

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра Матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри М та ЛВ
к.т.н., доц. Олександр КУЗИК
(прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026 __ р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

«Проектування і розрахунок полум'яної методичної печі для деталей із сталі 20»

«Design and calculation of a flame methodical furnace for parts made of steel 20»

Виконав: здобувач вищої освіти 4-го курсу
групи МЗ-23мб

Дмитро Літвінов

(прізвище та ініціали)

ОПП «Прикладне матеріалознавство
та інжиніринг»

спеціальності G8 «Матеріалознавство»

Керівник роботи:

к.т.н., доц.

Олександр СКРИПНИК

(прізвище та ініціали)

Рецензент:

к.т.н., доц.

(прізвище та ініціали)

Кропивницький – 2026

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет

Кафедра
Рівень вищої освіти
Галузь знань
Спеціальність
Освітньо-професійна
програма

Механіко-технологічний
Матеріалознавства та ливарного виробництва
перший (бакалаврський)
G Інженерія, виробництво та будівництво
G8 Матеріалознавство
Прикладне матеріалознавство та інжиніринг

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри М та ЛВ

Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2026 ____ р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Літвінов Дмитро Леонідович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектування і розрахунок полум'яної методичної печі для деталей із сталі 20
2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр СКРИПНИК
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "13" 03 2026 року № 166-02
3. Строк подання роботи до захисту 17.06.2026
4. Вихідні дані до роботи – завдання на бакалаврську роботу,
– матеріали переддипломної практики;
– державні стандарти та технічні нормативи
5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей, аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливок, процес термічної обробки деталі «Кронштейн», розрахунок горіння палива, визначення часу нагріву металу та основних розмірів печі
6. Перелік графічного матеріалу:
 1. Кронштейн (лист 1)
 2. Полум'яна методична піч (лист 2)

7. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Проектування полум'яної методичної печі	Скрипник О. В.		

8. Дата видачі завдання 10.03.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей	25.03.2026	
2	Аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливок	1.04.2026	
3	Процес термічної обробки деталі «Кронштейн»	9.04.2026	
4	Розрахунок горіння палива	15.04.2026	
5	Визначення часу нагріву металу та основних розмірів печі	21.04.2026	
6	Тепловий баланс	7.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки	17.05.2026	
8	Оформлення презентації роботи	25.05.2026	
9	Здача роботи на кафедрі та перевірка наявності запозичень	10.06.2026	

Дата видачі завдання «_____» _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ (Олександр СКРИПНИК)
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «_____» _____ 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ (Дмитро ЛІТВІНОВ)
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Пояснювальна записка викладена на 56 с., 11 табл., 14 джерел.

У бакалаврській роботі детально розглянуто процес термічної обробки виливків типу «Кронштейн», який включає:

- обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей;
- аналіз конструкції деталі - визначення властивостей та вимог до якості виробу;
- розрахунок горіння палива;
- визначення часу нагріву;
- розрахунок теплового балансу печі

Об'єкт розробки – процес термічної обробки виливка з сталі 20 «Кронштейн» масою 1,86 кг.

Предмет розробки – визначення технологічних параметрів, складання опису термічної обробки виливка та визначення основних технологічних параметрів полум'яної методичної печі.

Результати проектування – розроблена методична полум'яна піч, що забезпечує послідовне переміщення та рівномірний нагрів заготовок зі сталі 20 за рахунок раціонального розподілу робочого простору на методичну, зварювальну та томильну зони.

Результати розробки можуть бути рекомендовані для впровадження при термічної обробки сталевих виливків середньої складності в умовах масового виробництва.

ВИЛИВОК, ПОЛУМ'ЯНА МЕТОДИЧНА ПІЧ, ЧАС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЦИКЛУ, ГОРІННЯ ПАЛИВА, ЧАС НАГРІВУ, ТЕПЛОВІ ВТРАТИ ЧЕРЕЗ БАГАТОШАРОВЕ ФУТЕРУВАННЯ СТІН, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС

ABSTRACT

The explanatory note consists of 56 pages, 11 tables, and 14 references.

This bachelor's thesis provides a detailed examination of the heat treatment process for "Bracket"-type castings, which includes:

- justification of the choice of material for the part and a description of its properties;
- analysis of the part's design—determination of properties and quality requirements for the product;
- calculation of fuel consumption;
- determination of heating time;
- calculation of the furnace's heat balance

Development Object – the heat treatment process for a 1,86 kg "Bracket" casting made of 20 steel.

Development Subject – determination of technological parameters, preparation of a description of the casting's heat treatment, and determination of the main parameters of the flame-heating furnace.

Design results – a methodical flame furnace has been developed that ensures the sequential movement and uniform heating of 20 steel castings through the rational division of the working space into methodical, welding, and annealing zones.

The results of this development can be recommended for implementation in the heat treatment of medium-complexity steel castings under mass production conditions.

CASTING, FLAME-TYPE METALLURGICAL FURNACE, PROCESS CYCLE TIME, FUEL COMBUSTION, HEATING TIME, HEAT LOSS THROUGH MULTILAYERED WALL LINING, HEAT BALANCE

Зміст

	стор
Вступ.....	5
1 Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей.....	8
2 Аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливок.....	10
3 Процес термічної обробки деталі «Кронштейн».....	10
4 Розрахунок горіння палива.....	13
5 Визначення часу нагріву металу та основних розмірів печі.....	21
5.1 Попереднє визначення основних розмірів печі.....	22
5.2 Визначення ступеня розвитку кладки.....	24
5.3 Визначення ефективності товщини газового шару.....	25
5.4 Визначення часу нагріву металу у методичній зоні.....	26
5.5 Визначення часу нагріву металу в зварювальній зоні.....	33
5.6 Визначення часу томлення металу.....	35
5.7 Визначення дійсних основних розмірів печі.....	37
6 Тепловий баланс.....	40
6.1 Вибір футерування печі.....	40
6.2 Загальні положення.....	41
6.3 Статті приходу теплоти.....	41
6.4 Статті витрати теплоти.....	43
6.5 Втрати теплоти теплопровідністю через кладку.....	44
Висновки.....	51
Література.....	53
Додатки.....	55

ВСТУП

Методичні печі є ключовою ланкою в ланцюзі прокатного та ковальсько-штампувального виробництва. Їхня назва походить від принципу «методичного» (послідовного) переміщення заготовок через зони з різними температурними режимами. У сучасних умовах, коли питання енергоефективності та екологічної безпеки стоять на першому місці, конструкція та принципи експлуатації цих агрегатів зазнали суттєвої трансформації [1].

Основним завданням сучасної методичної печі є забезпечення рівномірного нагріву металу (зазвичай сталевих блюмів, слябів або заготовок) до температури пластичної деформації (1100...1250 °С) при мінімальному утворенні окалини та витраті палива [2].

Сучасні методичні печі поділяються за способом транспортування металу, що визначає їхню продуктивність та сферу застосування:

1. штовхальні печі - класичний варіант, де заготовки просуваються вздовж печі за допомогою гідравлічного або механічного штовхача. Вони надійні, але мають обмеження по довжині через ризик «зварювання» заготовок або їх перекосу;
2. печі з крокуючими балками - найбільш прогресивний тип. Заготовки переміщуються шляхом піднімання та перенесення спеціальними балками. Це виключає контакт між заготовками, запобігає появі подряпин на нижній поверхні металу та дозволяє здійснювати нагрів з чотирьох сторін;
3. кільцеві печі - використовуються переважно для нагріву круглих заготовок у трубному виробництві.

Методична піч розділена на технологічні зони, що дозволяє оптимізувати теплообмін:

- методична (конвективна) зона. Тут холодний метал зустрічається з відхідними газами. Відбувається поступовий підігрів за рахунок конвекції, що мінімізує термічні напруги в металі;

- зварювальна (активна) зона. Основна зона, де встановлені пальникові пристрої. Тут підтримується максимальна температура для інтенсивного нагріву серцевини заготовки;
- томильна (витримувальна) зона. Зона з вирівняною температурою, де усувається перепад температур між поверхнею та центром заготовки перед її видачею на стан.

У сучасній металургії вдосконалення полум'яних методичних печей спрямоване на [3]:

а. Впровадження регенеративних та рекуперативних систем. Енергоефективність сьогодні досягається шляхом глибокої утилізації тепла відхідних газів. Сучасні рекуператори дозволяють нагрівати повітря, що йде на горіння, до 500...700 °С. Регенеративні пальники забезпечують ще вищий показник - до 1000 °С, що дозволяє економити до 30 % палива порівняно з агрегатами старого зразка.

б. Безполум'яне спалювання (Flameless Combustion). Це технологія, при якій паливо та окислювач подаються окремо при високих швидкостях, що створює об'ємне горіння без видимого факела, що забезпечує:

- надзвичайно рівномірний температурний фон;
- зниження викидів оксидів азоту (NO_2) на 50...80%;
- зменшення угару металу (утворення окалини);

в. Автоматизація та «цифрові двійники». Сучасні печі обладнані системами АСУ ТП, які використовують математичні моделі нагріву в реальному часі. Система враховує марку сталі, розміри заготовки та темп прокатки, автоматично коригуючи витрату газу в кожній зоні. Це мінімізує людський фактор та запобігає перегріву металу при зупинках стану.

Використання сучасних методичних печей дозволяє досягти наступних показників [4]:

- питома витрата палива 35...45 кг умовного палива на тонну металу (проти 60...80 кг у печах минулого покоління);
- продуктивність - сучасні агрегати здатні обробляти до 200...300 тонн металу на годину;

– термін окупності - за рахунок економії енергоносіїв модернізація печі зазвичай окупається протягом 2...4 років.

Полум'яні методичні печі залишаються безальтернативним інструментом для масового нагріву заготовок у чорній металургії. Основним вектором їхнього розвитку в сучасних умовах є повна автоматизація, впровадження високоефективних систем рекуперації тепла та перехід на екологічно чисті методи спалювання палива. Майбутнє цих агрегатів пов'язане з можливим використанням водню як добавки до природного газу для декарбонізації металургійного сектора.

1 Обґрунтування вибору матеріалу деталі та опис його властивостей

Сталь 20 є однією з найбільш розповсюджених конструкційних вуглецевих якісних сталей ДСТУ 7809:2015 [5], що належить до класу доєвтектоїдних сталей з низьким вмістом вуглецю. Її хімічний склад строго регламентований, оскільки навіть незначні відхилення у вмісті елементів суттєво впливають на зварюваність та здатність до термічного зміцнення.

Детальні характеристики сталі 20 наведено в таблицях 1.1, 1.2 та 1.3.

Таблиця 1.1 - Фізичні властивості сталі 20 за ДСТУ 7809:2015

Марка сталі	Густина, ρ , кг/м ³	Лінійна усадка, ε , %	Ударна в'язкість, КСУ Дж/м ²	Модуль пружності під час розтягування, $E \times 10^{-5}$ МПа	Питома теплоємність, c , в інтервалі температур від 20 °С до 200 °С включно, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт лінійного розширення, α , в інтервалі температур від 20 °С до 200 °С включно, $\alpha \times 10^{-6}/K$	Коефіцієнт теплопровідності, λ , за 20 °С, Вт/(м·К)
сталь 20	7850	1,5 – 1,8	≥ 78	2,0	460 - 520	12,5	48 - 52

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 45Л за ДСТУ 7809:2015

Сплав	Межа міцності на розрив σ_r , МПа	Відносне подовження, %	Твердість за Брінеллем, НВ	Твердість за Роквеллом, HRC, після гаартування
сталь 20:				
– після нормалізації	420 – 460	25 – 28	140 – 160	156 – 163
– після відпалу	390 – 410		120 – 140	

Таблиця 1.3 – Хімічний склад сталі 20 за ДСТУ 7809:2015

Елементи	C, %	Si, %	Mn, %	S, %	P, %	As	Ni	Cu
В межах	0,17 - 0,24	0,17 - 0,37	0,35 - 0,65	до 0,040	до 0,035	до 0,08	до 0,30	до 0,30
Середнє	0,205	0,27	0,50	-	-	-	-	-

Вплив хімічних елементів на структуру та властивості сталі 20 визначається їхньою здатністю змінювати критичні точки фазових перетворень, морфологію зерен та розподіл фаз (фериту та перліту). Оскільки сталь 20 є доєвтектоїдною, основна увага приділяється впливу елементів на співвідношення цих фаз та зміцнення феритної матриці.

Основні компоненти та домішки:

1. Вуглець. Вміст вуглецю (0,17...0,24 %) є визначальним чинником для структури сталі 20. Вуглець збільшує частку перліту в структурі. Оскільки перліт значно твердіший за ферит, кожен додатковий 0,01 % вуглецю підвищує границю міцності та твердість, але знижує пластичність і ударну в'язкість. Підвищення вмісту вуглецю зміщує точку S на діаграмі «залізо-вуглець», що впливає на температуру початку виділення фериту при охолодженні [6].

2. Марганець. У сталі 20 вміст марганцю становить 0,35...0,65 %. Марганець розчиняється у фериті, зміцнюючи його (твердорозчинне зміцнення). Він сприяє отриманню більш дрібнозернистої структури при нормалізації, що позитивно впливає на опір руйнуванню. Марганець зв'язує сірку в тугоплавкі сульфіди (MnS), запобігаючи явищам червоноламкості (крихкості при гарячій деформації).

3. Кремній. Вміст становить 0,17...0,37%. Використовується як розкислювач під час виплавки. Як і марганець, кремній розчиняється у фериті, значно підвищуючи його границю плинності. Проте надлишок кремнію може знижувати здатність до холодної висадки.

4. Сірка та Фосфор. Їх вміст суворо обмежений (до 0,035...0,040 %). Сірка утворює легкоплавкі евтектики (FeS), які розташовуються по межах зерен, викликаючи руйнування металу при температурах кування або прокатки. Фосфор викликає холодноламкість - різке зниження ударної в'язкості при низьких температурах за рахунок виділення фосфідів, які роблять структуру крихкою.

У рівноважному стані (після повного відпалу) мікроструктура сталі 20 складається з двох основних фаз [7]:

- ферит (близько 75...80 % об'єму) - твердий розчин проникнення вуглецю в α -залізо. Забезпечує високу пластичність та в'язкість;
- перліт (близько 20...25% об'єму) - евтектоїдна суміш фериту та цементиту. Надає матеріалу необхідну міцність та твердість.

Хімічний склад сталі 20 забезпечує так званий еквівалент вуглецю ($C_{екв}$) на рівні, що не перевищує 0,3...0,4 %. Це означає:

- відсутність схильності до утворення тріщин при зварюванні;

- можливість зварювання без попереднього підігріву та наступної термообробки (для більшості конструкцій);
- високу міцність зварного з'єднання, що дорівнює міцності основного металу.

2 Аналіз конструкції деталі і технологічних умов на відливок

Відливок відноситься до XI класу точності за ГОСТ 26645 – 85, виготовляється із сталі 20 за ДСТУ 7809:2015 [5]. Різностінність не більше 3 мм, короблення не більше 2 мм, перекіс по роз'єму до 2 мм. На оброблених поверхнях допускаються одиничні раковини довжиною не більше 1/3 кола, шириною не більше 5 мм, або мілкі раковини найбільшим розміром 3 мм в кількості не більше 5 штук. На необроблених поверхнях допускаються одиничні раковини розміром не більше 9 мм, глибиною не більше 4 мм і в кількості не більше 8 штук на поверхню. У місцях спряження стержня і форми допускається присутність кільцевих заусениць довжиною до 1,5 мм.

Деталь "Кронштейн" представляє собою частину пристрою, який призначено для транспортування важких вантажів. Маса деталі 1,86 кг, габаритні розміри 324 × 122 × 39 мм, твердість 131...157 НВ.

Оброблюваними поверхнями являються посадкові місця на вал. Інші поверхні не оброблюються. Даний відливок є технологічним. Зовнішні поверхні відливка представляють собою прямолінійні контури, з'єднані плавними переходами, які забезпечують деяку деформацію відливка при його усадці під час охолодження у формі і зниження залишкових напружень в місцях спряження прямолінійних ділянок. Відливок має чотири стержні, немає з'єднаних частин, роз'єм моделі і форми один.

3 Процес термічної обробки деталі «Кронштейн»

Оскільки мова йде про термічну обробку відливка «Кронштейн», термічна обробка в полум'яній методичній печі має свої специфічні особливості, пов'язані з

ливою структурою металу. У відливках зі сталі 20 часто спостерігається грубозернистість та внутрішні напруження, що виникають під час кристалізації в формі.

Детальний опис процесу термообробки для литих деталей включає наступне [8]:

1. Основна мета обробки. Для відливок зі сталі 20 найчастіше застосовують нормалізацію (іноді з наступним відпуском). Це необхідно для:

- усунення грубої литої структури (так званої віджіманштеттової структури);
- зменшення неоднорідності хімічного складу (ліквідації дендритної ліквідації);
- зняття напружень, що можуть призвести до жолоблення при механічній обробці.

2. Температурний режим. Сталь 20 - доевтектоїдна, тому для повного перетворення структури нагрів має бути вище точки A_{c3} (852 °C):

- температура в печі 890...920 °C;
- охолодження. Вивантаження з печі на повітря (нормалізація). Це забезпечує швидкість охолодження, достатню для подрібнення зерна, що значно покращує ударну в'язкість відливка.

3. Робота методичної печі при обробці відливок. Методичні печі (штовхальні або з крокуючим подом) дозволяють автоматизувати процес для масового виробництва відливок:

а. завантаження. Відливки завантажуються на піддони або безпосередньо на под печі. Важливо забезпечити проміжки між деталями для рівномірного обмивання полум'ям;

б. зональний нагрів:

- методична зона - поступовий прогрів масивних частин відливка. Це критично для фасонного лиття, де є перепади товщини стінок (наприклад, перехід від масивної маточини до тонкого ребра);
- зварювальна зона - швидкий догрів до робочої температури.

– томильна зона - обов'язкова витримка для завершення дифузійних процесів. Для відливоків час витримки зазвичай на 20...30 % довший, ніж для прокату, через складність литої структури.

4. Специфічні проблеми та їх вирішення. При роботі з відливками в полум'яних печах виникають такі нюанси:

– захист поверхні. Відливки зазвичай мають припуски на механічну обробку. Однак інтенсивне окислення в полум'яній печі може "з'їсти" значну частину припуску. Необхідно регулювати пальники на роботу з мінімальним надлишком повітря;

– термічні тріщини. Якщо відливок має дуже складну конфігурацію, швидкий нагрів у активній зоні може спричинити тріщини. У таких випадках швидкість прошовування через методичну зону сповільнюють;

– пригар піску. Якщо на відливку залишилися залишки формування суміші, під дією факела пальників вони можуть оплавитися, що ускладнить подальшу очистку та обробку інструментом.

5. Контроль якості. Після виходу з печі та охолодження відливки проходять перевірку:

– твердість має бути в межах 120...160 НВ;

– мікроструктура перевіряється на відсутність крупного зерна. Правильно оброблений відливок сталі 20 повинен мати дрібнозернисту ферито-перлітну структуру.

4 Розрахунок горіння палива

Вихідні дані для розрахунку полум'яної методичної печі наведено в табл. 4.1, 4.2.

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для розрахунку полум'яної методичної печі

Параметр	Одиниці виміру	Позначення	Значення
Матеріал, який нагрівається			сталь 20
Продуктивність печі	т/год	P	1,95
Температура матеріалу на вході	°С	t_0	12
Температура матеріалу на виході	°С	t_k	750
Величина	°С	$\Delta t_{доd}$	45
Розмір виробів	м	$b \times \delta \times l$	0,122×0,039×0,324
Температура газів	°С	$t_{вих}$	850
Температура зовнішньої поверхні склепіння	°С	$t_{св}$	65
Питома продуктивність печі	кг/(м ² ·год)	H_z	200
Варіант розташування заготовок	рядів		1
Кінцева різниця температур у томильній зоні	°С	$\Delta t_{кін}$	40
Коефіцієнт несиметричності	μ		1
Температура зовнішнього повітря	°С	$t_{нов}$	25
Угар металу	кг/кг	a	$0,6 \times 10^{-2}$
Нижча теплота згорання: доменний газ+ коксовий газ	кДж/м ³	$Q_{нмзс}$	6000
Температура підігріву повітря	°С		440
Температура підігріву палива	°С		200

Таблиця 4.2 – Склад палива [9]

Вид палива	Компоненти, %							
	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ S	C ₂ H ₆	O ₂
Доменний газ	10,5	28	2,7	0,3	58,5			
Коксовий газ	2,3	6,8	57,5	22,5	7,8	0,4	1,9	0,8

Приймаємо вологість коксового газу $W_k = 25\%$, вологість доменного газу $W_d = 30\%$ [10]. Розрахуємо склад вологих газів:

$$x_g = x_c \frac{100}{100 + 0,1242W}, \quad (4.1)$$

де x_c - вміст будь-якого компонента в сухому газі, %

x_g - те саме, у вологому газі, %.

Склад вологого коксового газу:

$$CO_{2g} = 2,3 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 2,231 \%$$

$$CO_g = 6,8 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 6,595 \%$$

$$H_{2g} = 57,5 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 55,768 \%$$

$$CH_{4g} = 22,5 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 21,822$$

$$N_{2g} = 7,8 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 7,565 \%$$

$$H_2S_g = 0,4 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 0,387 \%$$

$$C_2H_{6g} = 1,9 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 1,842 \%$$

$$O_{2g} = 0,8 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 25} = 0,776 \%$$

Склад вологого доменного газу:

$$CO_{2g} = 10,5 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 10,123 \%$$

$$CO_g = 28 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 26,994 \%$$

$$H_{2e} = 2,7 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 2,603 \%$$

$$N_{2e} = 58,5 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 56,399 \%$$

$$CH_{4e} = 0,3 \frac{100}{100 + 0,1242 \cdot 30} = 0,289 \%$$

Тоді вміст H_2O у коксовому газі:

$$H_2O = 100 - (CO_2 + CO + H_2 + N_2 + CH_4 + C_2H_6 + H_2S + O_2) \quad (4.2)$$

$$H_2O = 100 - (2,231 + 6,595 + 55,768 + 7,565 + 21,822 + 1,842 + 0,387 + 0,776) = 3,014 \%$$

У доменному газі:

$$H_2O = 100 - (CO_2 + CO + H_2 + N_2 + CH_4) \quad (4.3)$$

$$H_2O = 100 - (10,123 + 26,994 + 2,603 + 56,399 + 0,289) = 3,592 \%$$

Склад вологих доменного та коксового газів зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Склад вологих доменного та коксового газів

Вид палива	Компоненти, %								
	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	O ₂	H ₂ O
Коксовий газ	2,231	6,595	55,768	7,565	21,822	1,842	0,387	0,776	3,014
Доменний газ	10,123	26,994	2,603	56,399	0,289	-	-	-	3,592

Визначимо нижчу теплоту згоряння газів [11]:

-коксовий газ

$$Q_{\text{нтзк}} = 0,01(12680 \cdot CO_g + 10810 \cdot H_{2g} + 35741 \cdot CH_{4g} + 63797 \cdot C_2H_{6g} + 23380 \cdot H_2S_g) \quad (4.4)$$

$$Q_{\text{нтзк}} = 0,01(12680 \cdot 6,595 + 10810 \cdot 55,768 + 35741 \cdot 21,822 + 63797 \cdot 1,842 + 23380 \cdot 0,387) = 15927 \text{ кДж/м}^3$$

-домений газ

$$Q_{\text{нтзк}} = 0,01(12680 \cdot CO_g + 10810 \cdot H_{2g} + 35741 \cdot CH_{4g}) \quad (4.5)$$

$$Q_{\text{нтзк}} = 0,01(12680 \cdot 26,994 + 10810 \cdot 2,603 + 35741 \cdot 0,289) = 3808 \text{ кДж/м}^3$$

Визначаємо частку доменного газу в суміші:

$$a = \frac{Q_{\text{нтзк}} - Q_{\text{нтзс}}}{Q_{\text{нтзк}} - Q_{\text{нтзд}}} \quad (4.6)$$

$$a = \frac{15927 - 6000}{15927 - 3808} = 0,8$$

Визначаємо частку коксового газу у суміші:

$$b = 1 - a \quad (4.7)$$

$$b = 1 - 0,8 = 0,2$$

Визначаємо процентний вміст компонентів у суміші:

$$CO_2 = 10,123 \cdot 0,8 + 2,231 \cdot 0,2 = 8,696 \%$$

$$CO = 26,994 \cdot 0,8 + 6,595 \cdot 0,2 = 23,305 \%$$

$$H_2 = 2,603 \cdot 0,8 + 55,768 \cdot 0,2 = 12,219 \%$$

$$N_2 = 56,399 \cdot 0,8 + 7,565 \cdot 0,2 = 47,568 \%$$

$$CH_4 = 0,289 \cdot 0,8 + 21,822 \cdot 0,2 = 4,183 \%$$

$$C_2H_6 = 0 \cdot 0,8 + 1,8423 \cdot 0,2 = 0,333 \%$$

$$H_2S = 0 \cdot 0,8 + 0,388 \cdot 0,2 = 0,07 \%$$

$$O_2 = 0 \cdot 0,8 + 0,776 \cdot 0,2 = 0,14 \%$$

$$H_2O = 3,592 \cdot 0,8 + 3,014 \cdot 0,2 = 3,487 \%$$

Перевіряємо правильність розрахунку:

$$8,696 + 23,305 + 12,219 + 4,183 + 0,333 + 47,568 + 0,14 + 3,487 + 0,07 = 100 \%$$

Розрахунок ведеться з орієнтацією на довгофакельне спалювання палива, характерне для методичних печей. Горіння здійснюється з коефіцієнтом витрати повітря α (зазвичай $\alpha = 1,05 \dots 1,15$). Визначення об'ємів повітря та продуктів згоряння проводиться на 100 м^3 газу за нормальних умов. Результати розрахунку наведені у табл. 4.4.

Калориметричну температуру горіння t_k визначаємо з балансового рівняння умовно адіабатного об'єму топки. Згідно з цим рівнянням, уся теплота, що вноситься в зону горіння (хімічна енергія палива та фізичне тепло підігрітого повітря і газу), витрачається виключно на нагрівання продуктів згоряння.

Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$Q_H^p + V_{нов} c_{нов} t_{нов} + V_z c_z t_z = V_{нз} c_{нз} t_k \quad (4.8)$$

Звідки розрахункова формула для температури:

$$t_k = \frac{Q_H^p + V_{нов} c_{нов} t_{нов} + V_z c_z t_z}{V_{нз} c_{нз}}, \quad (4.9)$$

де $V_{нов}$, $V_{нз}$ - питомі об'єми повітря та продуктів згоряння відповідно, віднесені до 1 м^3 палива (згідно з табл. 4.4);

$$V_{нов} = \frac{141,9}{100} = 1,419 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$$V_{нз} = \frac{232,699}{100} = 2,32699 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

$t_{нов}$, t_z - температури підігріву повітря та газу, °С (згідно із заданими умовами);
 $c_{нов}$ - середня ізобарна теплоємність повітря при температурі $t_{нов}$ $c_{нов} = 1,334$ кДж/(м³·°С) [12];

$c_{нз}$ - середня ізобарна теплоємність продуктів згоряння в інтервалі температур від 0 до t_k .

Оскільки теплоємність продуктів згоряння $c_{нз}$ суттєво залежить від температури, значення t_k та $c_{нз}$ є взаємопов'язаними. Тому розрахунок проводиться методом послідовних наближень.

Для сучасних методичних печей мінімально необхідна калориметрична температура становить близько 1800 °С.

Для першого наближення задаємося очікуваною температурою та розраховуємо середню теплоємність суміші:

$$c_{нз} = \sum(r_i c_i), \quad (4.10)$$

де r_i - об'ємні частки компонентів продуктів згорання (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2), визначені на основі стехіометричних реакцій (табл. 4.4);

c_i - середня ізобарна теплоємність окремих компонентів при вибраній температурі [4].

Якщо розрахована за формулою (4.9) температура відрізняється від прийнятої в наближенні більше ніж на 1...2 %, розрахунок повторюємо з новим значенням температури.

Таблиця 4.4 – Об'ємні долі компонентів

Паливо Об'єм компонента в 100 м ³ палива	Повітря			Продукти згорання. м ³						
	O ₂	N ₂	V _{нов}	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	SO ₂	V _{нз}	
8,696	–	27,091·79/21=101,916	27,091+101,916=129,007	8,696	–	–	101,916+47,568=149,484	–	–	
23,305	11,652			23,305	–	–		–	–	–
12,219	6,109			–	12,219	–		–	–	–
4,183	8,366			4,183	8,366	–		–	–	–
0,333	0,999			0,666	0,999	–		–	–	–
0,07	0,105			–	0,07	–		–	0,07	–
47,568	–			–	–	–		–	–	–
0,14	-0,14			–	–	–		–	–	–
3,487	–			–	3,487	–		–	–	–
100	27,091			101,916	129,007	36,85		25,141	–	149,484
–	21	79	100	17,42	11,88	–	70,66	0,033	100	
–	29,8	112,107	141,9	36,85	25,141	6,2	164,432	0,07	232,699	
–	21	79	100	15,83	10,59	2,66	70,66	0,03	100	

Величини середньої ізобарної теплоємності окремих компонентів суміші при вибраній температурі $t_k = 1800^\circ\text{C}$ [12]:

$$\text{CO}_2 = 0,5785 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{N}_2 = 0,3557 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{O}_2 = 0,3764 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\text{H}_2\text{O} = 0,4735 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$SO_2 = 0,207 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_{нз} = 0,01 \cdot 4,187 (0,5785 \cdot 15,83 + 0,3557 \cdot 70,66 + 0,3764 \cdot 2,66 + 0,4735 \cdot 10,59 + 0,207 \cdot 0,03) = 1,704 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

Середня ізобарна теплоємність паливної суміші в заданому температурному інтервалі (від 0 до $t_2 = 300^\circ\text{C}$) розраховується як середньозважена величина теплоємностей її окремих компонентів [12]:

$$CO_2 = 0,4269 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$CO = 0,312 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$CH_4 = 0,420 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$C_2H_6 = 0,663 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$H_2 = 0,31 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$N_2 = 0,3104 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$H_2O = 0,3636 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$O_2 = 0,3189 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$H_2S = 0,373 \text{ ккал} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$c_2 = 0,01 \cdot 4,19 \cdot \left(\begin{array}{l} 0,4169 \cdot 8,696 + 0,312 \cdot 23,305 + 0,420 \cdot 4,183 + 0,666 \cdot 0,33 + \\ + 0,31 \cdot 12,219 + 0,3104 \cdot 47,568 + 0,3636 \cdot 3,487 + 0,3189 \cdot 0,14 + \\ + 0,373 \cdot 0,07 \end{array} \right) = 1,376 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$$

За формулою (4.9) у першому наближенні:

$$t_k = \frac{6000 + 1,419 \cdot 1,334 \cdot 220 + 1,376 \cdot 300}{2,32699 \cdot 1,704} = 1823 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Тоді розбіжність між передбачуваним та розрахунковим значенням:

$$\Delta = \frac{1823 - 1800}{1823} \cdot 100\% = 1,3\% < 3\%$$

Приймаємо $t_k = 1823 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Для розрахунку фактичної температури в робочій зоні печі застосовується пірометричний коефіцієнт, що дозволяє скоригувати показники приладів відповідно до реальних умов нагрів:

$$\mu = \frac{t_o}{t_k} = 0,65 \dots 0,82 \quad (4.11)$$

З формули (4.11) $t_o = t_k \cdot \mu$.

Для методичної печі з торцевою видачею металу $\mu = 0,65$ [13].

$$t_o = 1823 \cdot 0,65 = 1345 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Приймаємо дійсну температуру у зварювальній зоні $t_o = 1345 \text{ } ^\circ\text{C}$.

5 Визначення часу нагріву металу та основних розмірів печі

Загальна тривалість перебування металу в печі розраховується як сума часових інтервалів нагріву на її окремих ділянках. Розрахунок для кожної зони проводиться з урахуванням її конструктивних та теплотехнічних особливостей.

Найбільш поширені методики визначення часу нагріву базуються на граничних умовах третього роду, що передбачають сталість температури пічного середовища за довжиною ділянки. У зв'язку з цим, для зон зі змінним температурним режимом при розрахунках використовують метод осереднення, приймаючи середню температуру за константу в межах даної ділянки.

Відповідно до прийнятого температурного графіка процесу нагрівання, що відображає зміну фактичних температур пічного простору та поверхні матеріалу за довжиною печі, виконуються наступні кроки [14]:

1. піділ методичної зони. Для підвищення точності розрахунків методичну зону умовно розділено на три ділянки (I, II, III), для кожної з яких визначено середню температуру;
2. встановлення вихідних параметрів. Температура газів на виході з печі приймається згідно з технічним завданням $t_{вих} = 850 \text{ }^\circ\text{C}$:

- температура у зварювальній зоні встановлюється на рівні $t_d = 1345 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура в томильній зоні (зоні витримки) приймається на величину $\Delta t_{од} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ вищою за кінцеву температуру нагріву матеріалу, а саме $t_m = t_k + \Delta t_{од} = 750 + 45 = 795 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основним завданням методичної зони є поступове прогрівання металу до досягнення ним стану пластичності. Це дозволяє уникнути значних термічних напружень. Згідно з технологічними вимогами, температура в центрі заготовки при переході з методичної зони до зварювальної має становити приблизно 400...500 °С.

5.1 Попереднє визначення основних розмірів печі

Площа поданої печі визначається за формулою:

$$F = \frac{P}{H_2} \quad (5.1)$$

$$F = \frac{1,95 \cdot 10^3}{200} = 9,75 \text{ м}^2$$

Для однорядного варіанта розташування заготовок ширина та довжина печі рівні:

$$B = l + 2a \quad (5.2)$$

де $a = 0,25 \text{ м}$ - зазор між заготовками та стінами печі [13];

$l = 0,324 \text{ м}$ - довжина заготовки (за умовою);

$$B = 0,324 + 2 \cdot 0,25 = 0,894 \text{ м}$$

Довжина печі:

$$L = \frac{F}{B} \quad (5.3)$$

$$L = \frac{9,75}{0,894} = 10,9 \text{ м}$$

З конструктивних міркувань висота печі приймається [13]:

- у томильній зоні - $H_m = 1,4 \text{ м}$;
- у зварювальній зоні - $H_{зв} = 2,4 \text{ м}$;
- наприкінці методичної - $H_m^{кін} = 0,75 \text{ м}$;

Середня висота методичної зони дорівнюватиме:

$$H_m^{cp} = 0,5 \cdot (H_m^{кін} + H_{зв}) \quad (5.4)$$

$$H_m^{cp} = 0,5 \cdot (0,75 + 2,4) = 1,575 \text{ м}$$

5.2 Визначення ступеня розвитку кладки

Для розрахунку наведеного коефіцієнта випромінювання від продуктів згоряння та футеровки (кладки) на метал необхідно визначити ступінь розвитку кладки печі. Даний показник обчислюється за наступною залежністю:

$$\omega = \frac{F_{кл}}{F_m} = \frac{F_{вм} - F_m}{F_m}, \quad (5.5)$$

де $F_{вн}$ - сумарна площа внутрішніх поверхонь стін та склепіння розрахункової зони печі, м²;

F_m - площа поверні металу, що сприймає теплове випромінювання, м².

Для випадків однорядного розташування заготовок на поду печі, показник розвитку кладки можна визначити через геометричні параметри робочого простору:

$$\omega = \frac{2 \cdot H_{cp} + B}{B}, \quad (5.6)$$

де H_{cp} - середня висота зони (для методичної зони використовується усереднене значення за її довжиною), м;

B - ширина робочого простору печі, м.

Величина ω обчислюється індивідуально для кожної з досліджуваних технологічних зон:

$$1) \text{ у методичній зоні } \omega_m = \frac{2 \cdot 1,575 + 0,894}{0,894} = 5,813$$

$$2) \text{ у зварювальній зоні } \omega_{св} = \frac{2 \cdot 2,4 + 0,894}{0,894} = 7,875$$

$$3) \text{ у томильній зоні } \omega_m = \frac{2 \cdot 1,4 + 0,894}{0,894} = 5,375.$$

5.3 Визначення ефективності товщини газового шару - S_{ef}

Параметр S_{ef} (ефективна довжина шляху променя) є усередненою геометричною характеристикою траєкторії теплового випромінювання від газового об'єму до твердих поверхонь огороження. Вплив цього параметра на інтенсивність радіаційного теплообміну враховується при визначенні розрахункових значень ступеня чорноти активних компонентів газової суміші (насамперед CO_2 та H_2O).

Для обчислення ефективної довжини шляху променя використовується емпірична залежність Невського-Порту:

$$S_{ef} = 0,9 \frac{2 \cdot H \cdot B}{H + B}, \quad (5.7)$$

де H - висота робочого простору зони печі, м (для методичної зони приймається середня висота H_{cp});

B - ширина зони печі, м.

Розрахунок S_{ef} ведеться для кожної з розглядаємих зон $S_{ef}^m, S_{ef}^{cv}, S_{ef}^M$.

1) для методичної зони:

$$S_{ef}^m = 0,9 \frac{2 \cdot 1,575 \cdot 0,894}{1,575 + 0,894} = 1,383 \text{ м}$$

2) для зварювальної зони:

$$S_{ef}^{cv} = 0,9 \cdot \frac{2 \cdot 2,4 \cdot 0,894}{2,4 + 0,894} = 1,662 \text{ м}$$

3) для томильної зони:

$$S_{ef}^m = 0,9 \frac{2 \cdot 1,4 \cdot 0,894}{1,4 + 0,894} = 1,303 \text{ м}$$

5.4 Визначення часу нагрівання металу у методичній зоні

Теплотехнічний розрахунок виконується послідовно для кожної з трьох ділянок методичної зони. Основним завданням є визначення радіаційних характеристик газового середовища.

Ступінь чорноти газової суміші ε_2 визначається за формулою:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{CO_2} + \beta \varepsilon_{H_2O}, \quad (5.8)$$

де ε_{CO_2} , ε_{H_2O} - ступені чорноти вуглекислого газу та водяної пари відповідно. Ці значення знаходяться за номограмами [14] залежно від температури газів t_2 та ефективної товщини випромінювального шару $Pi \cdot S_{ef}$.

β - поправочний коефіцієнт, що враховує відхилення від закону адитивності при сумісному випромінюванні CO_2 та H_2O .

Парціальний тиск компонентів газової суміші (P_{CO_2} та P_{H_2O}) розраховується на основі їхніх об'ємних часток:

$$P_{CO_2} = P_{бар} \cdot r_{CO_2}$$

$$P_{H_2O} = P_{бар} \cdot r_{H_2O}$$

де r_{CO_2} , r_{H_2O} - об'ємні частки компонентів у продуктах згоряння (згідно з табл. 4.4).

$P_{бар}$ - повний (барометричний) тиск газів у відповідній зоні печі.

З огляду на конструктивні особливості методичних печей та створення в робочому просторі невеликого розрідження для запобігання вибиванню газів, при розрахунках приймаємо повний тиск рівним атмосферному:

$$P_{бар} = 0,95 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$P_{CO_2} = 0,1583 \cdot 0,95 \cdot 10^5 = 15038,5 \text{ Па}$$

$$P_{H_2O} = 0,1059 \cdot 0,95 \cdot 10^5 = 10060,5 \text{ Па}$$

$$P_{CO_2} \cdot S_{эф}^M = 15038,5 \cdot 1,383 = 20800 \text{ Па} \cdot \text{м} = 0,0208 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

$$P_{H_2O} \cdot S_{эф}^M = 10060,5 \cdot 1,383 = 13910 \text{ Па} \cdot \text{м} = 0,01391 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Ступінь чорноти газів наведено в табл. 5.1

Таблиця 5.1 – Ступінь чорноти газів

№ ділянки	$t_z, \text{ }^\circ\text{C}$	ε_{CO_2}	ε_{H_2O}	ε_z	β
I	925	0,124	0,12	0,252	1,07
II	1090	0,122	0,096	0,225	
III	1255	0,098	0,083	0,187	

Для розрахунку теплообміну в робочому просторі печі необхідно визначити наведений коефіцієнт випромінювання у системі «газ - футеровка - метал». Розрахунок виконується для кожної ділянки методичної зони за формулою:

$$C_{зкм}^{i-m} = C_0 \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{\omega_m + 1 - \varepsilon_z}{[\varepsilon_m + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_m)] \cdot \frac{1 - \varepsilon_z}{\varepsilon_z} + \omega_m}, \quad (5.9)$$

де C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, що дорівнює $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

ε_m - ступінь чорноти поверхні металу (для сталі 20 при температурах нагріву зазвичай приймається в межах $0,7 \dots 0,8$, згідно з [13]);

ε_g - ступінь чорноти газового середовища, розрахований на попередньому етапі;

I ділянка:

$$C_{гкм}^I = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{5,813 + 1 - 0,252}{[0,8 + 0,252 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,252}{0,252} + 5,813} = 3,572 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

II ділянка:

$$C_{гкм}^{II} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{5,813 + 1 - 0,225}{[0,8 + 0,225 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,225}{0,225} + 5,813} = 3,424 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

III ділянка:

$$C_{гкм}^{III} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{5,813 + 1 - 0,187}{[0,8 + 0,187 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,187}{0,187} + 5,813} = 3,178 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Середній за довжиною ділянки методичної зони коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначається за формулою:

$$\alpha_{вин}^{i-m} = C_{гкм}^{i-m} \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m^{пoch}}{100} \right)^4 \right] \cdot \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m^{кін}}{100} \right)^4 \right]}}{\sqrt{(T_g - T_m^{пoch}) \cdot (T_g - T_m^{кін})}}, \quad (5.10)$$

де $T_m^{пoch}$ і $T_m^{кін}$ - відповідно температури поверхні металу в кінці та на початку i -тої

ділянки методичної зони, К.

T_2 - середня за довжиною і-тої ділянки методичної зони температура газів, К.

I ділянка:

$$T_M^{noc} = 23 + 273,15 = 285,15 \text{ K}$$

$$T_M^{kin} = 380 + 273,15 = 558,15 \text{ K}$$

$$\alpha_{\text{вип}}^I = 3,572 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1198,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{285,15}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1198,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{558,15}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1198,15 - 285,15) \cdot (1198,15 - 558,15)}} = 93,798 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

II ділянка:

$$T_2 = 1230 + 273,15 = 1363 \text{ K}$$

$$T_M^{noc} = 380 + 273,15 = 558 \text{ K}$$

$$T_M^{kin} = 630 + 273,15 = 738 \text{ K}$$

$$\alpha_{\text{вип}}^{II} = 2,31 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1363,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{558,15}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1363,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{738,15}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1363,15 - 558,15) \cdot (1363,15 - 738,15)}} = 157,023 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

III ділянка:

$$T_2 = 1475 + 273,15 = 1528,15 \text{ K}$$

$$T_M^{noc} = 630 + 273,15 = 738,15 \text{ K}$$

$$T_m^{kin} = 820 + 273,15 = 873,15 \text{ K}$$

$$\alpha_{вин}^{III} = 2,00195 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1528,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{738,15}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1528,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{873,15}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1528,15 - 738,15) \cdot (1528,15 - 873,15)}} = 221,344 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Для вибору методики розрахунку часу нагріву металу необхідно визначити ступінь термічної масивності тіла. У теплотехніці для цього використовують безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі - критерій Біо (Bi). Він характеризує співвідношення між термічним опором теплопровідності тіла та термічним опором тепловіддачі на його поверхні.

Значення критерію Біо визначається за формулою:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda}, \quad (5.11)$$

де α - сумарний коефіцієнт тепловіддачі від газів до поверхні металу, Вт/(м²·К);

S - характерний (визначальний) розмір виробу, м;

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

У цьому випадку:

$$Bi^i = \frac{\alpha_{вин}^i \cdot S}{\lambda_m^i}$$

Для відливка, який нагрівається з двох сторін, за визначальний розмір приймається половина його товщини:

$$S = 0,5 \cdot \delta = 0,5 \cdot 0,039 = 0,0195 \text{ м}$$

де δ - товщина виробу за умовою завдання. При односторонньому нагріванні (якщо відливки лежить щільно на поду) за характерний розмір приймається повна товщина ($S = \delta$).

Коефіцієнт теплопровідності λ та коефіцієнт температуропровідності a ($\text{м}^2/\text{с}$) визначаються за середньою температурою металу на аналізованій ділянці методичної зони [11].

Отримані дані для кожної з трьох ділянок методичної зони зводяться до табл. 5.2

Таблиця 5.2 – Параметри матеріалу

№ ділянки	Матеріал заготовок	Середня температура матеріалу t_m , °C	λ_m , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a_m \cdot 10^5$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
I	Сталь 20	148,5	50,965	1,3
II		375	43,15	0,9734
III		532,5	38,74	0,8327

$$Bi^I = \frac{93,798 \cdot 0,039}{50,967} = 0,0717 < 0,25$$

$$Bi^{II} = \frac{157,023 \cdot 0,039}{43,15} = 0,141 < 0,25$$

$$Bi^{III} = \frac{221,344 \cdot 0,039}{38,74} = 0,222 < 0,25$$

Оскільки $Bi < 0,25$, то для вирішення задачі нагрівання заготовки доцільно скористатися розрахунком в умовах нестационарної теплопровідності з граничними умовами третього роду.

Для аналізу теплового стану металу на кожній ділянці методичної зони визначаємо температурний критерій на поверхні матеріалу за формулою:

$$\Theta_n = \frac{t_2^i - t^i}{t_2^i - t_n^i}, \quad (5.12)$$

де t_2^i - середня температура газів на i -тій ділянці методичної зони;

t^i, t_n^i - поточна і початкова температури тіла, що нагрівається на i -тій ділянці методичної зони.

$$\Theta_n^I = \frac{925 - 285}{925 - 12} = 0,701$$

$$\Theta_n^{II} = \frac{1090 - 465}{1090 - 285} = 0,776$$

$$\Theta_n^{III} = \frac{1255 - 600}{1255 - 465} = 0,829$$

Подальший розрахунок проводиться з використанням методів теплопровідності для класичних тіл (пластини):

1. критерій Фур'є (Fo), визначається за номограмами [14]. Для цього використовуються отримане значення температурного критерію на поверхні Θ_n та критерій Bi ;
2. температурний критерій для центру Θ_u . Після знаходження Fo , за номограмами для центру пластини [6] визначаємо відповідне значення.

Отримані результати розрахунків для всіх ділянок методичної зони систематизовано та зведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 - Значення критеріїв

№ ділянки	Bi	Θ_n	Fo	Θ_u
I	0,264	0,701	2	0,65
II	0,364	0,776	1	0,68
III	0,571	0,829	0,5	0,73

Розраховуємо час нагрівання матеріалу на ділянках методичної зони за

формулою:

$$\tau_M^i = \frac{Fo^i \cdot S^2}{a_M^i} \quad (5.13)$$

$$\tau_M^I = \frac{2 \cdot 0,039^2}{1,3 \cdot 10^{-5}} = 1539 \text{ c} = 0,428 \text{ год}$$

$$\tau_M^{II} = \frac{1 \cdot 0,039^2}{0,9734 \cdot 10^{-5}} = 1027 \text{ c} = 0,285 \text{ год}$$

$$\tau_M^{III} = \frac{0,5 \cdot 0,039^2}{0,8327 \cdot 10^{-5}} = 600,447 \text{ c} = 0,167 \text{ год}$$

Повний час нагрівання виробу у методичній зоні:

$$\tau_M = \tau_M^I + \tau_M^{II} + \tau_M^{III} \quad (5.14)$$

$$\tau_M = 0,428 + 0,285 + 0,167 = 0,8794 \text{ год}$$

Температура металу в центрі заготівлі на і ділянці методичної зони розраховується за формулою:

$$t_y^i = t_z^i - \Theta_y^i \cdot (t_z^i - t_n^i) \quad (5.15)$$

$$t_y^I = 925 - 0,65 \cdot (925 - 12) = 331,55 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_y^{II} = 1090 - 0,68 \cdot (1090 - 380) = 542,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{ч}}^{\text{III}} = 1255 - 0,73 \cdot (1255 - 630) = 678,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

5.5 Визначення часу нагрівання металу у зварювальній зоні

Парціальний тиск P_i компонентів газової суміші:

$$P_{\text{CO}_2} = 15040 \text{ Па}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 10060 \text{ Па}$$

$$P_{\text{CO}_2} \cdot S_{\text{эф}}^{\text{св}} = 15040 \cdot 1,662 = 24990 \text{ Па} \cdot \text{м} = 0,02499 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} \cdot S_{\text{эф}}^{\text{св}} = 10060 \cdot 1,662 = 16720 \text{ Па} \cdot \text{м} = 0,01672 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Ступінь чорноти газів:

$$\varepsilon_{\text{г}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (5.16)$$

де $\beta = 1,07$ [11] - поправочний коефіцієнт, що враховує відхилення від закону адитивності при сумісному випромінюванні CO_2 та H_2O ;

$\varepsilon_{\text{CO}_2} = 0,094$, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0,075$ [11] - ступені чорноти вуглекислого газу та водяної пари відповідно.

$$\varepsilon_{\text{г}} = 0,094 + 0,075 \cdot 1,07 = 0,174$$

Наведений коефіцієнт випромінювання в системі газ-кладка-метал:

$$C_{\text{зкм}}^{cs} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot \frac{7,875 + 1 - 0,174}{[0,8 + 0,174 \cdot (1 - 0,8)] \cdot \frac{1 - 0,174}{0,174} + 7,875} = 3,336 \frac{Bm}{m^2 \cdot K^4}$$

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$T_2 = 1345 + 273,15 = 1618,15 \text{ K}$$

$$T_M^{ноч} = 600 + 273,15 = 873,15 \text{ K}$$

$$T_M^{кін} = 690 + 273,15 = 963,15 \text{ K}$$

$$\alpha_{\text{вип}}^{cs} = 3,336 \cdot \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{1618,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{873,15}{100}\right)^4\right] \cdot \left[\left(\frac{1618,15}{100}\right)^4 - \left(\frac{963,15}{100}\right)^4\right]}}{\sqrt{(1618,15 - 873,15) \cdot (1618,15 - 963,15)}} = 292,798 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}$$

Визначаємо критерій Bi :

$$Bi^{cs} = \frac{292,798 \cdot 0,039}{35,43} = 0,826$$

Визначаємо температурний критерій для зварювальної зони на поверхні матеріалу:

$$\Theta_n^{cs} = \frac{1345 - 690}{1345 - 600} = 0,879$$

По номограм [14] визначаємо значення $Fo^{cs} = 0,06$; $\Theta_y^{cs} = 0,98$.

Час нагріву металу у зварювальній зоні:

$$\tau_{ce} = \frac{0,06 \cdot 0,0,39^2}{0,7643 \cdot 10^{-5}} = 78,504 \text{ c} = 0,022 \text{ год}$$

Температура металу в центрі заготовки:

$$t_u^{ce} = 1345 - 0,98 \cdot (1345 - 600) = 614,9^\circ\text{C}$$

5.6 Визначення часу томлення металу

Для забезпечення рівномірного прогріву заготовки та досягнення заданих технологічних параметрів, розрахунок проводиться у наступній послідовності.

На початку томильної зони перепад температур по товщині металу становить Δt_{noch} , $^\circ\text{C}$:

$$\Delta t_{noch} = t_n^m - t_u^{ce} \quad (5.17)$$

$$\Delta t_{noch} = 750 - 614,9 = 135,1^\circ\text{C};$$

Допустима різниця температур наприкінці витримки $\Delta t_{дон}$ визначається згідно з технологічними вимогами до нагріву.

Ступінь вирівнювання температур $\delta_{вир}$ характеризує ефективність зменшення температурного градієнта і розраховується за формулою:

$$\delta_{вир} = \frac{\Delta t_{кин}}{\Delta t_{noch}}, \quad (5.18)$$

де $\Delta t_{кин} = 40^\circ\text{C}$ - допустима різниця температур наприкінці витримки

Виходячи з отриманого значення $\delta_{вир}$ та враховуючи коефіцієнт несиметричності нагріву $\mu = 1$ (заданий умовами), за номограмою [10] визначаємо безрозмірний час - критерій Фур'є для томильної зони $FO^m = 2,5$.

Тривалість витримки металу τ_m розраховується через критерій Фур'є за формулою:

$$\tau_m = \frac{FO^m \cdot S^2}{a_m^m}, \quad (5.19)$$

де $a_m^m = 0,582 \cdot 10^{-5} \frac{M^2}{c}$ [11] - коефіцієнт теплопроводності

$$\tau_m = \frac{2,5 \cdot 0,039^2}{0,582 \cdot 10^{-5}} = 4296 \text{ c} = 1,193 \text{ год}$$

Тоді повний час перебування металу в печі:

$$\tau = \tau_m + \tau_{св} + \tau_m \quad (5.20)$$

$$\tau = 0,879 + 0,022 + 1,193 = 2,095 \text{ год}$$

5.7 Визначення дійсних основних розмірів печі

Для забезпечення заданої продуктивності печі $P = 4$ т/год необхідно визначити масу металу, що одночасно перебуває в робочому просторі, та розрахувати габарити пода.

Загальна маса металу G (т), яка має одночасно знаходитися в печі для забезпечення заданої продуктивності, визначається за формулою:

$$G = P\tau \quad (5.21)$$

$$G = 1,95 \cdot 2,095 = 4,085 \text{ т}$$

Маса однієї заготовки q (кг) розраховується через її геометричні розміри:

$$q = \frac{b \cdot \delta \cdot l \cdot \rho}{1000}, \quad (5.22)$$

де b, δ, l - відповідно ширина, товщина та довжина заготовки, м;

ρ - середня густина матеріалу при середній температурі нагріву t_{cp} [14].

Середня температура нагріву:

$$t_{cp} = \frac{t_0 + t_k}{2} = \frac{12 + 750}{2} = 381 \text{ }^\circ\text{C}$$

Тоді $\rho = 7819 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ [14].

$$q = \frac{0,122 \cdot 0,039 \cdot 0,324 \cdot 7819}{1000} = 0,012 \text{ т}$$

Кількість заготовок n , які одночасно перебувають у печі:

$$n = \frac{G}{q} = \frac{4,085}{0,012} = 340,4 \approx 341 \text{ шт}$$

При однорядному розташуванні заготовок основні параметри печі становлять:

– загальна довжина печі L розраховується як добуток кількості заготовок на їх ширину (з урахуванням проміжків, якщо вони передбачені):

$$L = b \cdot n = 0,122 \cdot 334 = 40,7 \text{ м}$$

- ширина печі B визначається довжиною заготовки l з урахуванням зазорів між металом та стінками печі, або приймається виходячи з виробничої необхідності:

$$B = 1,5 \text{ м}$$

- площа активного пода (F_a):

$$F_a = L \cdot b = 40,7 \cdot 0,122 = 4,97 \text{ м}^2$$

- площа габаритного пода:

$$F_z = L \cdot B = 40,7 \cdot 1,5 = 61,05 \text{ м}^2$$

Висоти окремих зон печі приймаються згідно з попередніми теплотехнічними розрахунками без змін.

Загальна довжина печі розподіляється на технологічні зони пропорційно часу перебування металу в кожній з них:

- методична зона - складається з першої, другої та третьої ділянок:

$$L_m^I = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_m^I = \frac{40,7}{2,095} \cdot 0,428 = 8,31 \text{ м}$$

$$L_m^{II} = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_m^{II} = \frac{40,7}{2,095} \cdot 0,285 = 5,54 \text{ м}$$

$$L_m^{III} = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_m^{III} = \frac{40,7}{2,095} \cdot 0,167 = 3,24 \text{ м}$$

Тоді:

$$L_{мет} = L'_m + L''_m + L'''_m$$

$$L_{мет} = 8,31 + 5,54 + 3,24 = 17,09 \text{ м}$$

– зварювальна зона. Довжина ділянки інтенсивного нагріву:

$$L_{зв} = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_{св} = \frac{40,7}{2,095} \cdot 0,022 = 0,427 \text{ м}$$

– томильна зона: довжина ділянки вирівнювання температур (L_m).

$$L_m = \frac{L}{\tau} \cdot \tau_m = \frac{40,7}{2,095} \cdot 1,193 = 23,17 \text{ м}$$

Напруженість габаритного пода печі H_z (кг/(м²·год)), що характеризує інтенсивність роботи печі, розраховується за формулою:

$$H_z = \frac{P}{F_z} \quad (5.23)$$

$$H_z = \frac{1,95 \cdot 10^3}{61,05} = 31,94 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$$

6 Тепловий баланс печі

6.1 Вибір футерування печі

Для забезпечення ефективного теплового балансу та мінімізації втрат теплоти в навколишнє середовище, параметри футерування обрані згідно з

конструктивними міркуваннями та вимогами чинних стандартів (ГОСТ 390-80, ГОСТ 2694-80):

1. Склепіння печі. Склепіння спроектовано як підвісне одношарове. Матеріал виконання - вогнетривкий шамот класу А, товщина шару $\delta_1 = 250$ мм.

2. Стіни печі. Конструкція стін передбачена двошаровою для поєднання механічної міцності та енергоефективності. Внутрішній (робочий) шар виконано з шамоту класу А товщиною $\delta_2 = 250$ мм. Зовнішній (ізоляційний) шар виконано з діатомітової теплоізоляції товщиною $\delta_3 = 113$ мм.

3. Під томильної зони. Для витримування значних механічних та термічних навантажень під виконується у три шари:

- верхній шар - тальк товщиною $\delta_4 = 250$ мм;
- проміжний шар - шамот класу Б товщиною $\delta_5 = 250$ мм;
- нижній (ізоляційний) шар - діатомітова ізоляція товщиною $\delta_6 = 113$ мм.

6.2 Загальні положення

Основним завданням розрахунку теплового балансу є визначення годинної витрати палива (B), яка є ключовою невідомою величиною у рівнянні балансу:

$$\sum_1^i Q_{\text{прих}} = \sum_1^k Q_{\text{вит}} \quad (6.1)$$

Для підвищення точності та спрощення обчислень розрахунок проводиться виключно для робочого простору печі. Такий підхід вважається більш доцільним, ніж розрахунок усієї установки разом із теплоутилізаційними пристроями (рекуператорами, котлами-утилізаторами тощо).

Зважаючи на те, що на етапі проектування детальна конструктивна розробка окремих вузлів не проводиться, у розрахунках застосовуються наступні умови:

- статті витрат. Малозначущі статті теплових втрат, частка яких не перевищує 5% від загального приходу тепла, до розрахунку не включаються;

– пріоритет. Основна увага приділяється головним складовим балансу, що дозволяє визначити необхідну кількість палива з достатньою для інженерних розрахунків точністю.

6.3 Статті приходу теплоти

Прихідна частина теплового балансу складається з енергії, що виділяється при спалюванні палива, фізичного тепла підігрітих компонентів горіння та теплового ефекту хімічних реакцій.

1. Хімічне тепло палива. Основна стаття приходу тепла, яка визначається нижчою теплотою згоряння робочого палива:

$$Q_{\text{хім}} = B \cdot Q_{H_{\text{сум}}}^P, \quad (6.2)$$

$$Q_{\text{хім}} = B \cdot 6000 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

де B - витрата палива, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{H_{\text{сум}}}^P$ - нижча теплота згоряння палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

2. Фізичне тепло підігрітого повітря. Враховується у разі використання рекуператорів або інших пристроїв для підігріву дуття:

$$Q_{\text{пов}} = B \cdot h_{\text{пов}} \cdot V_{\text{пов}} = B \cdot V_{\text{пов}} \cdot c_{\text{пов}} \cdot t_{\text{пов}}, \quad (6.3)$$

де $c_{\text{пов}} = 1,334 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ - середня теплоємність повітря при температурі підігріву

$t_{\text{пов}}$.

$$Q_{\text{пов}} = B \cdot 1,419 \cdot 1,334 \cdot 440 = B \cdot 832,896 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

3. Фізичне тепло підігрітого газу. Враховується, якщо газоподібне паливо попередньо нагрівається перед подачею до пальників:

$$Q_2 = V \cdot h_2 = V \cdot c_2 \cdot t_2, \quad (6.4)$$

де $c_2 = 1,376 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ \text{C})$ - середня теплоємність газу при температурі підігріву t_2 .

$$Q_2 = V \cdot 1,376 \cdot 200 = V \cdot 275,2 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

4. Теплота екзотермічних реакцій. У нагрівальних печах основними екзотермічними процесами є окислення заліза (утворення окалини). Питома теплота цієї реакції приймається рівною 5652 кДж/кг:

$$Q_{\text{екз}} = 5652 \cdot P \cdot a, \quad (6.5)$$

де P - годинна продуктивність печі, кг/с;

$a = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$ - чад (втрати) металу

$$P = 1,95 \text{ т/год} = \frac{1,95 \cdot 1000}{3600} = 0,542 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

$$Q_{\text{екз}} = 5652 \cdot 0,542 \cdot 0,6 \cdot 10^{-2} = 18,369 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

6.4 Статті витрати теплоти

Витратна частина теплового балансу відображає корисне використання енергії на технологічний процес та неминучі втрати у навколишнє середовище:

1. Корисне тепло на нагрівання металу. Це головна стаття витрат, що визначає кількість енергії, необхідну для підвищення температури заготовок до заданих технологічних параметрів:

$$Q_M = P \cdot c_M \cdot t_{\max}^M, \quad (6.6)$$

де P - годинна продуктивність печі, кг/с;

$t_{\max}^M = t_k = 750 \text{ } ^\circ\text{C}$ - максимальна температура металу, зазвичай дорівнює температурі видачі металу з печі;

$c_M = 0,6695 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ [11] - середня питома теплоємність матеріалу за відповідних температур, кДж/(кг·°C).

$$Q_M = 0,542 \cdot 0,6695 \cdot 750 = 271,984 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

2. Втрати тепла з продуктами згоряння (димовими газами). Це найбільш суттєва стаття витрат, яка залежить від температури газів на виході з робочого простору печі:

$$Q_{\text{вих}} = B \cdot V_{\text{пр.сгор}} \cdot h_{\text{пр.сгор}} = B \cdot V_{\text{пр.сгор}} \cdot c_{\text{пр.сгор}} \cdot t_{\text{вих}}, \quad (6.7)$$

де $V_{\text{пр.сгор}}$ - об'єм продуктів згоряння, що утворюються при спалюванні 1 м³ палива (з урахуванням коефіцієнта надлишку повітря α), м³/м³;

$c_{\text{пр.сгор}}$ - середня теплоємність продуктів згоряння при температурі виходу, кДж/(м³·°C);

$t_{\text{вих}}$ - температура димових газів на виході з робочого простору (перед рекуператором або димарем), °C.

$$Q_{\text{вих}} = B \cdot 2,32699 \cdot 1,376 \cdot 850 = B \cdot 2722 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

6.5 Втрати тепла теплопровідністю через кладку

Розраховуємо втрати теплоти через огорожувальні конструкції (склепіння та стіни), а також враховуються технологічні втрати. Втратами через під печі у даному розрахунку нехтуємо:

1. Втрати теплоти через склепіння. Площа склепіння $F_{скл}$ приймається рівною площі габаритного поду печі:

$$F_{скл} = F_2 = 61,05 \text{ м}^2$$

Приймаємо, що температура внутрішньої поверхні склепіння дорівнює середній температурі газів по довжині печі:

$$t_2^{cp} = \frac{t_{від} + t_{скл} + t_{мом}}{3} \quad (6.8)$$

Тобто:

$$t_{скл}^{вн} = t_2^{cp} = \frac{850 + 1345 + 795}{3} = 996,667 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Середня за товщиною температура шамотного шару:

$$t_{ш.скл} = \frac{t_2^{cp} + t_{зов}}{2}, \quad (6.9)$$

де $t_{зов} = t_{скл} = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$ - температура зовнішньої поверхні кладки.

$$t_{ш.скл} = \frac{996,667 + 65}{2} = 530,833 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Коефіцієнт теплопровідності шамоту класу А ($\lambda_{ш}$) залежно від середньої температури:

$$\lambda_{ш} = 0,835 + 0,58 \cdot t_{ш.скл} \cdot 10^{-3} \quad (6.10)$$

$$\lambda_{ш} = 0,835 + 0,58 \cdot 530,833 \cdot 10^{-3} = 1,143 \frac{Вт}{м \cdot К}$$

Тепловий потік через склепіння:

$$Q_{скл} = \frac{t_{скл}^{вн} - t_{поб}}{\frac{\delta_1}{\lambda_{ш}} + \frac{1}{\alpha_{зоб}^{скл}}} F_{скл}, \quad (6.11)$$

де $\alpha_{зоб}^{скл}$ - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні в навколишнє середовище.

$$\alpha_{зоб}^{скл} = 9,7 + 0,1 \cdot (t_{зоб} - 30) - 4,43 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{зоб} - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{зоб} - 30)^3$$

$$\alpha_{зоб}^{скл} = 9,7 + 0,1 \cdot (65 - 30) - 4,43 \cdot 10^{-4} \cdot (65 - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (65 - 30)^3 = 12,715 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

- для вертикальної стінки:

$$\alpha_{зоб}^{верт} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{зоб} - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{зоб} - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{зоб} - 30)^3 + 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{зоб} - 30)^3$$

$$\alpha_{зоб}^{верт} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} \cdot (65 - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} \cdot (65 - 30)^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} \cdot (65 - 30)^3 + 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot (65 - 30)^3 = 12,429 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

- для поду печі:

$$\alpha_{306}^{nod} = 9,3 + 91,5 \cdot 10^{-3} \cdot (t_{306} - 30) - 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot (t_{306} - 30)^2 + 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot (t_{306} - 30)^3$$

$$\alpha_{306}^{nod} = 9,3 + 91,5 \cdot 10^{-3} \cdot (65 - 30) - 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot (65 - 30)^2 + 1,37 \cdot 10^{-6} \cdot (65 - 30)^3 = 12,086 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Тоді втрати через склепіння:

$$Q_{скл} = \frac{996,667 - 25}{0,25 + \frac{1}{1,143 + \frac{1}{12,715}}} \cdot \frac{61,05}{1000} = 199,43 \frac{кДж}{с}$$

2. Втрати теплоти через стіни. Стіни мають двошарову конструкцію (шамот + діатоміт). Загальна площа стін $F_{ст}$ розраховується як сума площ методичної, зварювальної, томильної зон та торцевих стін.

Площа стін:

- методичної зони - $F_{мет} = 2 \cdot L_{мет} \cdot H_M^{сп} = 2 \cdot 17,09 \cdot 1,575 = 53,83 \text{ м}^2$

- зварювальної зони - $F_{зв} = 2 \cdot L_{зв} \cdot H_{зв} = 2 \cdot 0,427 \cdot 2,4 = 2,049 \text{ м}^2$

- томильна зона - $F_m = 2 \cdot L_m \cdot H_m = 2 \cdot 23,17 \cdot 1,4 = 64,87 \text{ м}^2$

- торцевих стін - $F_{торц} = B \cdot H_m + B \cdot H_M^{кін} = 1,5 \cdot 1,4 + 1,5 \cdot 0,75 = 3,225 \text{ м}^2$

Загальна площа стін:

$$F_{ст} = F_{мет} + F_{зв} + F_m + F_{торц} = 53,83 + 2,049 + 64,87 + 3,225 = 123,974 \text{ м}^2$$

Середні температури шарів при прямолінійному розподілі:

— для шамоту:

$$t_{ш} = \frac{t_{кл}^{вн} + t'}{2} \quad (6.12)$$

— для діатоміту:

$$t_{ок} = \frac{t_{кл}^{306} + t'}{2}, \quad (6.13)$$

де $t' \approx 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ - температура на межі розподілу шарів.

Приймаємо $t_{кл}^{6H} = t_{спов}^{6H} = t_2^{CP} = 996,667 \text{ } ^\circ\text{C}$. Тоді $t_{кл}^{306} = t_{306} - 10 \text{ } ^\circ\text{C} = 65 - 10 = 55 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$t_{и} = \frac{996,667 + 800}{2} = 898,333 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{ок} = \frac{55 + 800}{2} = 427,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Коефіцієнти теплопровідності матеріалів стін:

$$\lambda_{и} = 0,835 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot t_{и} \quad (6.14)$$

$$\lambda_{и} = 0,835 + 0,58 \cdot 10^{-3} \cdot 898,333 = 1,356 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{ок} = 0,154 + 0,314 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ок} \quad (6.15)$$

$$\lambda_{ок} = 0,154 + 0,314 \cdot 10^{-3} \cdot 427,5 = 0,279 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Втрати теплоти через двохшарову стіну:

$$Q_{cm} = \frac{t_{кл}^{6H} - t_{нов}}{\frac{\delta_2}{\lambda_{и}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{ок}} + \frac{1}{\alpha_{306}^{верт}}} \cdot F_{cm} \quad (6.16)$$

$$Q_{cm} = \frac{996,667 - 25}{\frac{0,250}{1,356} + \frac{0,113}{0,279} + \frac{1}{12,429}} \cdot \frac{123,974}{1000} = 179,962 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

3. Повні втрати та рівняння балансу.

Загальні втрати через кладку:

$$Q_{кл} = Q_{скл} + Q_{ст} \quad (6.17)$$

$$Q_{кл} = 199,43 + 179,962 = 379,392 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

4. Додаткові статті витрат:

– втрати з охолоджувальною водою

$$Q_{охл} = 0,1 \cdot (Q_{хім} + Q_{нов} + Q_2) \quad (6.18)$$

$$Q_{охл} = 0,1 \cdot B \cdot (6000 + 832,96 + 275,2) = B \cdot 710,8 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

– невраховані втрати (на випромінювання через отвори тощо)

$$Q_{невр} = 0,15 \cdot B \cdot (Q_{хім} + Q_{нов} + Q_2) \quad (6.19)$$

$$Q_{невр} = 0,15 \cdot B \cdot (6000 + 832,96 + 275,2) = B \cdot 1066 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

Для визначення годинної витрати палива B складається підсумкове рівняння:

$$Q_{хім} + Q_{нов} + Q_2 + Q_{екз} = Q_м + Q_{вих} + Q_{охл} + Q_{кл} + Q_{невр} \quad (6.20)$$

Після підстановки всіх виразів, що містять B , та їх групування, розраховується шукане значення витрати палива ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$B \cdot (6000 + 832,96 + 275,2) + 18,369 = B \cdot (2722 + 710,8 + 1066) + 271,984 + 379,392$$

$$7108 \cdot B + 18,369 = 4499 \cdot B + 651,376$$

$$B \cdot 2609 = 633,007$$

$$B = \frac{633,007}{2609} = 0,242 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Результати розрахунку всіх статей теплового балансу методичної печі зводимо до табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Статті теплового балансу методичної печі

Статті приходу	$\frac{\kappaДж}{с}$	%	Статті витрати	$\frac{\kappaДж}{с}$	%
1. Тепло від реакції горіння палива	1452	83,51	1. Тепло, витрачена на нагрівання металу	271,526	15,60
2. Тепло, що вноситься підігрітим повітрям	201,560	11,59	2. Тепло, що втрачається з газами, що йдуть	658,724	37,86
3. Тепло, що вноситься підігрітим газом	66,598	3,83	3. Втрати теплоти теплопровідністю через кладку	379,392	21,80
4. Тепло екзотермічних реакцій	18,369	1,07	4. Втрати теплоти з водою, що охолоджує	172,013	9,92
			5. Невраховані втрати теплоти	257,972	14,82
Разом $\sum Q_{прих}$	1738,527	100	Разом $\sum Q_{вит}$	1739,627	100

$$\text{Похибка } \Delta = \frac{1739,627 - 1738,527}{1739,627} \cdot 100\% = 0,063\%$$

Питома витрата теплоти на нагрівання 1 кг металу складе:

$$q = \frac{Q}{P} \quad (6.22)$$

$$q = \frac{1739,627 \cdot 3600}{1950} = 3212 \frac{\kappaДж}{кг}$$

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було спроектовано та розраховано полум'яну методичну піч, призначену для нагрівання деталей типу «Кронштейн» зі сталі 20. На основі отриманих даних можна зробити наступні висновки:

1. Для забезпечення необхідних експлуатаційних властивостей відливоків зі сталі 20 обрано режим нормалізації з нагріванням до температури 890...920 °С. Це дозволяє усунути грубу литу структуру, подрібнити зерно та зняти внутрішні напруження, що забезпечує твердість у межах 120...160 НВ.
2. Розраховано параметри горіння суміші коксового та доменного газів з нижчою теплотою згоряння суміші 6000 кДж/м³. Визначено оптимальний коефіцієнт витрати повітря ($\alpha = 1,05...1,15$) для забезпечення ефективного довгофакельного спалювання.
3. Визначено основні розміри печі, виходячи з однорядного розташування заготовок та необхідної продуктивності. Робочий простір розділено на три основні технологічні зони: методичну (для поступового підігріву), зварювальну (для інтенсивного нагріву) та томильну (для вирівнювання температури по перерізу заготовки).
4. Проведено розрахунок теплових втрат через багат шарове футерування, яке включає вогнетривкий шамот та діатомітову теплоізоляцію, що дозволяє значно знизити витрати палива.
5. Для утилізації тепла відхідних газів передбачено використання рекуператорів для підігріву повітря до 440 °С та палива до 200 °С, що підвищує загальний ККД установки.
6. Складено тепловий баланс печі, який підтвердив, що основна частина теплоти витрачається на корисний нагрів металу. Враховано втрати теплоти з відхідними газами, через кладку та з водою, що охолоджує елементи печі.

Результати проектування дозволяють рекомендувати дану піч для впровадження на підприємствах з дрібносерійним виробництвом сталевих відливоків, оскільки вона забезпечує високу рівномірність нагріву (перепад

температур не більше 12...40 °С) та відповідає сучасним вимогам щодо енергозбереження.

ЛІТЕРАТУРА

- 1 Ясногор В. І., Єрьомін А. О., Гупало О. В., Матухно О. В. Проектування нагрівальних печей нового покоління / Energetické procesy. Zborník vedeckých prác. Košice. 2017. P. 153 - 160
- 2 Miroslav Rimar, Marcel Fedak, Oleksandr Yeromin, Kostyantyn Sukhyu, Olena Gupalo, Elena Belyanovskaya, Rene Berta, Michal Smajda, Madhawa Rasuwan Ratnayake. Mathematical Model of a Heating Furnace Implemented with Volumetric Fuel Combustion / Processes, Basel, Switzerland. MDPI. 2020, 8(4). P. 1 - 20.
- 3 Тубольцев Л. Г., Нарівський А. В., Некрасова З. І. Концепція сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах / Метал та лиття України. Київ. vol. 30, 2022, № 4 (331). С. 8 – 19.
- 4 Радченко Ю. М., Гупало О. В., Єрьомін О. О., Грес Л. П., Штацький М. О. Реконструкція камерної печі періодичної дії / Теорія і практика металургії. Національна металургійна академія України Відділення матеріалознавства та металургії Академії інженерних наук України. Дніпро, 2004. No 2. С. 10 – 18.
- 5 ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови – Введ. 2015–22–06. – К.: Технічний комітет зі стандартизації «Чавун, прокат листовий, прокат сортовий термозміцнений, вироби для рухомого складу, металеві вироби, інша продукція з чавуну та сталі» (ТК 4), 2016. 8 с.
- 6 Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Нікоз О. В і та ін. Технологія конструкційних матеріалів. Київ: Вища школа, 2002. 356 с.
- 7 Матеріалознавство: навч. посібник / В. І Бузило, В. П. Сердюк, А. В. Яворський, О. А. Гайдай. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.
- 8 Лахтін Ю. М. Металознавство та термічна обробка металів. Видання 3^{-тє}, перероблене та доповнене. Москва: Металургія, 1983. 359 с.
- 9 Зоріна В. М. Промислова теплоенергетика та теплотехніка: Довідник. Кн. 1 / за заг. ред. В. А. Григор'єва. Москва: Вища школа, 1991. 368 с.
- 10 Мастрюков Б. С. Теплотехнічні розрахунки промислових печей. Москва: Металургія, 1972. 259 с.

- 11 Тимошпільський В. І., Несенчук О. П., Трусова І. А. Промислові теплотехнології. Кн. 3. Мінськ: Вища школа, 1998. 315 с.
- 12 Роддатіс К. Ф., Полтарецький О. М. Довідник з котельних установок малої продуктивності. Москва: Вища школа, 1989. 536 с.
- 13 Вальченко Н. О., Гурко В. В. Практичний посібник із виконання курсового проекту з курсу «Високотемпературні теплотехнологічні процеси та установки» для студентів спеціальності Т.01.02.00 «Теплоенергетика». Дніпро: ДДТУ, 2001. 164 с.
- 14 Несенчуком А. П., Жмакіним Н. П. Теплотехнічні розрахунки полум'яних печей для нагрівання та термообробки металу. Мінськ: Вища школа, 1974. 163 с.

ДОДАТКИ