

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи
з дисципліни «Теплотехніка»
(для студентів спеціальності
«Металургія чорних металів»)

2010

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ УЧБОВИЙ ЗАКЛАД**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до курсової роботи

по дисципліні «Теплотехніка»

(для студентів спеціальності 6.050401

«Металургія чорних металів»)

Розглянуто

на засіданні кафедри

«Технічна теплофізика»

Протокол № 2 від 27.09.2010

Затверджено

на засіданні навчально-
видавничої ради ДонНТУ

Протокол № 5 від 06.12.2010

2010

УДК 669.041

Методичні вказівки до курсової роботи студентів по дисципліні «Теплотехніка» / Курбатов Ю.Л., Новікова О.В., Бірюков А.Б., Василенко Ю.Є. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - 60 с.

Методичні вказівки містять теоретичні відомості про паливо, підготовку сталерозливного ковша до роботи, а також про використання теплових процесів при кристалізації і охолодженні безперервнолитого злитка. У вказівках приводяться методики розрахунку горіння газоподібного палива, а також визначення часу сушки і розігрівання сталерозливного ковша, розподіли температур по перетину стінки ковша, дослідження температурного поля злитка МБЛЗ.

Укладачі:

професор Курбатов Ю.Л.

доцент Новікова О.В.

доцент Бірюков О.Б.

асистент Василенко Ю.Є.

Відповідальний за випуск:

Зав.каф. ТТ

професор Кравцов В.В.

Рецензент:

доцент Ілющенко В.І.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 Зміст і оформлення курсової роботи.....	7
2 Методичні вказівки.....	9
2.1 Розрахунок горіння палива і радіаційних характеристик продуктів згорання.....	9
2.1.1 Вибір умов спалювання палива для сушки і розігрівання сталерозливного ковша.....	9
2.1.2 Визначення радіаційних характеристик продуктів згорання палива.....	17
2.2 Розрахунок процесів сушки і розігрівання сталерозливного ковша.....	21
2.2.1 Загальні поняття про конструкцію ковша і підготовку його до роботи.....	21
2.2.2 Зміст і методика виконання розрахунку сушки і розігрівання сталерозливного ковша.....	27
2.3 Вивчення динаміки твердіння і охолодження безперервнолитої заготовки.....	33
2.3.1 Короткі теоретичні положення.....	33
2.3.2 Методичні вказівки до виконання роботи.....	38
2.3.3 Представлення і аналіз результатів.....	40
Література.....	43
Додаток А Вихідні дані.....	44
Додаток Б Теплофізичні властивості матеріалів.....	50
Додаток В Діалогове вікно для введення даних.....	54
Додаток Д Вікно введення результатів розрахунку.....	55
Додаток Ж Зразок виконання титульного листа.....	56
Додаток З Зразок виконання реферату.....	57
Додаток І Температурна та теплова діаграми.....	58
Додаток К Графік розподілу температур по перетину стінки.....	59

ВСТУП

Курсова робота складається з 3 частин. До складу роботи входить:

- 1) розрахунок горіння газоподібного палива і визначення радіаційних характеристик продуктів згорання;
- 2) дослідження теплотехнічних процесів, що відбуваються в сталерозливному ковші при підготовці його до розливання, а саме при розігріванні і сушці ковша;
- 3) дослідження твердіння і охолодження безперервнолитої заготовки.

Мета курсової роботи - розширити і закріпити теоретичні і практичні знання, придбані в процесі вивчення курсу «Теплотехніка».

Завдання на курсову роботу видається керівником роботи, містить необхідні початкові дані, завдання і графік виконання. У число тим курсової роботи включаються реальні завдання, що висуваються промисловими і проектними підприємствами і кафедрою.

1 ЗМІСТ І ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Основними вимогами до змісту курсової роботи є чіткість побудови, логічна послідовність викладу матеріалу, переконливість аргументації, стислість і точність формулювань, конкретність викладу отриманих результатів, довідність і переконливість рекомендацій. Записка пояснення повинна ґрунтуватися на початкових даних для відповідного варіанту (дод. А) і містити титульний лист (дод. Ж), реферат (дод. З), зміст, завдання на роботу, основну частину, висновок, перелік посилань, додатки.

Основна частина курсової роботи включає вступ і розділи, що відображають методику, зміст і результати виконаної роботи. У Вступі вказуються мета роботи, початкові дані і обґрунтовується необхідність рішення поставленої задачі.

У розділах послідовно висловлюється зміст виконання роботи, і описуються всі проміжні і остаточні результати. Заголовком до кожного розділу служить назва, написана заголовними буквами з номером розділу, наприклад: 1 РОЗРАХУНОК ГОРІННЯ ПАЛИВА І РАДІАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ.

ВИСНОВКИ повинні містити оцінку результатів роботи з погляду їх відповідності вимогам завдання. В кінці висновку слід вказувати, чим завершена робота: отриманням якісних і кількісних характеристик, розробкою нових технологічних процесів, конструкцій, схем, режимів, отриманням певних результатів і ін.

У ПЕРЕЛІКУ ПОСИЛАНЬ зведення про книги повинні оформлятися відповідно до вимог і містити: прізвище і ініціали автора, назву книги, місце видання, видавництво, рік видання, об'єм в сторінках. Посилання необхідно розташовувати в порядку згадки в записці пояснення і позначати таким чином [2, с.34], де 2 - номер літературного джерела за списком літератури, 34 - номер сторінки, що містить посилання.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА оформляється відповідно до вимог ДСТУ 3008 на папері формату А4 (210x297) з одностороннім заповненням. Кожна сторінка повинна мати поля: зліва (у місці підшивання) 25мм, справа 5-10мм, зверху і знизу 10-15мм. Відстань між заголовком і текстом 1 інтервал або 10мм; підрозділ на розділи, підрозділи, пункти і підпункти повинні бути чіткі пі одноманітними мати порядкові номери, позначені арабськими цифрами. Перенесення в заголовках не допускаються, крапка в кінці заголовка не ставиться. Скорочення слів в тексті і підписуночних підписах не допускається. При аналітичних розрахунках необхідно, щоб формули були записані спочатку в буквених виразах, а потім з підстановкою числових даних і результатів обчислень. Приводити проміжні обчислення не слід. Всі букви, що входять у формули, необхідно пояснювати в тексті записки відразу, після застосування. Розрахунки повинні мати пояснюючий текст і необхідні посилання на літературу. Схеми, рисунки і ескізи до розрахунків потрібно виконувати

акуратно і чітко, з простановкою всіх необхідних розмірів і позначень. За наявності великої кількості однотипних розрахунків слід приводити в таблицях тільки результати цих розрахунків з попереднім описом методики (у загальному вигляді або на прикладі). На всі малюнки і таблиці повинні бути посилання в тексті (наприклад, результати розрахунків зведені в табл.2.1). Всі креслення і таблиці нумеруються арабськими цифрами і поміщаються або відразу, або на наступній сторінці після їх згадки. Кожен рисунок або таблиця повинні мати свою тематичну назву і порядковий номер відповідно до номера розділу.

2 Методичні вказівки

2.1 Розрахунок горіння палива і радіаційних характеристик продуктів згорання

Мета розрахунку - визначення об'єму повітря, необхідного для горіння палива, а також об'єму і складу продуктів згорання палива, розрахунок ступеня чорноти газу при різних коефіцієнтах витрати повітря і температурах горіння.

2.1.1 Вибір умов спалювання палива для сушки і розігрівання сталерозливного ковша

Згорання палива може бути повним і неповним. Повне спалювання здійснюється при коефіцієнті витрати повітря $\alpha > 1$, неповне при $\alpha < 1$. У разі горіння палива основним процесом є з'єднання горючих складових палива з киснем ($C+O_2$; H_2+O_2 ; $S+O_2$).

Газоподібне паливо порівняно з твердим і рідким має ряд переваг: краще змішення палива з окислювачем (киснем або повітрям), що дозволяє проводити процес спалювання з мінімальним коефіцієнтом витрати повітря; легкість транспортування до споживача; простота обслуговування.

Природний газ. Основна горюча складова природного газу метан CH_4 , зміст якого 92...98%. Останні пальні складові це неграничні вуглеводні C_mH_n . Теплота згоряння природного газу $33...38 \text{ МДж/м}^3$, щільність $0,7...0,8 \text{ кг/м}^3$.

Коксувальний газ. Є побічним продуктом коксування. Причому використовується зворотний коксувальний газ, тобто газ з якого на коксохімічному комбінаті відібрали ряд цінних компонентів (бензоліві вуглеводні, аміак, сірководень і ін.). До складу коксувального газу входять пальні складові (залежно від технології коксування): водень H_2 – $50...60\%$, метан CH_4 – $20...28\%$, а також C_mH_n до 3% та CO до 8% . Теплота згоряння $16...18 \text{ МДж/м}^3$.

Доменний (колошниковий) газ. Доменний газ є побічним продуктом в процесі отримання чавуну в доменних печах. На 1 кг чавуну утворюється 3 м^3 доменного газу. Якщо металургійне підприємство має повний металургійний цикл, то до 40% паливного балансу покривається за рахунок доменного газу. Зразковий склад доменного газу: $25...31\% \text{ CO}$, $2...3\% \text{ H}_2$, $9...14\% \text{ CO}_2$, $0,3...0,5\% \text{ CH}_4$, $57...58\% \text{ N}_2$. Теплота згоряння доменного газу $3,5...4,2 \text{ МДж/м}^3$.

Для характеристики теплового ефекту реакції згорання палива використовується поняття теплоти згоряння палива. Теплота згоряння палива - це кількість теплоти, що виділяється при спалюванні одиниці палива (кг , м^3). Розрізняють вищу $Q_{\text{в}}^{\text{p}}$ та нижчу $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ теплоту згоряння палива.

Вища теплота згорання є кількістю теплоти, що виділяється при повному згоранні 1 кг або 1 м^3 палива, за умови, що продукти згоряння охолоджені до 0°C , тобто виділилася прихована теплота паротворення (2100 кДж/кг) і теплота, витрачена на нагрів води до температури 100°C (400 кДж/кг).

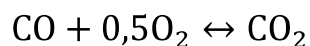
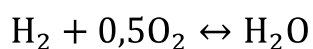
Нижча теплота згорання - це кількість теплоти, яка виділяється при повному згоранні одиниці палива (1 кг , 1 м^3) за умови, що продукти згоряння йдуть з установки з температурою більше 1000°C (тобто втрачається прихована теплота паротворення і теплота нагріву води до 1000°C).

Температура горіння палива - це температура, якої набувають продукти згоряння за рахунок теплоти, що виділилася при згоранні палива. Розрізняють

калориметричну, теоретичну і дійсну температури горіння.

Калориметрична температура горіння (t_k) – це температура, яку продукти згоряння набувають за умови, що вся теплота, яка виділилась при повному згорянні одиниці палива, пішла на нагрів тільки продуктів згоряння.

Теоретична температура горіння (t_T) - це температура, якої набувають продукти згоряння палива з теоретично необхідною витратою повітря, за умови, що вся теплота витрачається на нагрів продуктів згоряння і протікання ендотермічних реакцій дисоціації, що протікають при високих температурах (вище 1000°C):



Дійсна температура горіння (t_d) – це температура, яку отримують продукти згоряння палива при спалюванні його з різним коефіцієнтом витрат повітря з урахуванням загубленого тепла із зони горіння. Дійсна температура розраховується з рівняння:

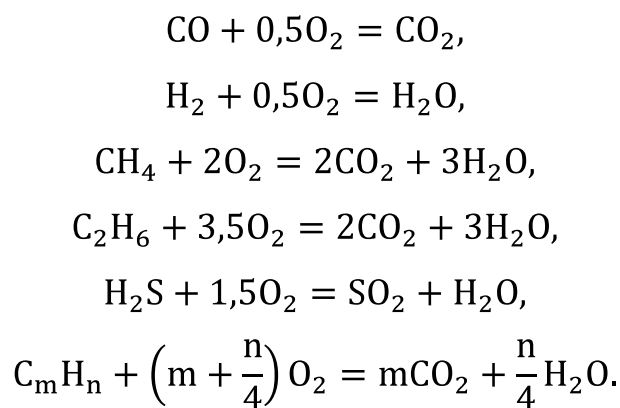
$t_d = \eta_{\text{пир}} \cdot t_k$, де $\eta_{\text{пир}}$ – пірометричний коефіцієнт, залежний від температурного рівня процесу.

Розрахунок горіння палива є основою при проектуванні теплотехнічних установок та вбирає в себе розділи:

1. Перерахунок сухого складу газу на робочий (вологий);
2. Розрахунок теплоти згоряння палива;
3. Розрахунок теоретичної та дійсної кількості кисненосію для спалювання одиниці палива;
4. Розрахунок кількості та складу продуктів згоряння;
5. Розрахунок калориметричної температури горіння палива.

Розрахунок горіння палива ведеться на підставі реакцій окислення по яких визначають необхідну кількість кисненосія, одержувану кількість продуктів згоряння (диму) і їх склад.

Горючі складові газоподібних палив окислюються по наступним стехіометричним рівнянням [1]:



Робочий склад газів визначається як добуток кожного компоненту сухого палива і коефіцієнта перерахунку, наприклад

$$\text{CO}_2 = K \cdot \text{CO}_2^{\text{сух}}.$$

Коефіцієнт перерахунку сухого складу газу на робочий:

$$K_{\text{с-р}} = \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot W}, \quad (1)$$

де W – вологість палива, г/м³.

Тоді вміст H_2O у вологому газі визначається по формулі:

$$\text{H}_2\text{O} = 0,1242 \cdot W \cdot K_{\text{с-р}}, \% \quad (2)$$

Сума всіх компонентів вологого палива складає 100%.

По відповідних рівняннях горіння можна визначити кількість повітря на горіння того або іншого горючого компоненту.

Низька теплота згоряння газоподібного палива – це кількість теплоти, яка виділяється при спалюванні одиниці палива і визначається по формулі:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{H}}^{\text{p}} &= 0,01(12,7\text{CO} + 35,7\text{CH}_4 + 59\text{C}_2\text{H}_4 + 10,8\text{H}_2 + 55,5\text{C}_2\text{H}_6 + 91,3\text{C}_3\text{H}_8 \\
&\quad + 118,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 14,65\text{C}_5\text{H}_{12} + 23,4\text{H}_2\text{S}), \frac{\text{МДж}}{\text{М}^3} \quad (3)
\end{aligned}$$

Визначення теоретично необхідної кількості кисненосія розраховується по формулі:

$$L_0 = \frac{1 + \frac{N_2^B}{O_2^B}}{100} \left[0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2^T \right] \cdot (1 + 0,00124 \cdot d_B), \quad (4)$$

де 0,5;0,5;2 і т.д. коефіцієнти, що стоять перед киснем в стехіометричних рівняннях горіння відповідних компонентів палива;

$(1 + 0,00124 \cdot d_B)$ - поправка на вогкість;

d_B – вогкість повітря залежно від температури, $г/м^3$;

N_2^B, O_2^B - вміст азоту і кисню в кисненосії; в незбагаченому сухому повітрі

$N_2^B=79\%, O_2^B=21\%$.

Влаговміст повітря визначається в залежності від температури повітря по таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Залежність вологості повітря від температури

t, °C	0	10	20	30	40
$d_B, г/м^3$	4,8	9,8	18,9	35,1	63,1

Склад вологого кисненосія (повітря) визначається через добуток компонентів сухого повітря і коефіцієнта перерахунку на вологе повітря:

$$K_{c-B} = \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot d_B}. \quad (5)$$

Тоді склад вологого повітря % визначається по формулах:

$$N_2 = K_{c-B} \cdot N_2^B; \quad (6)$$

$$O_2 = K_{c-B} \cdot O_2^B; \quad (7)$$

$$H_2O = 0,1242 \cdot K_{c-B} \cdot d_B, \%. \quad (8)$$

Дійсна кількість повітря визначається з виразу:

$$L_D = \alpha \cdot L_0, \quad (9)$$

де $\alpha=1$ – коефіцієнт витрати повітря.

Об'єм продуктів повного згорання (димув) визначається по формулі:

$$V_D = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (10)$$

Об'єм складових продуктів згорання, що утворюються при спалюванні одиниці газоподібного палива, визначається по рівняннях реакцій горіння:

– вуглекислий газ:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \left(\text{CO} + \text{CO}_2^{\text{T}} + \text{CH}_4 + \sum m \text{C}_m \text{H}_n \right), \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}, \quad (11)$$

– водяні пари:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \left(\text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{CH}_4 + \sum \frac{n}{2} \text{C}_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{O}^{\text{T}} + \frac{0,124 \cdot L_{\text{д}} \cdot d_{\text{в}}}{1 + 0,001242 \cdot d_{\text{в}}} \right), \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}, \quad (12)$$

– окисли сірки:

$$V_{\text{SO}_2} = 0,01 \cdot \text{H}_2\text{S}, \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}, \quad (13)$$

– азот:

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \left(\text{N}_2^{\text{T}} + \text{N}_2^{\text{B}} \cdot \frac{L_0 \cdot \alpha}{1 + 0,001242 \cdot d_{\text{в}}} \right), \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}, \quad (14)$$

– кисень:

$$V_{\text{O}_2} = 0,01 \cdot \text{O}_2^{\text{B}} (\alpha - 1) \cdot \frac{L_0}{1 + 0,001242 \cdot d_{\text{в}}}, \frac{\text{M}^3}{\text{M}^3}, \quad (15)$$

де $\text{O}_2^{\text{B}} = 21\%$ (у незбагаченому киснем повітрі).

Склад диму визначається по наступнім формулам:

$$\text{CO}_2 = \frac{V_{\text{CO}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

$$\text{N}_2 = \frac{V_{\text{N}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (17)$$

$$\text{H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (18)$$

$$\text{SO}_2 = \frac{V_{\text{SO}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (19)$$

$$\text{O}_2 = \frac{V_{\text{O}_2}}{V_{\text{д}}} \cdot 100\%, \quad (20)$$

Сумарний склад продуктів згоряння повинен дорівнювати 100%. Якщо сума відрізняється від 100 % не більш, ніж на 0,5%, то її необхідно скоректувати. Корекція зазвичай проводиться по компоненту, вміст якого в

продуктах згорання максимально. У випадку, якщо розрахунок виконується при коефіцієнті витрати повітря $\alpha=1$, об'єм продуктів згорання прийнято позначати як $V_{д0}$, а вміст $O_2=0\%$.

Після виконання розрахунку горіння необхідно скласти матеріальний баланс процесу горіння.

Рівняння матеріального балансу процесу горіння має вигляд:

$$m_T + m_B = m_D + \Delta m, \quad (21)$$

де m_T – маса палива, при спалюванні газоподібного палива

$$m_T = 1 \cdot \rho_T^0, \quad (22)$$

при цьому густина змішаного газу визначається по формулі:

$$\rho_T^0 = \frac{\sum M_i \cdot r_i}{22,4 \cdot 100}, \quad (23)$$

де M_i – молекулярна маса компонента, кг;

r_i – вміст компонента в суміші %.

m_B – маса повітря, що подається на горіння, визначається по формулі:

$$m_B = L_D \cdot \rho_B^0. \quad (24)$$

Густина вологого кисненосія:

$$\rho_B^0 = \frac{M_{O_2} \cdot O_2 + M_{N_2} \cdot N_2 + M_{H_2O} \cdot H_2O}{22,4 \cdot 100}, \quad (25)$$

m_D – маса продуктів згорання, визначається по формулі:

$$m_D = V_D \cdot \rho_D^0, \quad (26)$$

Густина продуктів згорання:

$$\rho_D^0 = \frac{M_{CO_2} \cdot CO_2 + M_{N_2} \cdot N_2 + M_{SO_2} \cdot SO_2 + M_{O_2} \cdot O_2 + M_{H_2O} \cdot H_2O}{22,4 \cdot 100}, \quad (27)$$

Δm – незв'язність матеріального балансу, визначається по формулі:

$$\Delta m = \frac{(m_T + m_B) - m_D}{m_T + m_B} \cdot 100\% \leq 0,5\%. \quad (28)$$

Калориметричну температуру горіння палива визначають з рівняння теплового балансу:

$$Q_H^p + Q_\Phi^T + Q_\Phi^B = V_D \cdot c_{д,кал} \cdot t_{кал}, \quad (29)$$

де $c_{д,кал}$ – середня питома об'ємна теплоємність продуктів згоряння в інтервалі температур від нуля до калориметричної температури, тобто, $c_0^{t_{кал}}$, Дж/(м³·К);

$Q_{ф}^T$ – фізичне тепло палива, Дж/м³;

$Q_{ф}^B$ – фізичне тепло повітря, Дж/м³.

Калориметрична температура визначається по формулі:

$$t_{кал} = \frac{Q_H^P + Q_{ф}^T + Q_{ф}^B}{V_{д} \cdot c_{д,кал}}. \quad (30)$$

У роботі $Q_{ф}^B, Q_{ф}^T = 0$, тому що не має підігріву палива та повітря.

Оскільки теплоємність продуктів згоряння $c_{д,кал}$ є функцією калориметричної температури, яка невідома, необхідно визначити орієнтовну величину по таблиці БЗ (додаток БЗ): $t'_{кал} = f(i)_{кал}$, де $i_{кал}$ – калориметричний тепловміст продуктів згоряння, Дж/м³:

$$i_{кал} = \frac{Q_H^P}{V_{д}} \quad (31)$$

Визначаємо $t'_{кал}$ для палива відповідної калорійності і коефіцієнті витрати повітря 1%. Теплоємність суміші газів (продуктів згоряння) визначається по температурі $t'_{кал}$ по формулі:

$$c_{д,кал} = \frac{c_{CO_2} \cdot CO_2 + c_{H_2O} \cdot H_2O + c_{N_2} \cdot N_2 + c_{SO_2} \cdot SO_2}{100}, \frac{кДж}{м^3К}, \quad (32)$$

$$t_{кал} = \frac{i_{кал}}{c_{д,кал}} \quad (33)$$

Остаточне значення $t_{кал}$, по якій визначається $c_{д,кал}$, не повинно відрізнятися від попереднього значення $t'_{кал}$ більш, ніж на 25°С, інакше необхідно виконати ще одне наближення.

2.1.2 Визначення радіаційних характеристик продуктів згоряння палива

Процеси, що відбуваються при сушці і розігріву сталерозливних ковшів відносяться до високотемпературних, коли випромінювання є основним видом передачі тепла. Приведений ступінь чорноти системи $\epsilon_{\text{пр}}$, який включає об'єм, заповнений газами, і поверхню, що обмежує цей об'єм, визначається з виразу [2]:

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{\text{м}}} + \frac{1}{\epsilon_{\text{г}}} - 1}, \quad (34)$$

де $\epsilon_{\text{м}}$ – ступінь чорноти матеріалу. Матеріал внутрішньої поверхні сталерозливного ковша (вогнетривка футеровка) є сірим тілом із ступенем чорноти матеріалу $\epsilon_{\text{м}}$ приймаємо рівною 0,7-0,8;

$\epsilon_{\text{г}}$ – ступінь чорноти газів визначається як сума ступенів чорноти трьохатомних газів і є функцією $\epsilon_{\text{г}} = f(S_{\text{эфф.к}}, p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}, t_{\text{ср.к}})$,

де $p_{\text{CO}_2}, p_{\text{H}_2\text{O}}$ – парціальний тиск трьохатомних газів, кПа;

$S_{\text{эфф.к}}$ – ефективна товщина випромінюючого шару, м:

$$S_{\text{эфф.к}} = \frac{3,6 \cdot V_{\text{цил}}}{F_{\text{цил}}}, \quad (35)$$

де V – об'єм порожнини, заповненої газом:

$$V_{\text{цил}} = \frac{\pi \cdot D_1^2 \cdot H}{4}, \text{ м}^3; \quad (36)$$

F – площа всіх внутрішніх поверхонь, що обмежують об'єм,

$$F_{\text{цил}} = 2S_{\text{осн}} + S_{\text{бок}} = \frac{2\pi \cdot D_1^2 \cdot H}{4} + \pi \cdot D_1 \cdot H, \text{ м}^2. \quad (37)$$

Парціальний тиск газів визначається по формулах:

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{\% \text{CO}_2}{100} p_{\text{полн}}; \quad (38)$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\% \text{H}_2\text{O}}{100} p_{\text{полн}}; \quad (39)$$

де $p_{\text{полн}}$ – повний тиск приймаємо рівним 98,1 кПа.

Ступінь чорноти трьохатомних газів визначається по графіках-номограмах $\varepsilon_{\text{CO}_2} = f(T, p, s)$ и $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = f(T, p, s)$ [3]) таким чином: розраховується добуток парціального тиску на ефективну довжину променя для відповідного газу і по добутку ps і температурі T по номограмі визначається ступінь чорноти. Тоді ступінь чорноти суміші трьохатомних газів визначається по формулі:

$$\varepsilon_{\Gamma} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (40)$$

де β - поправочний коефіцієнт для водяної пари, $\beta = 1$.

Для діапазону температур 400-1500°C можливо також використовувати емпіричні формули [2]:

$$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,165(p \cdot S_{\text{эфф}})^{0,33} \cdot (0,01 \cdot T)^{-0,5}, \quad (41)$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,209(p^{0,8}) \cdot S_{\text{эфф}}^{0,6} \cdot (0,01 \cdot T)^{-1}, \quad (42)$$

Нижче приведений алгоритм розрахунку радіаційних характеристик продуктів згорання для температур сушки і розігріву сталерозливного ковша:

1. Виконуємо розрахунок горіння палива по формулах (1-32) при коефіцієнті витрати повітря $\alpha=1$ і визначаємо нижчу теплоту згорання палива Q_{H}^{p} , теоретично необхідний об'єм повітря L_0 , об'єм і склад продуктів згорання ($V_{\text{до}}$, % CO_2 , H_2O , N_2 , SO_2), калориметричну температуру $t_{\text{кал}}$ (за умови, що немає підігріву палива і повітря).

2. Визначаємо об'єм продуктів згорання при температурі сушки $t_{\text{суш}}$ з рівняння теплового балансу

$$t_{\text{кал}} \cdot V_{\text{до}} \cdot c_{\text{д.кал}} = t_{\text{суш}} \cdot V_{\text{д.суш}} \cdot c_{\text{д.суш}}; \quad (43)$$

$$V_{\text{д.суш}} = \frac{t_{\text{кал}} \cdot V_{\text{до}} \cdot c_{\text{д.кал}}}{t_{\text{суш}} \cdot c_{\text{д.суш}}}, \frac{\text{М}^3}{\text{М}^3} \quad (44)$$

де $c_{\text{д.суш}}$ – середня теплоємність продуктів згорання при температурі сушки, Дж/($\text{М}^3 \cdot \text{К}$);

$c_{д.кал}$ – середня теплоємність продуктів згоряння при калориметричній температурі, Дж/(м³·К), визначається за допомогою формул (30-33).

3. Знаходимо $\alpha_{суш}$ з виразу $V_{д.суш} = (\alpha_{суш} - 1)L_0 + V_{до}$, тоді

$$\alpha_{суш} = \frac{V_{д.суш} - V_{до}}{L_0} + 1. \quad (45)$$

4. По формулам (10-15) знаходимо об'єм складових продуктів згоряння палива та повний об'єм, а також по формулам (16-20) склад продуктів згоряння (% CO₂, H₂O, N₂, SO₂, O₂), що утворюються при температурі сушки і відповідному коефіцієнті витрати повітря $\alpha_{суш}$. Також визначаємо ступінь чорнот газів (40-42) та приведену ступінь чорності системи (34).

5. Аналогічно виконуємо розрахунки по формулам п.2-4 для температури розігріву $t_{разогр}$ сталерозливного ковша, у формулах 32-34 індекси, відповідні сушці, змінити на розігрів.

Результати розрахунків частини 2.1 представляються у вигляді таблиці (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку горіння палива та радіаційних характеристик для сушки і розігріву ковша

№	Найменування величин	Позначення, од. вимірювання	Значення
Вихідні данні:			
1.	Склад палива	$C_m H_n$, % CH ₄ , % CO, % H ₂ S, % CO ₂ , % H ₂ , %	
2.	температура сушки	$t_{суш}$, °C	
3.	температура розігріву	$t_{разогр}$, °C	
Результати розрахунку:			
1.	Теплота згоряння палива об'єм повітря об'єм продуктів згоряння при $\alpha=1$ склад продуктів згоряння при $\alpha=1$ калориметрична температура	Q_H^p , МДж/м ³ L_0 , м ³ /м ³ $V_{до}$, м ³ /м ³ CO ₂ , % H ₂ O, % SO ₂ , % N ₂ , % $t_{кал}$, °C	
2.	об'єм продуктів згоряння при $t_{суш}$ коефіцієнт витрати повітря при $t_{суш}$ об'єм повітря при $\alpha_{суш}$ склад продуктів згоряння при $\alpha_{суш}$ ступінь чорноти газу при $\alpha_{суш}$ приведений ступінь чорноти газу при $\alpha_{суш}$	$V_{д.суш}$, м ³ /м ³ $\alpha_{суш}$ $L_{д}$, м ³ /м ³ CO ₂ , % H ₂ O, % SO ₂ , % N ₂ , % O ₂ , % ϵ_r $\epsilon_{пр}$	
3.	об'єм продуктів згоряння при $t_{разогр}$ коефіцієнт витрати повітря при $t_{разогр}$ об'єм повітря при $\alpha_{разогр}$ склад продуктів згоряння при $\alpha_{разогр}$ ступінь чорноти газу при $\alpha_{разогр}$ приведений ступінь чорноти газу при $\alpha_{разогр}$	$V_{д.разогр}$, м ³ /м ³ $\alpha_{разогр}$ $L_{д}$, м ³ /м ³ CO ₂ , % H ₂ O, % SO ₂ , % N ₂ , % O ₂ , % ϵ_r $\epsilon_{пр}$	

2.2 Розрахунок процесів сушки та розігріву сталерозливного ковша

Мета розрахунку – визначити час періодів сушки і розігріву, а також розподіл температур по перетину чотиришарової стінки у кінці кожного періоду.

2.2.1 Загальні поняття про конструкцію ковша і підготовку його до роботи

Сталерозливний ковш служить для зливу в нього із сталеплавильного агрегату металу і частини шлаку, витримки, транспортування і розливання металу в злитки або на машині безперервного лиття заготовок (МНЛЗ), після чого шлак зливається в шлакову чашу (рис.2.1).

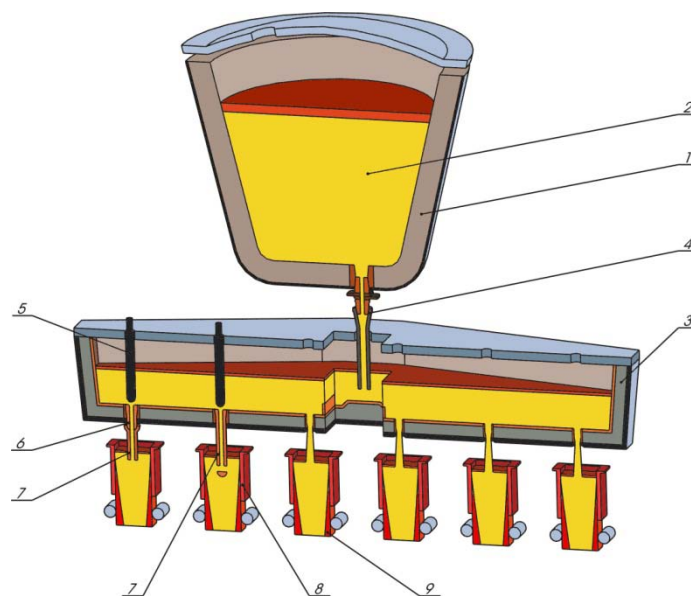
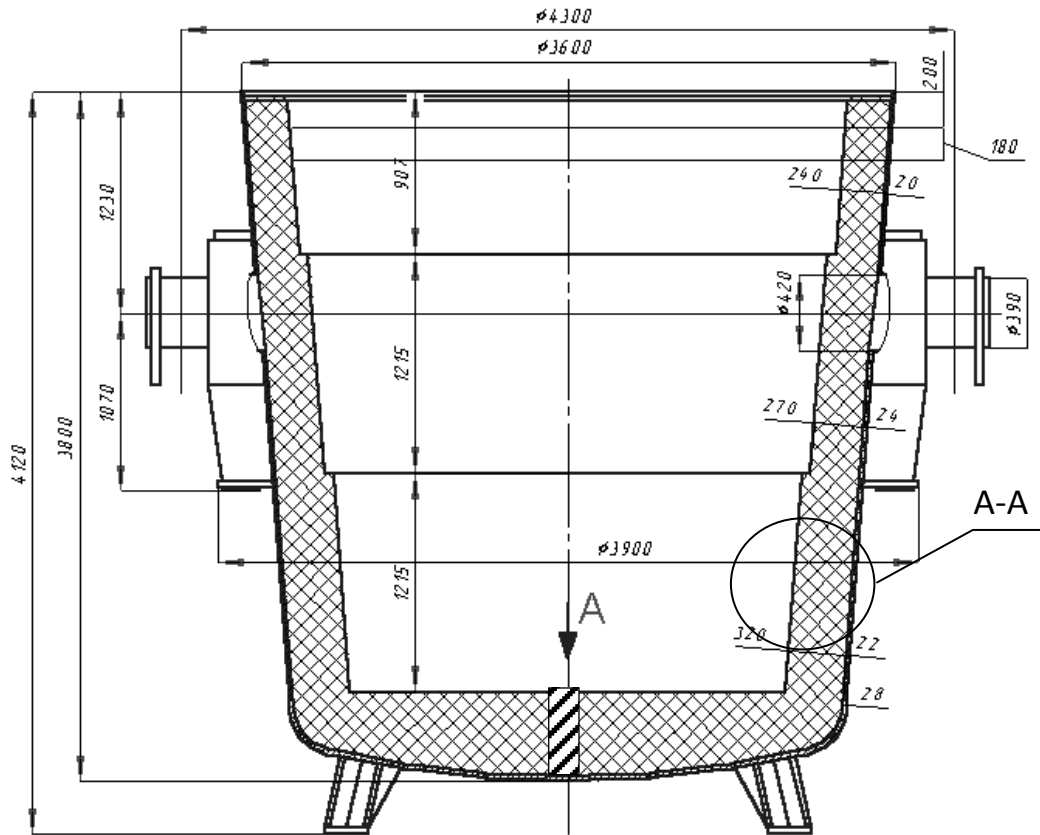


Рисунок 2.1 – Схема руху металу:

1 – сталерозливний ковш, 2 – рідкий метал, 3 – проміжний ковш, 4 – сталерозливний стакан, 5 – стопор, 6 – сталевипускний отвір, 7 – погрузний стакан, 8 – кристалізатор, 9 – ролікова провідка.

Як правило, в ковші проводять розкислювання, легування і позапічна обробка сталі. Також сталерозливний ковш може бути обладнаний пристроями для обробки сталі інертним газом і порошкоподібними реагентами.

Сталерозливний ковш (рис. 2.2) складається з кожуха, з металоконструкціями, дозуючих пристроїв, кантовочного пристосування і футерівки. Ковши, призначені для прийому плавки із стаціонарних плавильних агрегатів, мають один або два шлакові жолоби, по яких відводиться надлишок шлаку в шлакові чаші. Основні розміри сталерозливних ковшів, що використовуються в промисловості приведені в таблиці 2.1.



A-A

Металева обшивка

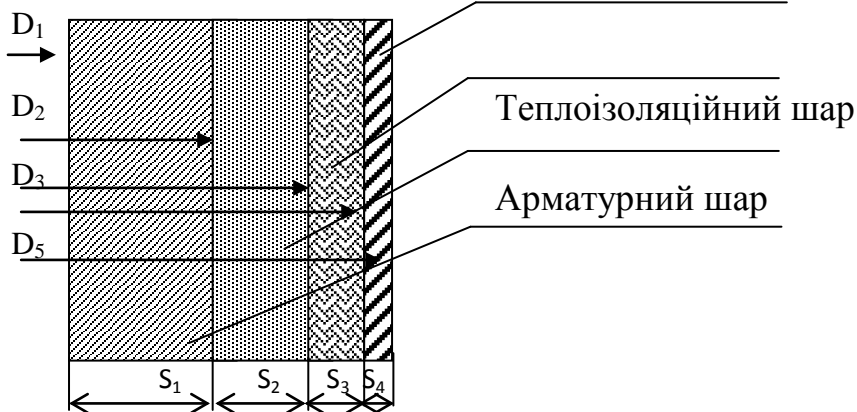


Рисунок 2.2 – Зразок конструкції сталерозливного ковша ємкістю 90 тон і схеми футерівки

Таблиця 2.3 – Основні розміри сталерозливних ковшей

Місткість ковша, т	Основні розміри, мм		
	Висота	Внутрішній діаметр*	
		Вгорі	Внизу
50	2860	2620	2340
90	3250	3220	2850
100	3360	3400	2950
150	4370	3700	3170
200	4380	4000	3420
250	4400	4350	3570
300	4790	4500	3780
350	5000	4700	4000
430	5250	5050	3780
480	5400	5340	4615

* - Для розрахунків приймаємо середній діаметр

Сталерозливні ковші проходять наступний цикл роботи:

1. ремонт футеровки;
2. сушка футеровки ковша (видалення вологи);
3. розігрівання футеровки ковша до робочої температури 1000-1200 °С;
4. випуск сталі в ківш;
5. позапічна обробка і розливання сталі;
6. підтримка робочої температури ковша до нового випуску.

Кожух і всі металеві елементи захищаються від перегріву внутрішньої футеровки. Кожух виготовляють зварним зі сталевих листів, що відпалюють завдовжки 16-40 мм. Відповідно до умов служби ковша футеровка повинна бути термостійкою, стійкою проти корозійного і ерозійного руйнування рідким металом і шлаком, володіти невеликою теплопровідністю, теплоємністю і усадкою при температурах служби, а в процесі позапічної обробки не взаємодіяти з реагентами, що вводять в метал. Повною мірою цим вимогам не

відповідає жоден з вживаних варіантів футеровки ковшів. Вибір варіанту залежить також від вартості вогнетривів, а також впливає на число ковшів в цеху, займані ремонтним устаткуванням площі, кількість трудящих і т.д. У зв'язку з цим, разом з найбільш поширеною футеровкою з недорогих алюмосилікатних вогнетривів використовуються високоглиноземісті і основні вогнетриви. По методу виготовлення робочого шару футеровки розрізняють використання формованих, набивних і наливних вогнетривів.

Для забезпечення мінімальних теплових втрат і високої стійкості при відносно невеликій масі застосовують багат шарові тонкостінні футеровки. Тришарова футеровка (рис.2.2) складається з шарів теплоізоляції (вирівнюючого), арматурної і робочої, зроблених з різних матеріалів, що визначають конструкцію футеровки днища і стін відповідно до умов експлуатації ковшів.

Шар теплоізоляції. Оскільки при упровадженні технології позапічної обробки значно збільшується час знаходження рідкого металу в ковші, а в робочому шарі застосовуються периклазовуглецеві або високоглиноземісті вогнетриви з високою теплопровідністю, то в цілях зменшення теплових втрат велику увагу надається теплоізоляції. Шар теплоізоляції укладається (приклеюється) безпосередньо на металеву частину кожуха ковша і служить для обмеження передачі теплоти в атмосферу, тому основною його властивістю повинна бути низька теплопровідність. Достатньо ефективну теплоізоляцію забезпечує традиційна цегляна кладка шару теплоізоляції з легковагової шамотної цеглини завдовжки 30-40 мм. В сучасних технологіях також застосовують волоконні мулітокремніземісті матеріали: повсть, фетр або картон завдовжки 5-20 мм.

Арматурний шар. Арматурний шар укладається впритул до теплоізолюючого шару. Він повинен володіти одночасно наступними властивостями:

- високою міцністю, тобто витримувати навантаження, передавані через робочий шар (феростатичний тиск металу, розширення цеглини робочого шару

- периклазовуглецева цеглина робочого шару володіє високим коефіцієнтом термічного розширення);
- повинен протистояти якийсь час дії агресивного середовища (металу або шлаку) у разі повного зносу робочого шару;
- достатньою термостійкістю - не менше 10 теплотмін.

Від вибору вогнетривів арматурного шару багато в чому залежить і стійкість робочого шару. Традиційно цей шар виконується з шамотної цеглини зважаючи на його низьку теплопровідність 1-1,5 Вт/(м·К), але межа міцності при стисненні менше 30 Н/мм² недостатній, і приводить до швидкого його руйнування, окрім цього шамотна цеглина не протистоїть агресивній дії високоосновного шлаку в ситуаціях повного зносу робочого шару шлакового пояса. Тому в даний час арматурний шар днища стін нижче шлакового пояса виконують з високоміцної мулітової цеглини з межею міцності не менше 80 Н/мм² і змістом Al₂O₃ більше 75 %. Для кладки шару застосовують високоглиноземистий хромсодержащий пластифіцирований мертель або периклазосодержащий матеріал. Товщина шару коливається в інтервалі 30-65 мм, а в деяких випадках може досягати 100мм.

Робочий шар. Футеровка сталерозливних ковшів, що використовуються для комплексної позапічної обробки сталі, в процесі експлуатації зноситься нерівномірно. Враховуючи зональний знос, на практиці використовують комбінований принцип конструкції футерівки, який передбачає диференційований підхід до фізичних, термомеханічних, теплофізичних властивостям вибраних матеріалів. Як основні вогнетриви, застосовують периклазохромісті, известково-периклазові, периклазовуглецеві та ін. Товщина робочого шару складає 150-220 мм

Експлуатація ковшів. В процесі експлуатації ковша не допускається зниження температури робочої футеровки ковша менш 700°C. Максимальна стійкість ковшів досягається, якщо ківш підтримуватиметься настільки гарячим, наскільки це можливо, при максимальній частоті використання. В

процесі розливання і під час межплавочного простою ківш повинен бути накритий теплоізолюючою кришкою.

Для забезпечення процесу сушки з оптимальними показниками по витраті палива і тривалості нагріву необхідна установка наступного устаткування:

- горілочний пристрій, що дозволяє спалювати паливо з коефіцієнтом витрати повітря α в діапазоні 1,3-8, для отримання робочого середовища з температурою 1200-400 °С;

- щільна ізольована кришка, що дозволяє:

- понизити теплові втрати через зовнішню поверхню;
- за рахунок прилягання до обичайки ковша з мінімальним зазором забезпечити позитивний тиск в робочому просторі ковша для рівномірного розподілу теплоносія за об'ємом і створення умов для рециркуляції гарячих газів;
- автоматичне управління процесом для плавної зміни витрати палива залежно від температури в ковші.

Максимальна стійкість футеровки ковшів досягається в тому випадку, якщо розігрівання буде закінчено безпосередньо перед використанням ковша. Перед першою плавкою не слід розігрівати ківш наперед і тим більше дати йому остигнути. Перед зливом плавки рекомендується мати температуру робочої футеровки ковша в межах від 1000 °С до 1200 °С.

Коли ківш введений в оборот, то слід провести послідовно, без простоїв щонайменше 5 плавок для остаточного вирівнювання термічної рівноваги по всій товщині футеровки.

2.2.2 Зміст і методика виконання розрахунку сушки і розігріву сталерозливного ковша

Процес передачі тепла через стінку сталерозливного ковша і розподіл температур по перетину футеровки зображено на рисунку 2.3

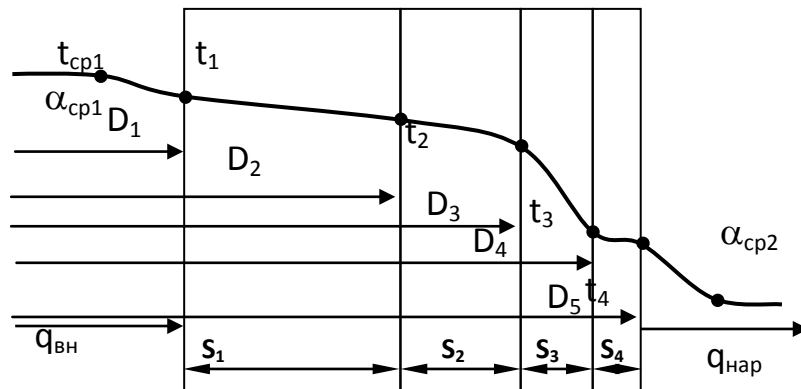


Рисунок 2.3 – Розподіл температур по перетину футеровки

Час нагрів ковша визначається по наступній формулі:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^4 \rho_i \cdot F_i \cdot c_i \cdot (\bar{t}_{к,i} - \bar{t}_{н,i})}{(\pi \cdot D_1 \cdot q_{вн,ср} - \pi \cdot D_5 \cdot q_{нар,ср})}, \quad (46)$$

де $\bar{t}_{к,i} - \bar{t}_{н,i}$ – середньомасові температури в кінці і початку періоду кожного шару °С (визначаються як середньоарифметичні);

c_i – теплоємність і-того шару стінки ковша, Дж/(кг·К);

F_i – площа і-того шару стінки ковша, м²:

$$F_i = \frac{\pi}{4} (D_{i+1}^2 - D_i^2). \quad (47)$$

Средня щільність теплового потоку дорівнює:

$$q_{вн,ср} = \frac{q_{вн,н} - q_{вн,к}}{\ln \frac{q_{вн,н}}{q_{вн,к}}}; \quad q_{нар,ср} = \frac{q_{нар,н} + q_{нар,к}}{2}, \quad (48)$$

де q_H – початкова щільність теплового потоку, внутрішня та зовнішня відповідно, Вт/(м²);

q_K – кінцева щільність теплового потоку, внутрішня та зовнішня відповідно, Вт/(м²).

$$q_{вн.н} = \sigma_0 \varepsilon_{пр} (T_{cp1}^4 - T_{1н}^4), \quad q_{вн.к} = \sigma_0 \varepsilon_{пр} (T_{cp1}^4 - T_K^4), \quad (49)$$

де σ_0 – приведенний коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T – температура, К.

При вільному обтіканні повітряного середовища зовнішньої стінки ковша щільність теплового потоку визначається по формулі [3]:

$$q_{нар.н} = \alpha_{cp2н} \cdot (t_{5н} - t_{cp2}), \quad q_{нар.к} = \alpha_{cp2к} \cdot (t_{5к} - t_{cp2}), \quad (50)$$

де α_{cp2} – коефіцієнт тепловіддачі при конвективному теплообміні в необмеженому просторі, для повітря приймаємо при $t=0-20$ °С, Вт/(м²·К) [3]:

$$\alpha_{cp2н} = 2,5^4 \sqrt{t_{5н} - t_{cp2}}, \quad \alpha_{cp2к} = 2,5^4 \sqrt{t_{5к} - t_{cp2}} \quad (51)$$

Необхідно врахувати, що у початковий момент часу процесу сушки ($\tau=0$) температура всіх шарів футеровки однакова і дорівнює температурі:

$$t_{1н} = t_{2н} = t_{3н} = t_{4н} = t_{5н} = t_{cp2}.$$

Приймаємо допущення, що в кінці процесу тепловий стан стаціонарний. Тоді щільність теплового потоку від гріючого середовища до навколишнього середовища через чотирьохшарову циліндрову стінку сталерозливного ковша при співвідношенні сумарної товщини шарів до діаметра менше 1:7, визначається як для плоскої стінки по формулі:

$$q = \frac{t_{cp1} - t_{cp2}}{\frac{1}{\alpha_{cp1}} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3} + \frac{S_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_{cp2}}}, \quad (52)$$

де t_{cp1}, t_{cp2} – температура газової середовища усередині ковша і навколишнього середовища відповідно, °С;

$\alpha_{cp1}, \alpha_{cp2}$ – коефіцієнт тепловіддачі від середовища до внутрішньої поверхні стінки ковша і від зовнішньої поверхні стінки ковша до навколишнього середовища, Вт/(м²·К);

λ – середній коефіцієнт теплопровідності відповідного шару стінки, Вт/(м·К);

S – товщина відповідного шару стінки ковша, м

Припускаємо, що частка конвективного теплообміну α_k складає 10 % від променистого теплового потоку α_l , тоді $\alpha_{cp1} = 1,1\alpha_l$:

$$\alpha_{cp1} = \frac{\sigma_0 \varepsilon_{пр} (T_{cp1}^4 - T_k^4)}{T_{cp1} - T_k} \quad (53)$$

Температури на поверхнях шарів будуть визначатися за наступними формулами:

$$\begin{aligned} t_1 &= t_{cp1} - \frac{q}{\alpha_{cp1}}, & t_2 &= t_1 - \frac{q \cdot S_1}{\lambda_1}, & t_3 &= t_2 - \frac{q \cdot S_2}{\lambda_2}, \\ t_4 &= t_3 - \frac{q \cdot S_3}{\lambda_3}, & t_5 &= t_4 - \frac{q \cdot S_4}{\lambda_4}, & t_5 &= t_{cp2} + \frac{q}{\alpha_{cp2}}. \end{aligned} \quad (54)$$

Алгоритм розрахунку розподілу температур і часу сушки та розігріву сталерозливного ковша наступний:

1. По вихідним даним задаємо $t_{cp1} = t_{суш}$.
2. Приймаємо температуру навколишньої середи t_{cp2} в інтервалі 0-20°C та $t_{5н} = t_{cp2}$.
3. Використовуючи значення ступеня чорноти газу, отриманні у попередньому розділі для $t_{суш}$ по формулам (40-42), знаходимо $q_{вн.н}$, $q_{вн.к}$, $q_{нар.н}$, $q_{нар.к}$, $q_{вн.ср}$, $q_{нар.ср}$ по формулам (48-50), при цьому кінцева температура поверхні внутрішнього шару у 1-му наближенні складає:
 $t_1 = t_{1к} = t_{суш} - (10 \div 30)^\circ\text{C}$.
4. Коефіцієнт тепловіддачі від газу до внутрішньої поверхні стінки α_{cp1} знаходимо по формулі (53).
5. Приймаємо у 1-му наближенні, що в кінці нагріву $t_{5к} = t_{cp2} + 10^\circ\text{C}$ й знаходимо коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки до

навколишнього середовища $\alpha_{\text{ср2}}$. Коефіцієнти теплопровідності шарів λ у першому наближенні визначаємо по початковій температурі (дод. Б).

6. Визначаємо щільність теплового потоку q від гріючої середи до навколишнього середовища через чотирьохшарову циліндричну стінку сталерозливного ковша (52).
7. По формулам (54) знаходимо t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 у 1-му наближенні, за якими уточнюємо коефіцієнти тепловіддачі α і теплофізичні властивості матеріалу λ, c (по середньомасовій температурі кожного шару $\bar{t}_i = 0,5(t_{i+1} + t_i)$).
8. Уточнюємо щільність теплового потоку q та розподіл температур по перетину стінки ковша t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 , а також $\lambda, c, q_{\text{вн.н}}, q_{\text{вн.к}}, q_{\text{нар.н}}, q_{\text{нар.к}}, q_{\text{вн.ср}}, q_{\text{нар.ср}}$ у другому наближенні.
9. Визначаємо щільність теплового потоку кожного шару стінки ковша (дод. Б) і площу поверхні кожного шару (47). По формулі (46) знаходимо час виходу футеровки на стаціонарний стан $\tau'_{\text{суш}}$. Час сушки приймаємо $\tau_{\text{суш}} = 0,5 \cdot \tau'_{\text{суш}}$.
10. Аналогічно, за п. 3-9 виконуємо розрахунок для розігріву ковша $t_{\text{ср1}} = t_{\text{разогр}}$. За початковий розподіл температур по перетину стінки ковша приймаємо кінцевий температурний розподіл після сушки, а $t_{5\text{к}} = t_{5\text{н}} + 20^\circ\text{C}$.
11. По результатам розрахунку будуємо температурну та теплову діаграми сушки та розігріву ковша, а також графік розподілу температур по перетину стінки ковша (рис. 2.4; 2.5).
Результати розрахунків частини 2.2 необхідно оформити у вигляді таблиці (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Результати розрахунку сушки та розігріву ковша

N	Найменування величин	Позначення, вимірювання	Значення
1.	<p>Час сушки ковша:</p> <p>Розподіл температур по перетину наприкінці сушки:</p> <p>Початкова та кінцева щільність теплового потoku у період сушки:</p>	<p>$\tau_{\text{суш}}$, Ч</p> <p>t_1, °С</p> <p>t_2, °С</p> <p>t_3, °С</p> <p>t_4, °С</p> <p>t_5, °С</p> <p>$q_{\text{вн.н}}$, Вт/(м²)</p> <p>$q_{\text{нар.н}}$, Вт/(м²)</p> <p>$q_{\text{вн.к}}$, Вт/(м²)</p> <p>$q_{\text{нар.к}}$, Вт/(м²)</p>	
2.	<p>Час розігріву ковша:</p> <p>Розподіл температур по перетину наприкінці розігріву:</p> <p>Початкова та кінцева щільність теплового потoku у період розігріву:</p>	<p>$\tau_{\text{разогр}}$, Ч</p> <p>t_1, °С</p> <p>t_2, °С</p> <p>t_3, °С</p> <p>t_4, °С</p> <p>t_5, °С</p> <p>$q_{\text{вн.н}}$, Вт/(м²)</p> <p>$q_{\text{нар.н}}$, Вт/(м²)</p> <p>$q_{\text{вн.к}}$, Вт/(м²)</p> <p>$q_{\text{нар.к}}$, Вт/(м²)</p>	

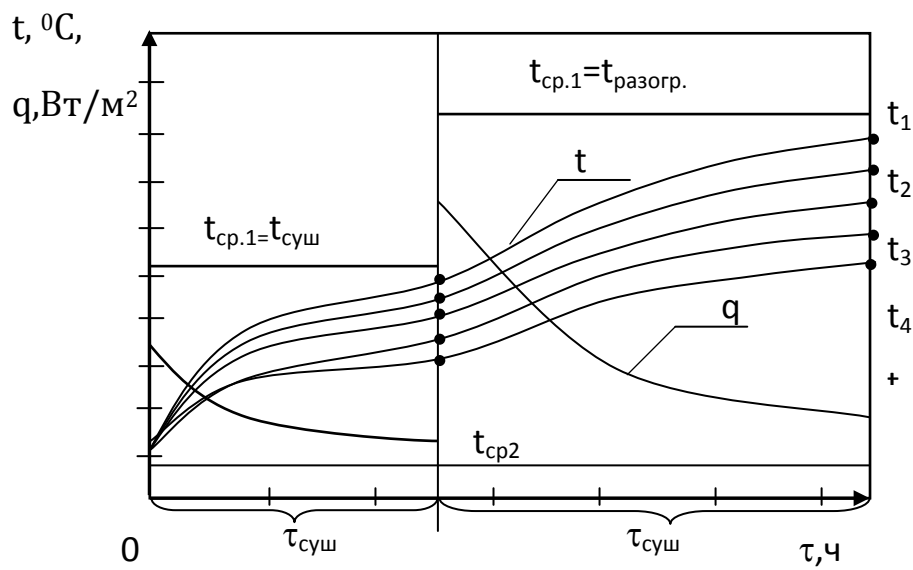


Рисунок 2.4 – Температурна та теплова діаграми сушки та розігріву сталерозливного ковшу

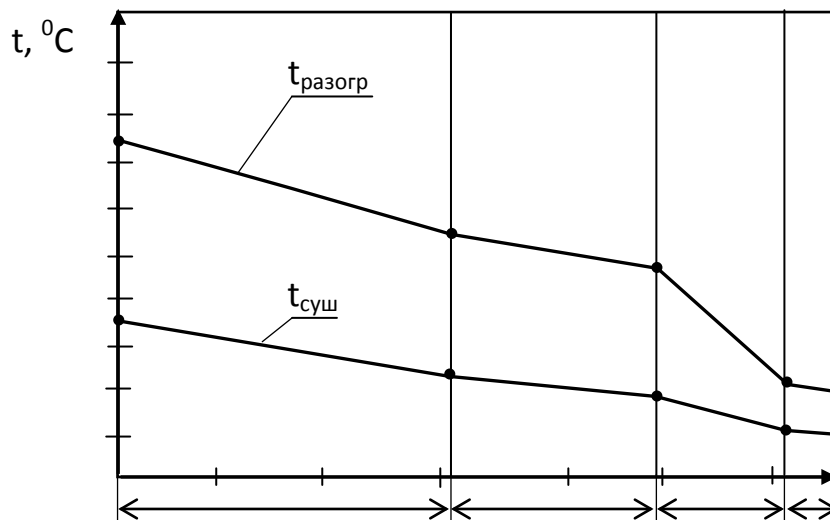


Рисунок 2.5 – Графік розподілу температур по перетину стінки

Приклади виконання графіків наведені у додатках І та К

2.3 Вивчення динаміки твердіння і охолодження безперервнолитої заготовки

Мета розрахунку - дослідження динаміки кристалізації і охолодження безперервнолитої заготовки і вибір найбільш раціонального теплового режиму вторинного охолодження.

2.3.1 Короткі теоретичні положення

Математичне моделювання є ефективним засобом дослідження і оптимізації будь-якої технології. Цей дослідницький прийом дає можливість в короткий термін отримати необхідну інформацію, не витрачаючи засобу на проведення промислових досліджень. Проте, математична модель відповідає не реальному об'єкту, який досліджується, а деякому ідеальному об'єкту, який отриманий за рахунок введення ряду спрощень в аналіз роботи реального об'єкту. Тому нові математичні моделі потребують перевірки результатів шляхом проведення промислових досліджень. Ця процедура називається перевіркою адекватності моделі. Математичні моделі, адекватність яких була доведена, можуть використовуватися для дослідження процесів і технологій.

Щодо технології безперервного розливання (схема високошвидкісний сортовий МБЛЗ приведена на рис. 2.6) завдання математичного моделювання полягає у визначенні поля температур заготовки і швидкості просування фронту твердіння залежно від розмірів заготовки і параметрів температурно-швидкісного режиму.

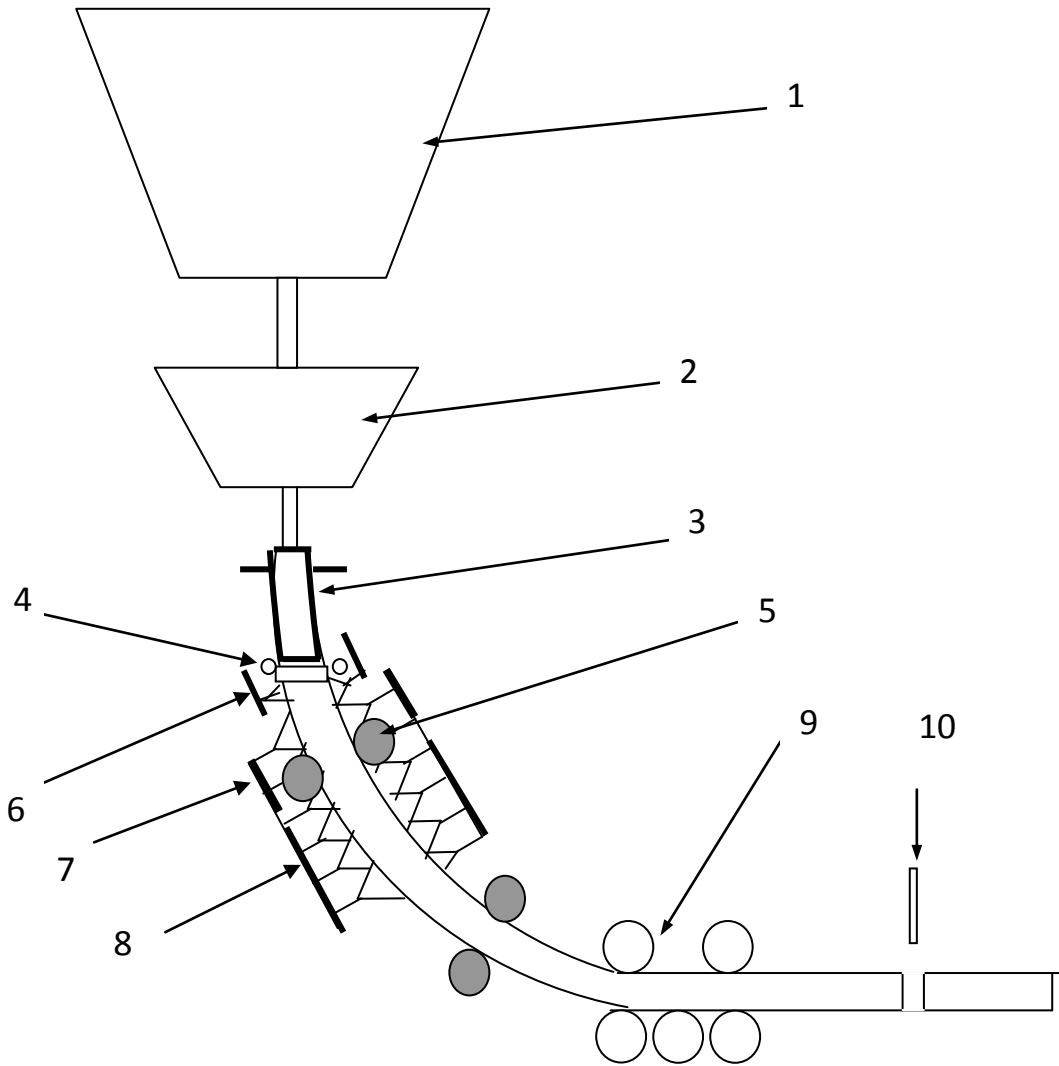


Рисунок 2.6 – Схема радіальної сортової МБЛЗ:

1 – сталерозливний ковш; 2 – проміжувочний ковш; 3 – кристалізатор; 4 – опорні роліки під кристалізатором; 5 – роліки, які підтримують заготовку; 6 – 1-й сектор зони вторинного охолодження; 7 – 2-й сектор зони вторинного охолодження; 8 – 3-й сектор зони вторинного охолодження; 9 – тягуще-правильний агрегат; 10 – газорізка.

На основі аналізу результатів математичного моделювання вибирають найбільш вигідні, з погляду заданих критеріїв, параметри температурно-швидкісного режиму. У складній системі рівнянь, які описують процеси твердіння, найбільш важливими є рівняння перенесення енергії і теплопровідності. У інженерній практиці використовують переважно спрощені моделі, які направлені на дослідження тільки теплових режимів формування безперервнолитої заготовки. В результаті введення ряду класичних припущень, завдання зводиться до визначення температурного поля розрахункового температурного перетину, який переміщається уздовж осі МБЛЗ із швидкістю витягування

В цьому випадку шукане температурне поле визначається на основі вирішення наступного диференціального рівняння:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho c_s} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \quad (55)$$

де ρ – густина металу, кг/м³;

$c_{\text{эф}}$ – ефективна теплоємність; яка враховує виділення тепла фазового переходу, Дж/(кг·К)

$\lambda_{\text{эф}}$ – ефективна теплопровідність; враховує вплив конвективних процесів рідкої лунки заготовки на теплообмінні процеси, Вт/(м·К).

$$c_{\text{эф}}(t) = \begin{cases} c_p(t) & \text{при } t > t_{\text{л}} \\ [(c_{\text{тв}}(t) + c_p(t))/2 + q_{\text{кр}} / (t_{\text{л}} - t_c)] & \text{при } t_c < t < t_{\text{л}}, \\ c_{\text{тв}}(t) & \text{при } t < t_c \end{cases}$$

де $t_{\text{л}}$, t_c – температури ліквідус і солідус відповідно, °С;

$q_{\text{кр}}$ – теплота кристалізації, Дж/кг;

ψ – частка твердої фази у розплаві.

$$\lambda_{\text{эф}}(t) = \begin{cases} \lambda_p(t) & \text{при } t > t_{\text{л}} \\ \lambda_{\text{тв}} \psi + \lambda_p(1 - \psi) & \text{при } t_c < t < t_{\text{л}}. \\ \lambda_{\text{тв}}(t) & \text{при } t < t_c \end{cases}$$

Умови однозначності в математичній моделі безперервного розливання сталі задаються таким чином.

Геометричні умови: використовують для визначення області простору, для якої виконується вирішення відповідних диференціальних рівнянь. Для запропонованої моделі такою областю є вся заготівка, яка знаходиться в кожен конкретний момент у межах МБЛЗ (починаючи від меніска до газорізки). Допущення, які зазвичай робляться при побудові моделей безперервного розливання дозволяють спростити процедуру пошуку рішення. У будь-який момент часу заготівку, що формується, можна представити як сукупність поперечних перетинів деякої товщини dx . Тоді пошук кінцевого рішення зводиться до рішення двомірної задачі нестационарної теплопровідності для деякого розрахункового перетину, який рухається уздовж осі МНЛЗ із швидкістю витягування і послідовно проходить через всі перетини, з яких складається заготівка (рис. 2.7).

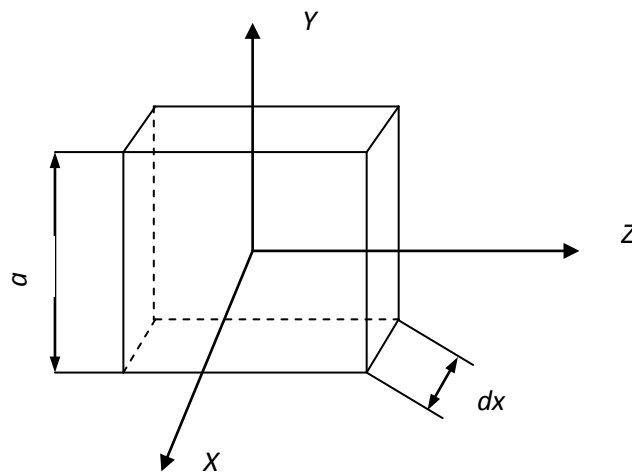


Рисунок 2.7 – Схема геометричних умов для рішення поставленої задачі

Прийняті наступні позначення осей: у поперечному перетині осями симетрії є осі Z і Y , а вісь X є подовжньою віссю МБЛЗ, уздовж якої рухається плоска система координат, яка утворена двома поперечними осями, з швидкістю, рівній швидкості витягування. При цьому між елементарними кроками за часом і уздовж осі X є наступне співвідношення: $dx = v_{\text{ВІТ}} dt$.

Початкові умови задають розподіл значень фізичних величин в області, що досліджується в початковий момент часу. В цій роботі задання початкових умов зводиться до визначення поля температур в «нульовий» момент часу, тобто на меніску. При цьому припускається, що температура рідкого метала однакова по перерізу і задається наступним чином:

$$-a/2 \leq y \leq a/2, -a/2 \leq z \leq a/2, \tau = 0: t = t_n, \quad (56)$$

де t_n – початкова температура сталі на меніску, що обирається в залежності від середньої температури металу в проміжному ковшу і особливостей розливки (відкритим чи закритим струменем під шлаком).

Граничні умови

Граничні умови визначаються особливостями фізичних процесів, що протікають на границі області, яка досліджується. Найбільш переважним є задання граничних умов третього роду на границі області, що досліджується. Нижче приведено вирази для випадку коли для кожної грані передбачено окреме завдання граничних умов.

$$\begin{aligned} y = -a/2, y = a/2: -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} &= \alpha(t_n - t_{cp}), \\ z = -a/2, z = a/2: -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} &= \alpha(t_n - t_{cp}), \end{aligned} \quad (57)$$

де t_n – температура поверхні заготовки, °С;

t_{cp} – температура охолоджуючої середи, °С;

α – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні заготовки до середи, що охолоджує, Вт/(м²·К);

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу заготовки, Вт/(м·К).

Основною проблемою при заданні граничних умов третього роду є визначення величини коефіцієнта тепловіддачі від поверхні заготовки до охолоджуючої середи. При заданних граничних умов поверхня заготовки

уздовж технологічної осі МБЛЗ розбивається на три зони з якісно різними закономірностями теплообміну:

кристалізатор;

зона вторинного форсуночного охолодження;

охолодження на повітрі.

Визначення значень коефіцієнтів тепловіддачі для кожної з названих зон залежить від багатьох конструктивних ознак. Так для кристалізатора значення коефіцієнта тепловіддачі залежить від матеріалу стінок кристалізатора, їх товщини, механізму теплообміну з кіркою заготовки (контактний механізм або через газовий зазор), параметрів охолоджувача. В зоні вторинного охолодження значення коефіцієнта тепловіддачі визначається в залежності від виду теплоносія (вода або паро-водяна суміш) типу форсунок, тиску теплоносія, його витрати, розмірів факелів форсунок. В зоні вільного охолодження на повітрі тепловіддача протікає одночасно за конвективним та радіаційним механізмами і переважно визначається температурою поверхні заготовки.

2.3.2 Методичні вказівки до виконання роботи

В цій роботі необхідно дослідити вплив розподілу коефіцієнтів тепловіддачі від поверхні заготовки по секторах зони вторинного охолодження на температурне поле заготовки за допомогою типової математичної моделі безперервної розливки сталі. В загальному випадку аргументами для розрахунку є марка сталі з залежністю її теплофізичних властивостей від температури (значення температур ліквідус і солідус; залежність щільності, теплопровідності, теплоємності твердої та рідкої сталі від температури), розмір заготовки, швидкість розливки, значення коефіцієнтів тепловіддачі в кристалізаторі, по секторах вторинного охолодження, в зоні вільного охолодження.

Задачею всіх варіантів є дослідження впливу інтенсивності вторинного охолодження на температурне поле заготовки з марки сталі 20. У програму

введено залежність теплофізичних властивостей цієї марки сталі від температури. Середній коефіцієнт тепловіддачі у кристалізаторі для всіх варіантів задано $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а в зоні вільного охолодження $130 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Відраховані від меніска металу в кристалізаторі координати вихідного зрізу кристалізатора, кінців 1-го, 2-го і 3-го секторів ЗВО, а також кінця ділянки на якій вивчається формування заготовки складають для всіх варіантів відповідно 0,9, 1,45, 3,55, 7,35 і 14 м. Для кожного з варіантів в якості індивідуальних даних задано розмір заготовки, швидкість розливки, набір коефіцієнтів тепловіддачі для 1-го (α_1), 2-го (α_2) і 3-го (α_3) секторів зони вторинного охолодження.

Нижче наведен наступній алгоритм роботи:

1. Для визначення часу досягнення розрахунковим перетином названих границь використовуємо наступну залежність:

$$\tau = \frac{L_{\text{зад}}}{v} \cdot 60 \quad (\text{передбачається, що координата задається у метрах, а}$$

розмірність швидкості м/хв).

2. Студентом самостійно визначається необхідна кількість кроків по часу для того, щоб при заданій швидкості розливки і ширині кроку по часу вивчати формування заготовки на 14 м від меніску металу в кристалізаторі.

$$N_{\text{steps}} = \frac{L \cdot 60}{v \cdot dt}, \quad (58)$$

де $L=14$ – задана довжина відпізку технологічної осі, на якій вивчається формування заготовки, м;

v – швидкість розливки, м/хв;

dt – ширина кроку по часу, с

Визначене значення числа кроків задається першим в діалоговому боксі, далі задаються розмір заготовки, швидкість розливки (при заданні її необхідно перевести з м/хв на м/с), коефіцієнти тепловіддачі по секторах (Додаток В).

4. Результати розрахунків динамічно оновлюються на екрані, при цьому програма робить зупинку через кожні розглянуті 10 с формування заготовки

для того, щоб студент мав змогу записати значення температури і товщини кірки металу (Додаток Б). За допомогою програми виводиться значення температур трьох точок на поверхні заготовки (середина грані, четверть грані, кут грані).

5. Записані температури використовують для побудови температурних графіків на міліметрівці.

6. Кожному студенту необхідно, вводячи відповідні дані в програму, провести шість чисельних експериментів (для шести наборів коефіцієнтів тепловіддачі таб.2.5) і індивідуальних значень розміру заготовки і швидкості розливки. Індивідуальні вихідні дані наведено у додатку А3.

Таблиця 2.5 – Варіанти коефіцієнтів тепловіддачі у зонні вторинного охолодження

№	1-й сектор	2-й сектор	3-й сектор
1	α_1	α_2	α_3
2	$1,1 \cdot \alpha_1$	$1,1 \cdot \alpha_2$	$1,1 \cdot \alpha_3$
3	$1,2 \cdot \alpha_1$	$1,2 \cdot \alpha_2$	$1,2 \cdot \alpha_3$
4	$0,9 \cdot \alpha_1$	$0,9 \cdot \alpha_2$	$0,9 \cdot \alpha_3$
5	$0,8 \cdot \alpha_1$	$0,8 \cdot \alpha_2$	$0,8 \cdot \alpha_3$
6	$0,7 \cdot \alpha_1$	$0,7 \cdot \alpha_2$	$0,7 \cdot \alpha_3$

2.3.3 Представлення та аналіз результатів

По результатам чисельних експериментів необхідно побудувати шість серій температурних кривих (кут, середня і четвертина грані заготовки) по дві серії на кожному листі міліметрівки А4. Далі студент повинен зробити аналіз впливу інтенсивності вторинного охолодження на температурне поле

заготовки. Приклад відтворення розрахункової інформації в графічному вигляді приведено на рисунку 2.8.

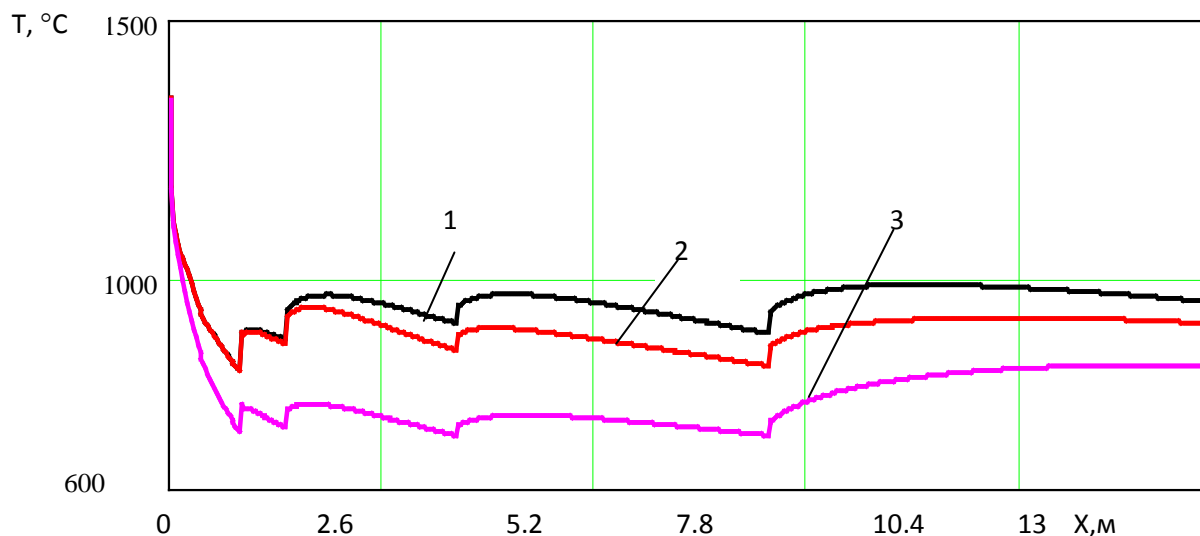


Рисунок 2.8 – Приклад графічного відтворення результатів розрахунків (1 – температура центра грані, 2 – температура четверті грані, 3 – температура кута грані)

Нижче дається короткий аналіз інформації приведеної на рисунку 2.8. Температура центра грані завжди вища за температура інших точок. В межах зони вторинного охолодження вона коливається в межах 850 –970 °C. При переходах між кристалізатором і ЗВО, а також між секторами ЗВО, а також між ЗВО і зоною вільного охолодження мають місце стрибки температури середини грані величиною до 50°C. На початку зони вільного охолодження температура середини грані плавно зростає до 1000 °C, а далі плавно спадає. Температура четверті грані веде себе аналогічно і завжди є меншою від температури середини грані на величину порядку 60-70 °C. Температура кута є досить постійною величиною в межах ЗВО і складає порядку 700 °C. Але темп розігріву цієї точки в зоні вільного охолодження є найбільшим.

Порівнюючи між собою серії температурних кривих для різних варіантів охолодження треба звернути увагу на їх середню величину, ступінь рівномірності, співвідношення між собою. Найбільш вигідним є варіант, при

якому температури всіх точок різняться як умова менше, стрибки температури мінімальні і загальний температурний рівень середини грані складає порядку 950-1050°C.

Таким чином об'єм відповідного розділу курсової роботи повинен скласти 8-9 аркушів: 3-4 аркуші повинні містити схему МБЛЗ, опис основ математичної моделі безперервної розливки, 3 аркуші містять графічне представлення результатів розрахунків і два-три аркуші аналіз отриманих температурних кривих з висновками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Парахин Н.Ф., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Топливо и теория горения. – Севастополь – Донецк: Вебер, 2003. – 170 с.
2. Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Вопросы тепло- и массопереноса в материалах, нагрева и охлаждения металла. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 162с.
3. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. – М.: Metallurgiya, 1975. – 388 с.
4. Гінкул С.І., Шелудченко В.І., Кравцов В.В. Збірник алгоритмів і програм для розв'язування теплотехнічних задач. – Донецьк: Вебер, 2003. – 287с.
5. Ковалев Г.М. Конспект лекций по курсу Технология разливки стали в изложницы. – Донецк: ДонНТУ – 2005. – 161с.
6. Процессы непрерывной разливки стали: Монография / Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А., Момот С.В., Белобров Ю.И. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536с.
7. Власов Н.Н., Корроль В.В., Радя В.С. Справочник по разливке черных металлов. – М.: Metallurgiya, 1981. – 240с.

Додаток А1

Таблиця А1 – Вихідні данні для розрахунку горіння палива

№ вар.	Склад палива, %								Воло- гість
	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	H ₂ S	H ₂	N ₂	O ₂	W, г/м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0,3	0,1	98,0	0,3	-	0,5	0,5	0,3	15
2	0,6	0,3	93,0	0,3	-	2,0	3,0	0,8	15
3	10,2	5,5	54,0	0,3	-	2,0	27,8	0,2	25
4	20,6	6,0	25,0	0,1	0,1	1,2	47,0	-	35
5	24,5	6,2	23,2	0,1	0,1	1,1	44,8	-	40
6	0,7	0,3	92,0	0,3	-	3,0	3,0	0,7	15
7	12,0	5,5	51,2	0,2	-	0,8	30,2	0,1	25
8	20,0	6,0	25,6	0,2	0,1	1,1	47,0	-	35
9	12,2	5,3	51,1	0,2	-	0,8	30,3	0,1	25
10	20,2	6,4	25,2	0,1	0,1	1,2	46,8	-	35
11	0,6	0,2	94,0	0,4	-	2,0	2,0	0,8	15
12	24,8	6,1	23,1	0,1	0,1	1,1	44,7	-	35
13	24,3	6,3	22,9	0,1	0,1	1,4	44,9	-	40
14	21,6	6,0	24,0	0,1	0,1	1,3	46,9	-	30
15	24,3	6,2	23,1	0,1	0,1	1,0	45,2	-	40
16	0,6	0,3	93,0	0,3	-	2,0	3,0	0,8	15
17	23,6	6,2	23,1	0,1	0,1	1,1	45,8	-	40
18	20,4	6,2	20,0	0,1	0,1	1,2	52,0	-	25
19	18,6	8,0	27,0	0,1	0,1	1,2	45,0	-	30
20	0,7	0,3	93,1	0,3	-	2,0	2,9	0,7	15
21	0,6	0,3	95,0	0,3	-	1,0	2,0	0,8	15
22	24,7	6,1	23,0	0,1	0,1	1,2	44,8	-	40
23	20,4	6,2	22,9	0,1	-	1,2	49,1	0,1	35
24	24,6	4,0	23,0	0,1	-	1,2	47,0	0,1	25
25	21,5	6,1	24,0	0,1	0,1	0,9	47,3	-	25
26	23,4	5,2	23,0	0,1	0,1	1,3	46,9	-	30
27	0,5	0,3	96,0	0,2	-	1,0	1,5	0,5	15
28	19,6	7,0	25,0	0,1	0,1	1,2	47,0	-	35
29	19,1	6,1	25,4	0,1	0,1	1,2	48,0	-	30
30	23,6	6,0	23,0	0,1	0,2	1,1	46,0	-	35

Продовження табл. А1 - Вихідні данні для розрахунку горіння палива

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
31	0,5	0,2	97,0	0,3	-	1,0	0,5	0,5	15
32	20,0	5,5	25,6	0,1	0,1	1,1	47,5	0,1	30
33	18,5	8,1	27,1	0,1	0,1	1,2	44,9	-	30
34	0,8	0,2	93,2	0,3	-	2,0	2,8	0,7	15
35	0,7	0,2	94,5	0,3	-	1,0	2,5	0,8	15
36	25,7	8,1	22,0	0,1	0,1	1,2	42,8	-	40
37	20,5	6,3	22,7	0,1	-	1,2	49,1	0,1	35
38	25,1	4,0	23,0	0,1	-	1,2	46,5	0,1	30
39	0,4	0,2	98,0	0,3	-	0,5	0,5	0,1	15
40	0,5	0,4	94,0	0,3	-	2,0	2,0	0,8	15
41	11,2	5,5	53,0	0,3	-	2,1	27,8	0,1	25
42	20,5	6,1	24,0	0,1	0,1	1,2	48,0	-	35
43	24,7	6,1	23,1	0,1	0,1	1,0	44,9	-	40
44	0,8	0,3	92,0	0,3	-	3,0	2,9	0,7	15
45	12,2	5,4	51,1	0,2	-	0,8	30,2	0,1	20
46	20,1	6,1	25,5	0,2	0,1	1,1	46,9	-	30
47	12,3	5,4	51,0	0,2	-	0,8	30,2	0,1	25
48	20,5	6,0	25,3	0,1	0,1	1,2	46,8	-	35
49	0,7	0,2	94,0	0,3	-	2,0	2,0	0,8	15
50	23,5	5,8	23,1	0,1	0,1	1,5	45,9	-	35
51	21,4	6,2	20,0	0,1	0,1	1,2	51,0	-	30
52	16,6	8,0	28,0	0,1	0,1	1,2	46,0	-	25
53	0,7	0,3	93,2	0,3	-	2,0	2,8	0,7	15
54	0,6	0,2	95,0	0,3	-	1,0	2,0	0,9	15
55	20,5	7,1	24,1	0,1	0,1	0,8	47,3	-	25
56	24,4	4,2	23,5	0,1	0,1	1,3	46,4	-	30
57	0,6	0,2	96,1	0,2	-	1,0	1,6	0,5	15
58	19,8	7,0	25,0	0,1	0,1	1,2	46,8	-	35
59	19,2	6,2	25,2	0,1	0,1	1,1	48,1	-	30
60	23,7	5,9	23,3	0,1	0,2	1,1	45,7	-	35

Додаток А2

Таблиця А2 – Вихідні данні для розрахунку сушки та розігріву сталерозливного ковшу

№ вар	Внутр. висота, м	Товщина шарів стінки ковша, мм				Матеріал шару стінки ковша				Тем-ра сушки, °С	Тем-ра розігріву, °С	Внут. діаметр, м
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	Робочий шар*	арматур. шар**	теплоізол. шар***	кожух****			
						S ₁	S ₂	S ₃	S ₄			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	3,0	150	30	105	15	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 20	450	1000	2,5
2	5,2	200	55	140	40	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 40	550	1200	4,8
3	4,7	220	65	150	40	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 20	550	1020	4,4
4	4,0	160	40	110	30	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 20	450	1040	3,6
5	2,9	160	35	105	20	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 40	450	1060	2,5
6	3,5	180	40	130	30	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 20	550	1080	3,2
7	5,0	210	65	120	40	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 20	450	1100	4,8
8	3,1	170	30	105	20	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	550	1120	2,8
9	4,8	220	60	130	40	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 20	550	1140	4,6
10	3,2	180	45	105	25	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 40	450	1160	2,8
11	4,2	190	50	110	20	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 40	450	1200	3,0
12	3,3	160	30	130	20	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 20	550	1180	2,6
13	4,1	200	55	105	30	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	500	1200	3,4
14	5,3	220	100	120	40	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 40	550	1000	4,8
15	3,2	160	45	100	15	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	500	1020	2,5
16	3,4	170	35	120	15	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	450	1080	2,8
17	4,8	190	55	140	30	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 20	500	1060	4,3
18	2,9	150	30	120	15	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	550	1120	2,5
19	5,3	210	90	140	40	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 20	500	1140	4,6
20	4,6	190	55	150	40	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	500	1120	3,9
21	5,2	210	65	135	35	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	500	1080	4,5
22	4,0	190	60	140	20	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	550	1180	3,2
23	3,4	160	45	100	25	Хр.	Мл.	Ог. л-вес	Ст 20	500	1000	2,8
24	3,6	150	30	110	20	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	450	1200	2,7
25	3,3	170	35	105	20	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 20	550	1100	2,6
26	3,5	150	30	105	20	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 20	500	1200	2,6
27	3,8	190	40	120	20	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	550	1080	2,9
28	5,6	210	70	135	35	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	450	1140	4,4
29	5,4	220	80	140	40	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	500	1000	4,6
30	4,1	170	40	110	15	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 40	500	1060	2,8

* - Хр - хромітова цегла

** - Мл. – мулітова цегла

Шм. – шамотна цегла

*** - П-шм1 – пеношамот (1)

- П-шм2 – пеношамот (2)

- Вог. л-віс – вогнетривкий легковіс

**** - Ст 20, Ст 40 - Сталь 20, Сталь40.

Продовження табл. А2 - Вихідні данні для розрахунку сушки та розігріву сталерозливного ковшу

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
31	3,3	150	55	105	30	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 40	550	1040	2,6
32	3,8	150	30	105	20	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 20	450	1160	2,5
33	5,0	200	60	140	40	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 20	550	1180	4,4
34	5,2	220	60	140	35	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	550	1040	4,5
35	4,2	150	45	120	20	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 20	450	1000	2,7
36	5,5	220	60	130	40	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	500	1200	4,7
37	4,1	180	45	120	20	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	550	1100	3,5
38	4,0	190	60	150	20	Хр.	Мл.	П-шм.2	Ст 20	500	1040	3,3
39	3,7	160	30	140	20	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 20	450	1140	2,8
40	5,4	200	55	105	30	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 40	550	1180	4,6
41	5,3	220	65	150	40	Хр.	Мл.	П-шм.2	Ст 20	500	1060	4,5
42	4,2	180	45	130	25	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 20	450	1020	3,6
43	4,9	190	50	105	20	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	500	1120	4,2
44	4,7	160	30	130	20	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 20	550	1160	4,0
45	4,9	200	55	130	30	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	500	1200	4,4
46	3,3	150	65	110	15	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	450	1000	2,6
47	3,7	170	70	105	20	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 20	550	1000	2,9
48	3,8	150	30	105	15	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	450	1060	2,8
49	5,0	200	55	140	40	Хр.	Шм.	П-шм.1	Ст 20	500	1040	4,2
50	5,6	220	65	150	40	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	550	1020	4,7
51	4,1	160	40	135	30	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 20	450	1120	3,1
52	3,9	160	35	140	15	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	500	1160	2,9
53	4,3	180	40	120	30	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 20	450	1080	3,5
54	3,5	150	35	130	15	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	550	1200	2,6
55	4,8	210	85	120	40	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 40	450	1040	4,2
56	4,5	190	55	130	40	Хр.	Мл.	Вог. л-віс	Ст 20	550	1000	3,6
57	5,2	210	60	135	35	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 20	500	1100	4,3
58	4,2	190	60	150	20	Хр.	Шм.	Вог. л-віс	Ст 40	500	1140	3,2
59	3,2	150	30	135	20	Хр.	Мл.	П-шм.1	Ст 20	550	1100	2,7
60	5,3	210	95	150	40	Хр.	Шм.	П-шм.2	Ст 40	450	1100	4,5

Додаток А3

Таблиця А3 – Вихідні дані для розрахунку температурного полю заготовки в залежності від інтенсивності охолодження

№ вар.	Розмір заготовки, м	Швидкість розливки, м/хв	Коефіцієнт тепловіддачі для 1-го сектора, Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі для 2-го сектора, Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі для 3-го сектора, Вт/(м ² ·К)
1	2	3	4	5	6
1	0,15	3,0	1000	600	450
2	0,13	3,5	1100	600	400
3	0,125	3,6	1050	550	400
4	0,12	3,6	1100	700	500
5	0,1	4,2	1150	700	450
6	0,125	3,5	1050	650	450
7	0,12	3,7	1000	550	450
8	0,15	2,9	1100	650	400
9	0,13	3,4	1050	600	450
10	0,125	3,6	1000	550	400
11	0,15	3,1	1080	590	430
12	0,1	4,5	1110	630	450
13	0,13	3,5	1100	640	440
14	0,12	3,7	1070	610	450
15	0,15	3,2	1090	600	400
16	0,12	3,4	1100	550	410
17	0,125	3,3	1020	510	390
18	0,13	3,2	1040	550	400
19	0,1	4,0	1050	540	410
20	0,15	2,8	1040	530	420
21	0,12	3,6	1100	550	410
22	0,15	3,0	1020	510	390
23	0,1	4,2	1040	550	400
24	0,13	3,7	1000	600	450
25	0,125	3,9	1100	600	400
26	0,13	3,5	1050	550	400
27	0,15	3,0	1100	700	500
28	0,13	3,8	1100	700	500
29	0,12	4,0	1150	700	450
30	0,125	3,9	1050	650	450

Продовження табл. А3 - Вихідні данні для розрахунку температурного поля заготовки в залежності від інтенсивності охолодження

1	2	3	4	5	6
31	0,1	3,2	1050	550	450
32	0,13	4,0	1100	590	440
33	0,12	2,8	1100	630	450
34	0,15	3,6	1150	640	400
35	0,12	3,0	1050	610	410
36	0,125	4,2	1100	600	450
37	0,13	3,7	1050	550	400
38	0,1	3,6	1000	510	400
39	0,15	4,2	1080	550	500
40	0,12	3,5	1110	540	450
41	0,12	3,7	1100	530	450
42	0,125	2,9	1100	550	450
43	0,13	3,4	1050	510	400
44	0,1	3,6	1100	550	450
45	0,15	3,1	1100	600	400
46	0,12	3,0	1150	600	410
47	0,15	3,5	1050	550	420
48	0,1	3,6	1000	700	410
49	0,12	3,6	1100	700	410
50	0,1	4,2	1050	700	420
51	0,15	3,5	1100	650	410
52	0,13	3,7	1150	650	390
53	0,125	2,9	1050	600	410
54	0,12	3,0	1000	550	390
55	0,1	3,5	1100	590	400
56	0,125	3,6	1050	630	410
57	0,12	3,0	1000	640	420
58	0,15	3,8	1080	610	410
59	0,13	4,0	1110	600	450
60	0,125	3,9	1100	550	400

Додаток Б1

Таблиця Б1 – Теплофізичні властивості вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів

№ п/п	Матеріал	Властивості, вимірювання		
		теплопровідність, λ , Вт/(м·К)	щільність, ρ , г/см ³	теплоємність, с, кДж/(кг·К)
1.	Пеношамот (1)	$0,28+1,7 \cdot 10^{-4} \cdot t_{cp}$	0,95	0,837
	Пеношамот (2)	$0,10+1,45 \cdot 10^{-4} \cdot t_{cp}$	0,6	0,837
2.	Вогнетривкий легковіс	$0,14+2,7 \cdot 10^{-4} \cdot t_{cp}$	0,75	0,837
3.	Хромітова цегла	$1,28+0,41 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}$	3,8-4,2	$0,84+0,29 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}$
4.	Мулітова цегла	$1,69-0,23 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}$	2,8-3,0	$0,84+0,25 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}$
5.	Шамотна цегла	$0,84-0,58 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}$	2,54-2,64	$0,88+0,23 \cdot 10^{-3} \cdot t_{cp}$

Додаток Б2

Таблиця Б2 – Теплофізичні властивості сталі

№ вар.	Тем-ра, °С	Властивості, вимірювання					
		теплопровідність, λ , Вт/(м·К)		щільність, ρ , г/см ³		теплоємність, c , кДж/(кг·К)	
		Сталь 20	Сталь 40	Сталь 20	Сталь 40	Сталь 20	Сталь 40
1	0	51,9	51,9	7,863	7,858	-	-
2	50	51,5	51,5	7,849	7,845	-	-
3	100	51,1	50,6	7,834	7,832	0,486	0,486
4	150	49,9	49,8	7,819	7,817	0,494	0,494
5	200	48,5	48,1	7,803	7,801	0,502	0,498
6	250	46,5	46,9	7,787	7,784	0,511	0,507
7	300	44,4	45,6	7,770	7,766	0,519	0,515
8	350	43,6	44,3	7,753	7,748	0,528	0,523
9	400	42,7	41,9	7,736	7,730	0,540	0,532
10	450	41,1	40,0	7,718	7,711	0,548	0,544
11	500	39,3	38,1	7,699	7,692	0,561	0,557

Додаток Б3

Таблиця Б3 – Залежність i від t для природного, коксового газів та їх сумішей

$Q_H^p > 12 \text{ МДж/м}^3$		$Q_H^p = 8 \div 12 \text{ МДж/м}^3$		$Q_H^p < 8 \text{ МДж/м}^3$	
$t, ^\circ\text{C}$	$i, \text{кДж/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$i, \text{кДж/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$i, \text{кДж/м}^3$
100	150	100	150	100	150
200	250	200	230	200	250
300	450	300	350	300	400
400	700	400	600	400	600
500	800	500	750	500	750
600	900	600	900	600	900
700	1150	700	1150	700	1150
800	1250	800	1250	800	1200
900	1400	900	1400	900	1380
1000	1650	1000	1600	1000	1600
1100	1750	1100	1750	1100	1700
1200	1900	1200	1900	1200	1900
1300	2100	1300	2150	1300	2150
1400	2250	1400	2270	1400	2300
1500	2500	1500	2500	1500	2550
1600	2700	1600	2700	1600	2700
1700	2900	1700	2850	1700	2950
1800	3100	1800	3150	1800	3200
1900	3350	1900	3350	1900	3450
2000	3600	2000	3650	2000	3700
2100	3850	2100	3950	2100	4000
2200	4200	2200	4250	2200	4300
2300	4500	2300	4650	2300	4700
2400	4800	2400	5000	2400	5400

Додаток Б4

Таблиця Б4– Середні теплоємкості газів C_{cp} , кДж/(м³К)

t, °C	O ₂	N ₂	CO	H ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	CH ₄	Воздух сухой	C ₂ H ₄	H ₂ S	C ₂ H ₆
0	1,306	1,294	1,298	1,277	1,599	1,495	1,733	1,549	1,298	1,825	1,507	2,211
100	1,319	1,298	1,302	1,289	1,700	1,507	1,813	1,641	1,302	2,064	1,532	2,495
200	1,336	1,298	1,306	1,298	1,788	1,524	1,888	1,758	1,306	2,282	1,562	2,776
300	1,357	1,306	1,315	1,298	1,863	1,541	1,955	1,888	1,315	2,495	1,595	3,044
400	1,377	1,315	1,327	1,302	1,930	1,566	2,018	2,014	1,327	2,688	1,633	3,308
500	1,398	1,327	1,344	1,306	1,989	1,591	2,060	2,139	1,344	2,864	1,671	3,555
600	1,415	1,340	1,357	1,310	2,043	1,616	2,114	2,261	1,357	3,027	1,780	3,776
700	1,436	1,352	1,373	1,315	2,089	1,641	2,152	2,378	1,369	3,178	1,746	3,986
800	1,449	1,365	1,386	1,319	2,098	1,666	2,181	2,504	1,382	3,308	1,784	4,174
900	1,465	1,377	1,398	1,323	2,169	1,696	2,215	2,600	1,398	3,433	1,817	4,363
1000	1,478	1,390	1,411	1,331	2,202	1,725	2,236	2,700	1,411	3,546	1,851	4,530
1100	1,491	1,403	1,424	1,336	2,236	1,750	2,261	2,788	1,424	3,655	1,884	4,685
1200	1,503	1,415	1,436	1,344	2,265	1,775	2,278	2,864	1,432	3,751	1,909	4,827
1300	1,511	1,424	1,449	1,352	2,290	1,805	2,299	2,889	1,444	-	-	-
1400	1,520	1,436	1,457	1,361	2,315	1,830	2,319	2,960	1,453	-	-	-
1500	1,528	1,444	1,465	1,369	2,336	1,855	2,340	3,044	1,470	-	-	-
1600	1,537	1,453	1,474	1,373	2,374	1,876	2,361	-	1,478	-	-	-
1700	1,545	1,461	1,482	1,382	2,374	1,901	2,382	-	1,486	-	-	-
1800	1,553	1,470	1,491	1,390	2,391	1,922	-	-	1,492	-	-	-
1900	1,562	1,474	1,499	1,398	2,407	1,943	-	-	1,499	-	-	-
2000	1,570	1,482	1,503	1,407	2,424	1,964	-	-	1,507	-	-	-
2100	1,574	1,491	1,511	1,415	2,437	1,985	-	-	1,516	-	-	-
2200	1,583	1,495	1,516	1,424	2,449	2,001	-	-	1,520	-	-	-
2300	1,591	1,503	1,520	1,432	2,462	2,018	-	-	1,624	-	-	-
2400	1,595	1,507	1,528	1,436	2,470	2,035	-	-	1,532	-	-	-
2500	1,604	1,511	1,532	1,444	2,483	2,052	-	-	1,537	-	-	-
2600	1,608	1,520	1,537	1,453	2,520	2,068	-	-	1,545	-	-	-
2700	1,616	1,528	1,545	1,461	2,533	2,085	-	-	1,553	-	-	-
2800	1,624	1,537	1,553	1,465	2,546	2,102	-	-	1,557	-	-	-
2900	1,629	1,545	1,562	1,474	2,558	2,114	-	-	1,566	-	-	-
3000	1,637	1,549	1,570	1,482	2,571	2,127	-	-	1,570	-	-	-

Додаток В
Діалогове вікно для введення вихідних даних

INITIAL DATA INPUT

specify number of time steps (dtau=0.5s) n_steps=___

specify billet cross-section dimension (m) a_sl = _____

specify casting speed (m/s) v= _____

heat transfer coefficient for the 1-st sector $W/(m^2 \cdot K)$ alp1= ___

heat transfer coefficient for the 2-nd sector $W/(m^2 \cdot K)$ alp2= ___

heat transfer coefficient for the 3-d sector $W/(m^2 \cdot K)$ alp3= ___

Переклад вікна українською

Введення вихідних даних

Введіть кількість кроків по часу (dtau=0.5с) n_steps=___

Введіть розмір поперечного перерізу заготовки (м) a_sl = _____

Введіть швидкість розливки (м/с) v= _____

Коефіцієнт тепловіддачі для 1-го сектора $Вт/(м^2 \cdot К)$ alp1= ___

Коефіцієнт тепловіддачі для 2-го сектора $Вт/(м^2 \cdot К)$ alp2= ___

Коефіцієнт тепловіддачі для 3-го сектора $Вт/(м^2 \cdot К)$ alp3= ___

Додаток Д
Вікно виведення результатів розрахунку

TIME MOMENT, S 25.00

COORDINATE, M 1.45

solid rim thickness, m 0.0143

temperature of center of the bar side 997.22

temperature of quarter of the bar side 986.05

temperature of corner of the bar side 704.25

Переклад вікна українською

МОМЕНТ ЧАСУ, С 25.00

КООРДИНАТА, М 1.45

Товщина твердої кірки, м 0.0143

Температура середини поверхні грані 997.22

Температура чвертини поверхні грані 986.05

Температура кута поверхні грані 704.25

Додаток Ж
Зразок виконання титульного листу

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД

Кафедра “ТЕХНІЧНА ТЕПЛОФІЗИКА”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до курсової роботи з дисципліни

“Теплотехніка”

Керівник:

к.т.н., доц. каф. ТТ

(підпис, дата)

(Ф.І.П. керівника)

Розробив

ст.гр. МЧМ-08

(підпис, дата)

(Ф.І.П студента)

2010

Додаток 3
Зразок виконання реферату

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 46 сторінок, 19 таблиць, 3 рисунка та 3 посилання.

Об'єктом дослідження є сталерозливний ковш.

Ціль роботи – виконання розрахунку спалювання газоподібного палива, дослідження теплотехнічних процесів у сталерозливному ковші, що виникають при підготовці його до розливання сталі, а саме під час сушіння та розігріву, а також дослідження кристалізації та охолодження безперервнолитої заготівки.

Метод дослідження – інженерний.

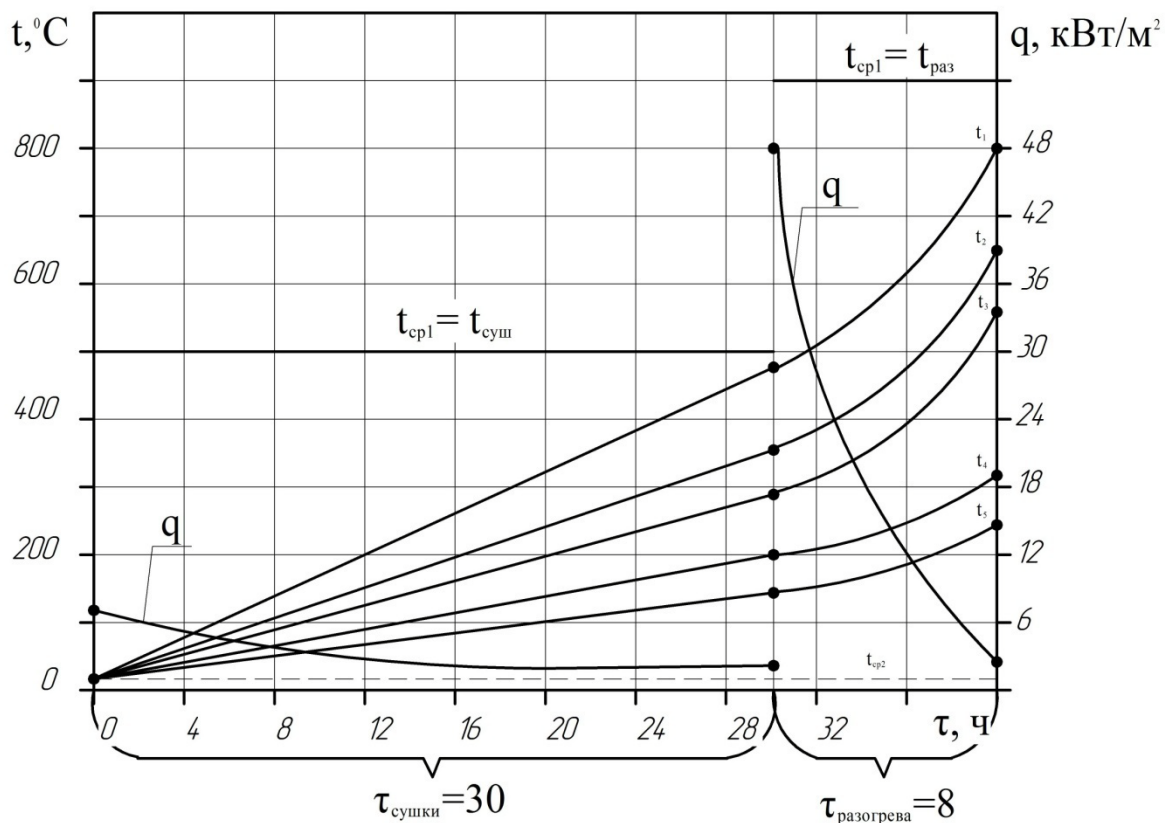
При виконанні цього проекту проведений розрахунок спалення газоподібного палива, визначені радіаційні характеристики, розраховано час сушіння та розігріву сталерозливного ковша при підготовці його для прийому рідкого металу, виконано дослідження кристалізації та охолодження безперервнолитої заготівки.

ПАЛИВО, СУШІННЯ, РОЗІГРІВ, СТАЛЕРОЗЛИВНИЙ КІВШ, ОБМУРІВКА, ЗАГОТІВКА, ОХОЛОДЖЕННЯ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ.

					Д 050401.49.06.461КР			
Ізм	Лист	№документа	Підпис	Дата	Пояснювальна записка	Літ.	Лист	Листів
Розроб.						У	3	46
Консульт.						ДонНТУ, каф. ТТ гр. МЧМ 08		
Керівник								
Н. Контр.								

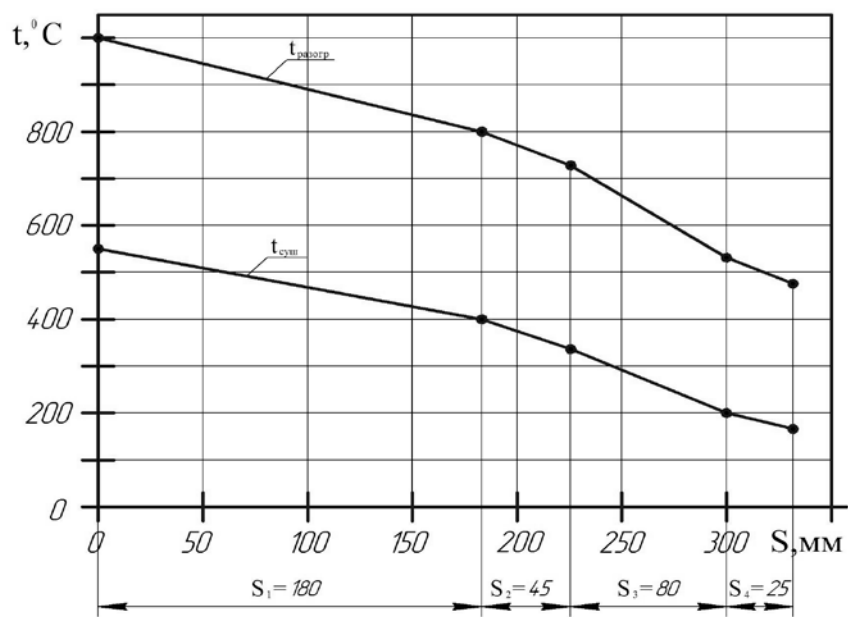
Додаток І

Температурна та теплова діаграми сушки та розігріву сталерозливного ковшу



Додаток К

Графік розподілу температур по перетину стінки сталерозливного ковшу
наприкінці періоду сушки та розігріву



Методичні вказівки
до курсової роботи
з дисципліни «Теплотехніка»
(для студентів спеціальності 6.050401 «Металургія чорних металів»)

Укладачі:

Курбатов Юрій Леонідович,
кандидат технічних наук, професор
Новікова Олена Вікторівна,
кандидат технічних наук, доцент
Бірюков Олексій Борисович,
кандидат технічних наук, доцент
Василенко Юлія Євгенівна,
асистент