3,21	0,336	23,13	0,688
150	0,846	1,3038	3,559	0,421	28,99	0,684
200	0,74	1,3071	3,931	0,514	34,85	0,68
250	0,674	1,3122	4,268	0,61	40,61	0,677
300	0,615	1,3172	4,605	0,716	48,33	0,674
350	0,566	1,3231	4,908	0,819	55,46	0,676
400	0,524	1,3289	5,21	0,931	63,09	0,678
500	0,456	1,3427	5,745	1,153	79,38	0,687
600	0,404	1,3565	6,222	1,383	96,89	0,699
700	0,362	1,3708	6,71	1,634	115,4	0,706
800	0,329	1,3842	7,176	1,887	134,8	0,713
900	0,301	1,3976	7,629	2,162	155,1	0,717
1000	0,277	1,4097	8,071	2,459	177,1	0,719
1100	0,257	1,4214	8,502	2,763	199,3	0,722

Навчальне видання

Методичні вказівки
до виконання самостійної та контрольної робіт
з дисципліни "Високотемпературні процеси та установки"

Редактор В. Дружиніна
Коректор З. Поліщук
Укладач Боднар Лілія Анатоліївна

Оригінал-макет підготовлено Л. Боднар

Підписано до друку 10.05.2017 р.
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк. 3,45.
Наклад 40 пр. Зам. № 2017-093.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.

ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 59-85-32, 59-87-38.
press.vntu.edu.ua; e-mail: kivc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.