

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра «Матеріалознавства та ливарного виробництва»

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Проектування руднотермічної печі
для плавки феронікелю з окисленої
феронікелевої руди»**

Виконав здобувач вищої освіти 4-го

курсу групи ПМ(ОЛ)-21

ОПП «Компютерний інжиніринг

технологій, робототехніка і 3D друк»

спеціальності 131 «Прикладна

механіка»

_____ Василь ЧЕРНОВ

Керівник роботи к.т.н., доцент

_____ Сергій КОНОНЧУК

Рецензент:

Центральноукраїнський національний технічний університет
 Факультет Механіко-технологічний .
 Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва .
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) .
 Галузь знань 13 Механічна інженерія .
 Спеціальність 131 Прикладна механіка .
 Освітньо-професійна програма «Комп'ютерний інжиніринг технологій,
робототехніка і 3D друк» .

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МЛВ

к.т.н., доцент

_____ Олександр КУЗИК

« ____ » _____ 2025 р.

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

_____ Чернов Василь Борисович _____ .

1. Тема роботи: «Проектування руднотермічної печі для плавки феронікелю з окисленої феронікелевої руди» .
2. Керівник роботи: Конончук Сергій Васильович, канд. техн. наук, доцент .
3. Строк подання роботи до захисту: 15.06.2025 р. .
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Проектування руднотермічної печі для плавки феронікелю з окисленої феронікелевої руди. Розрахувати матеріальний і тепловий баланси плавки феронікелю з окисленої нікелевої руди в руднотермічній печі. Розрахувати основні розміри руднотермічної печі. Зпроекувати креслення загального виду руднотермічної печі термічної печі для плавки феронікелю з окисленої феронікелевої руди.
5. Перелік графічного матеріалу: 1) Загальний вид руднотермічної печі,
2) Руднотермічна піч вид збоку. .

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Оглядовий	Конончук С.В.		
Конструкторський	Конончук С.В.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури по темі роботи	10.04.2025	
2	Розрахунки по конструкторській частині	30.04.2025	
3	Креслення по конструкторській частині	20.05.2025	
4	Оформлення пояснювальної записки	10.06.2025	
5	Оформлення презентації роботи	15.06.2025	
6	Здача роботи на кафедрі та перевірка на наявність запозичень	15.06.2025	
9	Захист кваліфікаційної роботи	25.06.2025	

Дата видачі завдання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис керівника

_____ Конончук С.В.

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 2025 р.

Підпис здобувача

_____ Чернов В.Б.

Анотація

ЧЕРНОВ Василь Борисович. Проектування руднотермічної печі для плавки феронікелю з окисленої феронікелевої руди. Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти: ЦНТУ, 2025. 33 с.

Перелік графічного матеріалу: 1) Загальний вид руднотермічної печі, 2) Руднотермічна піч вид збоку.

В першому розділі описано технологію плавки феронікелю, будову і принцип роботи руднотермічної печі для переробки окисленої нікелевої руди, основні її елементи, а також, системи механізації та автоматизації плавки.

В другому розділі розраховано матеріальний і тепловий баланси плавки феронікелю. Також виконані розрахунки шихти, кількості необхідного відновника і теплових витрат, витрати антрациту, виходу й хімічного складу електропічного шлаку, виходу електропічних газів, тепловтрат із продуктами переробки руди

В третьому розділі розраховано основні розміри спроектованої руднотермічної печі.

Розроблені креслення Загального виду руднотермічної печі та Бічний переріз руднотермічної печі.

Ключові слова: руднотермічна піч, феронікель, руда, матеріальний баланс, тепловий баланс, футеровка.

Abstract

CHERNOV Vasyl. Design of an ore-thermal furnace for the smelting of ferronickel from oxidized ferronickel ore. Qualification work for the first (bachelor's) level of higher education: CUNTU, 2025. 33 p.

List of graphic material: 1) General view of the ore-thermal furnace, 2) Side view of the ore-thermal furnace.

The first section describes the technology of ferronickel smelting, the structure and principle of operation of the ore-thermal furnace for processing oxidized nickel ore, its main elements, as well as the mechanization and automation systems of smelting.

The second section calculates the material and heat balances of ferronickel smelting. Calculations of the charge, the amount of the required reducing agent and heat consumption, anthracite consumption, the yield and chemical composition of the electric furnace slag, the yield of electric furnace gases, heat losses with ore processing products were also performed.

In the third section, the main dimensions of the designed ore-thermal furnace were calculated.

Drawings of the General view of the ore-thermal furnace and the Side section of the ore-thermal furnace were developed.

Keywords: ore-thermal furnace, ferronickel, ore, material balance, heat balance, lining.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1. БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ	9
1.1. Опис технології плавки феронікелю	9
1.2. Основні елементи конструкції запропонованої печі	10
1.3. Системи механізації та автоматизації виробництва	12
2. МАТЕРІАЛЬНИЙ І ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ПЛАВКИ ФЕРОНІКЕЛЮ	14
2.1. Розрахунок шихти	14
2.2. Розрахунок кількості необхідного відновника і теплових витрат	15
2.3. Розрахунок витрати антрациту-АС з вмістом золи 15%, вмістом вуглецю 75%	18
2.4. Розрахунок виходу й хімічного складу електропічного шлаку	18
2.5. Розрахунок виходу електропічних газів	19
2.6. Розрахунок тепловтрат із продуктами переробки руди	20
2.7. Розрахунок прибутку тепла	21
2.8. Тепловий розрахунок випалу, відновлення та електроплавки руди	22
3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ ПЕЧІ	27
ВИСНОВКИ	29
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	30
ДОДАТКИ	33

ВСТУП

Актуальність роботи. Металургія та ливарне виробництво є фундаментальними галузями української економіки, що мають значний вплив на її розвиток та національну безпеку. Вони забезпечують робочі місця, приносять валютні надходження завдяки експорту металопродукції, та є основою для багатьох інших галузей, таких як машинобудування, будівництво та оборонна промисловість. Розвиток цих галузей сприяє енергетичній незалежності країни, зменшуючи залежність від імпорту. Крім того, металургія та ливарне виробництво стимулюють інновації та технологічний прогрес, вимагаючи висококваліфікованих фахівців та впровадження сучасних методів виробництва. Збереження та розвиток цих галузей є стратегічним завданням для України, оскільки вони є запорукою економічного зростання та добробуту країни. Українська металургія має значний експортний потенціал, що дозволяє їй конкурувати на світовому ринку та приносити валютні надходження до державного бюджету. Ливарне виробництво, як невід'ємна частина металургійного комплексу, забезпечує інші галузі промисловості необхідними деталями та компонентами. Завдяки інноваціям та модернізації, українська металургія та ливарне виробництво мають значний потенціал для подальшого розвитку та зростання, що сприятиме економічній стабільності та зміцненню позицій України на міжнародній арені. Тому підтримка та розвиток цих галузей є надзвичайно важливим завданням для держави. [1].

Виробництво феронікелю має величезне значення для економіки та промисловості України, а також для глобального ринку. Феронікель є важливим легуючим компонентом у виробництві високоміцних сталей, особливо нержавіючих. Його застосування в різних галузях, таких як машинобудування, автомобілебудування, аерокосмічна промисловість, енергетика, та хімічна промисловість, робить його стратегічно важливим матеріалом. Виробництво феронікелю в Україні сприяє розвитку металургійного комплексу, забезпечуючи робочі місця та приносячи валютні надходження від експорту. Крім того,

розвиток цього виробництва сприяє технологічному прогресу та підвищенню конкурентоспроможності українських підприємств на світовому ринку. Однак, варто зазначити, що виробництво феронікелю потребує значних енергетичних ресурсів та може мати вплив на навколишнє середовище. Тому, екологічно відповідальне виробництво є ключовим фактором для сталого розвитку цієї галузі. Виробництво феронікелю є складовою частиною міжнародних ланцюгів постачання, і його успіх залежить від стабільності геополітичної ситуації та економічних умов. Україна має потенціал для розширення виробництва феронікелю, використовуючи свої ресурси та розвиваючи технології. Забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку цієї галузі є ключовими аспектами для довгострокового успіху.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є проектування руднотермічної печі для плавки феронікелю з окисленої феронікелевої руди.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення таких задач:

- розрахунок матеріального балансу плавки феронікелю;
- розрахунок теплового балансу руднотермічної печі;
- розрахунок основних розмірів руднотермічної печі;
- розробка конструкції та креслення загального виду руднотермічної печі для виплавки феронікелю.

Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення феронікелю на основі переробки окисленої нікелевої руди в руднотермічній печі.

Предмет дослідження – матеріальний і тепловий баланси плавки феронікелю в руднотермічній печі.

Практичне значення – розроблено конструкцію руднотермічної печі для виплавки феронікелю.

Особистий внесок – розраховано матеріальний і тепловий баланси плавки феронікелю та спроектовано креслення загального виду руднотермічної печі.

1. БУДОВА І ПРИНЦИП РОБОТИ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ

1.1. Опис технології плавки феронікелю.

Руднотермічна піч для плавки феронікелю – це потужний промисловий агрегат, призначений для виплавки феронікелю з нікелевої руди. Її конструкція передбачає надійний корпус, здатний витримувати екстремальні температури та тиск, що виникають під час процесу (рис. 1.1). Корпус виготовляється з міцної сталі та зсередини викладається вогнетривкою цеглою, яка захищає його від руйнівної дії високих температур і хімічних реакцій. Основним елементом печі є шахта, вертикальний канал, через який завантажуються шихтові матеріали. У нижній частині шахти розташований горн, де безпосередньо відбувається плавлення шихти.



Рис. 1.1. Руднотермічна піч Побузького феронікелевого комбінату

Важливою частиною печі є електроди, зазвичай графітові, через які подається електричний струм. Електроди занурюються в розплавлений метал, створюючи електричну дугу, яка генерує високу температуру, необхідну для

плавлення. Для забезпечення безперервності процесу використовується система подачі шихти, яка автоматично або вручну завантажує шихтові матеріали в піч. Шихта складається з нікелевої руди, коксу (як відновника) та флюсів (для регулювання складу шлаку).

Процес роботи печі починається із завантаження шихти в шахту. Після цього через електроди подається електричний струм, який створює електричну дугу. Температура в печі досягає 1600-1700°C, що дозволяє плавити шихтові матеріали. Під дією високих температур відбувається плавлення, в результаті якого утворюється розплавлений метал (феронікель) та шлак. Вуглець з коксу відновлює нікель та залізо з руд. Завдяки різниці в густині, метал та шлак розшаровуються. Феронікель накопичується в нижній частині горна, а шлак спливає на поверхню.

Після завершення плавки, розплавлений феронікель випускається з печі через спеціальні отвори – летки. Шлак також періодично видаляється для підтримки оптимальних умов плавлення. Розплавлений феронікель на розливних машинах заливається у форми (вилівниці) в яких він охолоджується для отримання злитків. Сучасні руднотермічні печі оснащені системами контролю та автоматизації, що дозволяють моніторити температуру, тиск та склад газів, а також автоматично регулювати процес плавки. Це забезпечує високу якість продукції та ефективність виробництва.

1.2. Основні елементи конструкції пропонованої печі

Футеровка є ключовим компонентом конструкції печі. Всі матеріали та вироби, що використовуються для її створення, повинні відповідати суворим вимогам, визначеним у відповідних ДСТУ, технічних умовах та кресленнях проекту.

Футерування робочого простору руднотермічної печі представляють собою кладку із вогнетривких матеріалів, а саме:

- графітові фасонні блоки – з них викладені подина, зона ванни металу та стіни шлакової ванни;
- шамотна цегла – з неї викладено стіни над шлаковою ванною та підсклепінний простір;
- водоохолоджуємі кесони – використовуються для облаштування склепіння печі.

Схема футеровки ванни печі наведена на рис. 1.2.

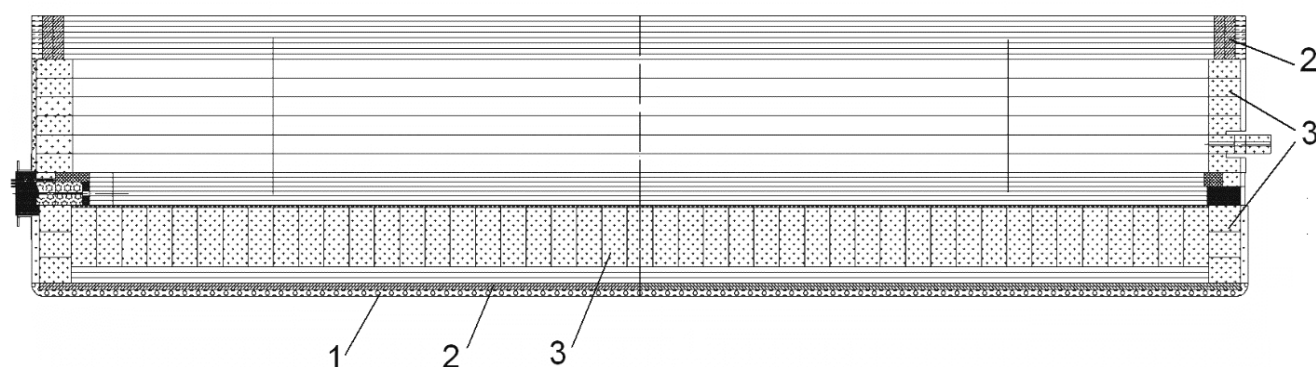


Рис. 1.2. Футеровка руднотермічної печі для виробництва чорного феронікелю:

1 - шамотний бій; 2 - цегла шамотна; 3 - блоки графітові.

Економічна ефективність виробництва феросплавів значною мірою залежить від терміну служби футеровки багатошлакових руднотермічних печей. Раніше використовувана традиційна футеровка з оксидних вогнетривів, зокрема хромомagneзитової цегли, була замінена комбінованою вуглеграфітовою, яка показала кращу стійкість при виплавці феронікелю. Висока стійкість графітових блоків забезпечується утворенням захисного шару – гарнісажу – на їхній внутрішній поверхні, що запобігає корозії від шлаків. Утворення цього гарнісажу залежить від теплових умов роботи вогнетривкої стінки та фізичних властивостей розплаву та вогнетриву. Механізм зношування оксидної футеровки пояснюється умовами утворення гарнісажу: оксидні вогнетриви мають великий тепловий опір, що призводить до перевищення температури плавлення розплаву на вогневій поверхні та розчинення вогнетриву в шлаку. У металевій зоні для

утворення металевого гарнісажу необхідний значно більший тепловий потік, що складно забезпечити навіть при інтенсивному охолодженні стінки, тому важливим є вибір вогнетриву, стійкого до металевого розплаву. Проблемою є низька стійкість кераміки в шлаковому розплаві без охолодження. Утворення шлакового гарнісажу можливе або шляхом використання водоохолоджуваних холодильників (що збільшує витрати), або шляхом зменшення теплового опору стінки, комбінуючи матеріали (стійкий до металу вогнетрив з високою теплопровідністю). Прикладом є комбінація кераміки (периклазохроміт) та графіту, де кераміка захищає графіт від розчинення в металі, а низький сумарний тепловий опір забезпечує утворення шлакового гарнісажу на вогневій поверхні кераміки. Незначне збільшення втрат тепла через підвищену теплопровідність невеликої ділянки футеровки не впливає на енергетичні показники виробництва. Отже, для підвищення стійкості футеровки з периклазохромітової цегли необхідно виключати прямий контакт вогнетриву з вуглецевою масою шва та створити буферний шар між цеглою та графітованими блоками, що зменшить ризик прориву через вогнетривку футеровку.

1.3. Системи механізації та автоматизації виробництва

Виробництво феронікелю – це складний та енергоємний процес, що вимагає сучасних систем механізації та автоматизації для підвищення ефективності та безпеки. Механізація охоплює завантаження шихти за допомогою конвеєрів, бункерів та вагонеток, забезпечуючи безперервний та рівномірний потік матеріалів, що підвищує продуктивність та безпеку. Вивантаження продукції відбувається за допомогою автоматизованих розливних машин, забезпечуючи точність та швидкість. Внутрішньоцехове транспортування матеріалів здійснюється конвеєрними системами, а обробка шлаків – механізованими системами. Автоматизація включає автоматичне керування процесом плавки, регулювання температури, тиску та подачі шихти, що оптимізує процес та знижує енергоспоживання. Датчики та сенсори збирають

дані про температуру, тиск, склад газів та рівень матеріалів, передаючи їх в систему керування для аналізу та автоматичного регулювання. Автоматизовані системи контролю якості забезпечують моніторинг хімічного складу феронікелю, гарантуючи відповідність стандартам, а системи безпеки моніторять роботу обладнання та попереджають про можливі аварії. Застосування цих систем значно підвищує продуктивність, покращує якість продукції, знижує витрати та підвищує безпеку праці, що сприяє конкурентоспроможності підприємств.

Для ведення процесу плавки огарка на феронікель, а також для забезпечення безаварійної та безпечної роботи, руднотермічна піч обладнана спеціальною групою приладів. Контроль електричних параметрів здійснюється за допомогою пульта керування, на якому розміщено три амперметри, що під'єднані до високої сторони трансформатора, а також три амперметри зі шкалою 0-100 ампер. Крім того, є шість вольтметрів, що відповідають кількості електродів на руднотермічній печі, шість показників положення електродів, сигналізація роботи устаткування, лічильники обліку активної та реактивної електроенергії, а також прилади потужності з самописами для кожного електрода і для печі. Система також включає шафу з ланцюгом захисту та блокування, щит з автоматичним регулятором потужності і щит перемикача ступенів напруги. Для включення печі передбачена система звукової сигналізації відповідно до правил. На всіх робочих площадках встановлені кнопки аварійного відключення печі та світлова сигналізація, що інформує про роботу печі. Для контролю газового режиму використовуються прилади газового аналізу, які вимірюють вміст CO, H₂, O₂, витрату газу, а також розрідження під склепінням і по тракту газоочистки. Теплові навантаження на футеровку печі та склепіння контролюються за допомогою термопар, встановлених у футеровку подини, бічних стін і склепіння печі, а показники температури виводяться на прилади, розміщені на пульті руднотермічної печі.

2. МАТЕРІАЛЬНИЙ І ТЕПЛОВИЙ БАЛАНСИ ПЛАВКИ ФЕРОНІКЕЛЮ

Перед проектуванням обладнання для переробки окисленої нікелевої руди в феронікель необхідно виконати розрахунки витрат відновника, мазуту та електроенергії на переробку окислених нікелевих руд.

Переробка окислених нікелевих руд на феронікель вимагає певної витрати енергоносіїв: відновника на процес одержання чорнового металу, мазуту для випалу шихти, електроенергії на електроплавку огарка. Витрата енергоносіїв визначається видом і хімічним складом сировини та продуктів її переробки.

2.1. Розрахунок шихти

Прийнятий хімічний склад руди, що переробляється, наведений у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – хімічний склад руди, що переробляється, % мас.

	Ni	Co	Fe	Cr ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	ппп	решта	W
%	2,5	0,06	15	1,3	1	39	22,5	10	1,49	30

Приймаємо:

- вихід нікелю на стадії електроплавки – 97 %;
 - вихід кобальту на стадії електроплавки – 90 %;
 - вихід заліза на стадії електроплавки – 75%;
 - вміст домішок у чорновому феронікелі: Cr – 2 %; C – 2,5 %; Si – 4 %;
- решта – 1%. Разом сума домішок – 9,5 %.

Розрахунок ведемо на 1 т сухої руди. У метал переходить:

Ni: $1000 \times 0,97 \times 0,025 = 24,25$ кг;

Co: $1000 \times 0,90 \times 0,006 = 0,54$ кг;

Fe: $1000 \times 0,75 \times 0,15 = 112,5$ кг;

Разом: 137,29 кг.

З урахуванням домішок вихід чорного металу дорівнює:

$$M_{\text{чорн}} = 137,29:(1-0,095) = 151,7 \text{ кг.}$$

У чорновому металі міститься:

$$\text{Ni} - 24,25 \text{ кг}; \text{Co} - 0,54 \text{ кг}; \text{Fe} - 112,5 \text{ кг}; \text{Cr} - 151,7 \times 0,02 = 3,03 \text{ кг};$$

$$\text{C}: 151,7 \times 0,025 = 3,79 \text{ кг}; \text{Si}: 151,7 \times 0,04 = 6,07 \text{ кг};$$

$$\text{інші}: 151,7 \times 0,01 = 1,52 \text{ кг.}$$

Результати розрахунку кількості та хімічного складу металу зведені в табл.

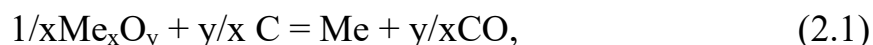
2.2.

Таблиця 2.2 – Розрахунок кількості та складу чорного феронікелю.

Прийнятий вихід при електроплавці				Вміст домішок у чорновому металі, %				
	Ni	Co	Fe	Cr	C	Si	решта	сума
%	0,97	0,9	0,75	2	2,5	4	1	9,5
кг	24,250	0,540	112,5	3,03	3,79	6,07	1,52	151,70
разом	137,290			14,41				151,70
Хімічний склад чорного феронікелю								
	Ni	Co	Fe	Cr	C	Si	решта	FeNi
%	16,0	0,4	74,1	2,0	2,5	4,0	1,0	100,0

2.2. Розрахунок кількості необхідного відновника і теплових витрат

Кількість відновника для реакції відновлення металу типу:



розраховується за формулою:

$$m_{\text{C}} = (12 \times y/x \times m_{\text{Me}}) / (M_{\text{Me}}) = K_{\text{Me}} \times m_{\text{Me}}, \quad (2.2)$$

де 12 - молярна маса вуглецю, г/моль; x, y - коефіцієнти в рівнянні реакції;
 m_{Me} – маса відновленого металу в складі чорнового феронікелю, кг; M_{Me} –
 молярна маса металу (береться з таблиці Менделєєва); K_{Me} – коефіцієнт
 перерахування – $K_{Me} = (12 \times y/x)/(M_{Me})$. Тоді:

$$m_C^{Ni} = 0,2046 \times 24,25 = 4,96 \text{ кг};$$

$$m_C^{Co} = 0,2038 \times 0,54 = 0,11 \text{ кг};$$

$$m_C^{Fe} = 0,1075 \times 150,0 = 16,13 \text{ кг};$$

$$m_C^{Fe} = 0,215 \times 112,5 = 24,19 \text{ кг};$$

$$m_C^{Si} = 0,8553 \times 6,07 = 5,19 \text{ кг};$$

$$m_C^{Cr} = 0,3469 \times 3,03 = 1,05 \text{ кг}.$$

Кількість вуглецю для науглецювання металу:

$$m_C = 151,7 \times 0,025 = 3,79 \text{ кг}.$$

Разом необхідно вуглецю: 55,43 кг.

Реакція відновлення металів (3.1) протікає з поглинанням теплоти (супроводжується ендотермічним ефектом). Кількість необхідного тепла для проведення реакцій розраховується за формулою:

$$Q = m_{Me} \times \Delta H, \quad (2.3)$$

де m_{Me} – маса відновленого металу, кг; ΔH – тепловий ефект реакції, для даного елемента, кДж/кг.

$$Q_{Ni} = 2204 \times 24,25 = 53447 \text{ кДж}.$$

$$Q_{Co} = 2179 \times 0,54 = 1176 \text{ кДж}.$$

$$Q_{FeO} = 1278 \times 150,0 = 191692 \text{ кДж}.$$

$$Q_{Fe} = 2744 \times 112,5 = 308750 \text{ кДж}.$$

$$Q_{Si} = 22739 \times 6,07 = 138026 \text{ кДж}.$$

$$Q_{Cr} = 7785 \times 3,03 = 23588 \text{ кДж.}$$

Разом: 771492 кДж.

Результати розрахунку зводимо в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахунок кількості вуглецю й теплових витрат на відновлення металів.

Реакції	m_{Me} , кг	m_C , кг	ΔH , кДж/кг	Q, кДж
$NiO+C=Ni+CO$	24,25	4,96	2204	53447
$CoO+C=Co+CO$	0,54	0,11	2179	1176
$1/2Fe_2O_3+1/2C=FeO+1/2CO$	150,00	16,13	1278	191692
$FeO+C=Fe+CO$	112,50	24,19	2744	308750
$SiO_2+2C=Si+2CO$	6,07	5,19	22739	138026
$1/2Cr_2O_3+3/2C=Cr+3/2CO$	3,03	1,05	7785	23588
вуглець у металі		3,79		
Сума		55,43		771492

Приймаємо, що при відновлювальному відпалі в трубчастій обертовій печі відбувається часткове відновлення металів (Ni – на 30%, Co – на 15%, FeO – 20%). У цьому випадку частина вуглецю буде витрачатися ще у ТВП, а залишок – у РТП. Розподіл ендотермічних витрат на відновлення металів між переділами наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Розподіл теплових витрат і витрати вуглецю на відновлення металів між переділами

Реакція	Відновлення у ТВП				Відновлення в РТП			
	%	m_{Me}	Q	m_C	%	m_{Me}	Q	m_C
$NiO+C=Ni+CO$	30	7,28	16035	1,49	70	16,98	37413	3,47
$CoO+C=Co+CO$	15	0,08	176	0,02	85	0,46	1001	0,09
$1/2Fe_2O_3+1/2C=FeO+1/2CO$	20	30,00	49304	3,23	80	120,0	197215	12,90
$FeO+C=Fe+CO$	0	0,00	0	0,00	100	112,50	308750	24,19
$SiO_2+2C=Si+2CO$	0				100	6,07	138026	5,19
$1/2Cr_2O_3+3/2C=Cr+3/2CO$	0				100	3,03	23588	1,05
Сума			65515	4,73			705977	46,90

2.3. Розрахунок витрати антрациту-АС з вмістом золи 15%, вмістом вуглецю 75%

$$M_{AC} = 55,43 / (0,75) = 73,9 \text{ кг.} \quad (2.4)$$

У ньому золи $73,9 \times 0,15 = 11,1$ кг.

Хімічний склад золи відновника наведений у табл. 2.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад золи відновника

Вміст компонента золи АС, %% за масою							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
45	25,1	24	0,9	1,6	2	0,5	0,9

3.4.4. Розрахунок виходу й хімічного складу електропічного шлаку.
Кількість елемента, що переходить у шлак розраховуємо за формулою:

$$M = \%MeO \times 10 - M_{\text{чорн}} \times K + M_{\text{золи}} \times \%MeO, \quad (2.5)$$

де %M – вміст елемента в руді, %; $M_{\text{чорн}}$ – частка елемента в чорновому металі, кг; K – коефіцієнт перерахування на окисли (відношення молярних мас MeO/Me). Тоді:

$$M_{NiO} = 2,5 \times 10 - 24,25 \times 1,273 = 0,14, \text{ кг};$$

$$M_{CoO} = 0,06 \times 10 - 0,54 \times 1,272 = 0,076, \text{ кг};$$

$$M_{FeO} = 15 \times 10 \times 1,287 - 112,5 \times 1,287 + 11,1 \times 0,24 \times 0,9 = 50,6, \text{ кг};$$

$$M_{Cr_2O_3} = 1,3 \times 10 - 3,03 \times 1,4615 = 8,57, \text{ кг};$$

$$M_{CaO} = 1,0 \times 10 + 11,1 \times 0,009 = 10,1, \text{ кг};$$

$$M_{SiO_2} = 39 \times 10 - 6,07 \times 2,1392 + 11,1 \times 0,45 = 382, \text{ кг};$$

$$M_{Al_2O_3} = 11,1 \times 0,251 = 2,79, \text{ кг};$$

$$M_{MgO} = 22,5 \times 10 + 11,1 \times 0,016 = 225,2, \text{ кг};$$

$$\text{Інші} = 1,49 \times 10 + 11,1 \times 0,034 = 15,29, \text{ кг}.$$

Результати розрахунку зведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку виходу й хімічного складу електропічного шлаку

Кількість і вміст компонента в шлаку										
	NiO	CoO	FeO	Cr2O3	CaO	SiO2	Al2O3	MgO	інші	сума
кг	0,955	0,076	50,6	8,567	10,10	382,1	2,824	225,2	15,295	695,73
%	0,14	0,011	7,28	1,23	1,45	54,9	0,41	32,37	2,20	100,00

2.5. Розрахунок виходу електропічних газів

Приймаємо, що газ CO, який утворився за реакцією (3.1) за рахунок підсмоктувань атмосферного повітря частково догоряє в підзводовому просторі печі.

Температура газів, що відходять, - 1000 °С, вміст CO – 55%.

Кількість газів що утворюються в РТП на 1 т сухої руди:

$$V_{CO}^{100} = 46,9 \times 22,4/12 = 87,6, \text{ нм}^3. \quad (2.6)$$

При частковому догоранні до 55 % з 1 нм³ CO утвориться 1,35 нм³ рудного газу, при цьому виділяється 1769 кДж тепла на 1 нм³ газу, що утворився. Разом на 1 т сухої руди утвориться:

$$V_{CO}^{55} = 87,6 \times 1,35 = 118,5, \text{ нм}^3. \quad (2.7)$$

Виділяється тепла: $Q = 118,5 \times 1769 = 209653$ кДж.

Розрахунок об'єму газів, що утворюються, наведений у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахунок об'єму газу, що утворюється, в РТП

Кількість вуглецю, що бере участь в реакціях, кг	46,9
Утворюється CO, нм ³	87,6
Об'єм рудного газу при допалюванні до 55% CO залишкового, нм ³ /т.сух.р.	118,5
Прибуток тепла від допалювання, кДж	209653

2.6. Розрахунок тепловтрат із продуктами переробки руди

Втрати тепла при електроплавці розподіляються на втрати: з газами, що відходять; з металом; зі шлаками.

Розрахунок втрат тепла із продуктами переробки ведемо за формулою:

$$Q = C \times m \times \Delta t, \quad (2.8)$$

де C – питома теплоємність продукту, кДж/кг °С; m – маса продукту, кг; Δt – температура продукту.

$$Q_{\text{газ}} = 0,36 \times 496,5 \times 1000 = 178745, \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{черн}} = 0,28 \times 575,25 \times 1500 = 241603, \text{ кДж},$$

$$Q_{\text{шлак}} = 0,3 \times 2915 \times 1600 = 1398995, \text{ кДж}.$$

Розрахунок теплових втрат наведений у табл. 2.8.

2.7. Розрахунок прибутку тепла

Статтею прибутку тепла є фізичне тепло гарячого огарка. При видачі огарка із ТВП у процесі перевантаження в кубеля й пічні бункери реальна температура огарка при завантаженні в піч становить близько 700 °С.

Таблиця 2.8 – Результати розрахунку тепловтрат із продуктами електроплавки руди

Температура відх. газів, °С	1000
Теплоємність відх. газів, кДж/м ³ °С	0,36
Втрати тепла з відх. газами, кДж	178745
Теплоємність металу, кДж/кг °С	0,28
Температура металу, °С	1500
Теплові втрати з металом, кДж	241603
Теплоємність шлаків, кДж/кг °С	0,3
Температура шлаків, °С	1600
Теплові втрати зі шлаками, кДж	1398995

При видаленні 90 % втрат при прожарюванні вихід огарка з 1 т сухої руди (без обліку пило виносу в ТВП) дорівнює:

$$M = 1000 - (1000 \times 0,1 \times 0,9) + 46,9 / 0,75 = 972,5, \text{ кг}, \quad (2.9)$$

де 1000 – маса руди, $1000 \times 0,1 \times 0,9$ – маса пиловидних домішок що видаляються, 46,9 – кількість відновника завантаженого в піч.

Прибуток фізичного тепла з гарячим огарком дорівнює:

$$Q_{\text{огарка}} = 0,92 \times 972,5 \times 700 = 627515 \text{ кДж.}$$

Теплоспоживання шихти (кількість тепла, яку необхідно підвести за рахунок електроенергії) визначається з різниці в основних статтях прибутку й витрати тепла. При розрахунку питомої витрати електроенергії при електроплавці варто враховувати ККД печі, або т.зв. «холостий хід», величина якого коливається від 7 до 10 мВт, залежно від потужності й типу футеровки печі, що відповідає тепловому ККД РТП 70–75%.

Теплоспоживання шихти дорівнює:

$$T = (705977+241603+1398995+178724) - (627515+209655) = 1688100 \text{ кДж.}$$

З обліком КПД електропечі витрата електроенергії дорівнює:

$$P = 1688100/0,75 \times 0,28 = 638, \text{ кВт/т сухої руди,}$$

де 0,75 – КПД електропечі, 0,28 – коефіцієнт переводу кДж у Вт год.

Розрахунок теплоспоживання електроплавки руди та питомі витрати електроенергії наведений у табл. 2.9.

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку теплоспоживання й питомих витрат електроенергії електроплавки руди

Теплоспоживання 1т руди при електроплавці			
Прибуток тепла		Видаток тепла	
Тепло огарка, кДж	627540	Тепло ендотерм. р-й	705977
Тепло допалювання газів	209655	Тепло металу	241603
		Тепло шлаків	1398995
		Тепло відх. газів	178724
Всього	837195		2525296
Прибуток тепла від електроенергії, кДж			1688100
Прийнятий ККД ел.печі			0,75
Теорет. пит. витрата ел/ен. на т сухої руди, Вт			624750

2.8. Тепловий розрахунок випалу, відновлення та електроплавки руди

У процесі випалу руди відбувається:

- видалення вільної вологи руди (на випаровування 1 кг води потрібно 2682 кДж);
- видалення кристалізаційної вологи руди (необхідно 4818 кДж/кг пп);
- нагрівання огарка до 900 °С.

Вихідні дані:

Потужність однієї РТП, МВт	32
Питома витрата електроенергії, кВт/т сух.р.	624,75
Кількість трубчастих печей у роботі, на одну РТП	2
Продуктивність однієї ТВП по сирій руді з обліком пиловиносу, т/год	43,47
по сухій руді, т/год	29,1

Кількість води, яку необхідно видалити, включаючи відновлювач.

Волога руди – 33%.

Кількість видаляємої вологи шихти:

$$m_{\text{води}} = (1000/0,67-1000)+73,9 \times 0,06 = 496,97, \text{ кг.}$$

При початковій температурі шихти 10 °С, температурі відхідних із ТВП газів 400 °С витрати тепла на нагрівання, випаровування і перегрів водяної пари до 400 °С складають:

$$Q_{\text{води}} = 496,97 \times (100-10 + 539) + 496,97/12 \times 22,4 \times (0,384 \times 400 - 0,3587 \times 100) \times 4,19 = 1614847, \text{ кДж,} \quad (2.10)$$

де 100–10 – кількість тепла, необхідного для нагрівання води до 100 °С, 539 – тепло, необхідне для випаровування 1 кг води, 496,97/12×22,4 – кількість пари, що утворилася, 0,384×400 і 0,3587×100 – кількість тепла 1 м³ пари при температурі 400 і 100 °С, відповідно.

Тепло для проведення ендотермічних реакцій відновлення (табл. 2.4):

$$Q_{\text{енд. ТВП}} = 65515, \text{ кДж.}$$

Втрати тепла з пилом. На даний момент величина пиловиносу становить близько 14 % від маси завантаженої руди. Кількість пилу, що утворилася, дорівнює:

$$m_{\text{пили}} = 1000 \times 0,14 = 140, \text{ кг.}$$

Кількість тепла, що втрачається з пилом дорівнює:

$$Q_{\text{пили}} = 0,75 \times 140 \times 400 = 42240, \text{ кДж,} \quad (2.11)$$

де 0,75 - теплоємність пилу, 400 –температура відхідних із ТВП газів і пилу.

Тепло на видалення ппп: для видалення 1 кг ппп необхідно затратити 4818 кДж. При видаленні 90% ппп витрати тепла складуть:

$$Q_{\text{ппп}} = 1000 \times 0,1 \times 0,9 \times 4818 = 433665, \text{ кДж.}$$

Тепло на нагрівання огарка. При теплоємності огарка 0,92 кДж/кг, виході з 1000 кг сухої руди з обліком пиловиносу: $m_{\text{огарка}} = 1000 + 73,9 - 1000 \times 0,1 \times 0,9 - 140 = 844$ кг, температурі огарка 900 °С, витрата тепла на його нагрівання дорівнює:

$$Q_{\text{огарка}} = 0,92 \times 844 \times 900 = 700107 \text{ кДж.}$$

Теплові втрати ТВП. Приймаємо сумарні теплові втрати ТВП через футеровку й кожух рівними 10560000 кДж/год. Питомі теплові втрати на переробку 1 т сухої руди рівні:

$$Q_{\text{потерь}} = 10560000/29,8 = 337680 \text{ кДж/ т сух. руди.}$$

Разом витрати тепла на одержання огарка дорівнюють:

$$Q_{\text{сумм}} = 1614847 + 65515 + 42240 + 433665 + 700107 + 337680 = 3194054, \text{ кДж.}$$

Розрахунок прибутку тепла. Прибуток фізичного тепла із шихтою. Теплоємність сирової шихти дорівнює 0,75 кДж/кг. При середній температурі шихти 10 °С кількість фізичного тепла, що приходить із шихтою дорівнює:

$$Q_{\text{шихты}} = 0,75 \times (1000 / 0,67 + 73,9) = 11816, \text{ кДж.}$$

Теплотою від угару відновника нехтуємо.

Необхідна кількість теплоти для нагрівання огарка компенсується за рахунок спалювання мазуту.

При спалюванні 1 кг мазуту з подачею повітря для його горіння з коефіцієнтом надлишку повітря 1,4 витрата повітря дорівнює 14,62 нм³/кг.

При цьому утвориться 15,5 нм³/кг газів, що відходять. Теплота згоряння мазуту дорівнює 39805 кДж/кг. Прибуток фізичного тепла від повітря (20 °С) для згоряння дорівнює:

$$Q_{\text{возд}} = 1,3 \times 14,62 \times 20 = 381, \text{ кДж/кг мазуту.}$$

При температурі відхідних газів 400 °С, їхньої середньої теплоємності 1,44 кДж/нм³, кількість тепла що виноситься дорівнює:

$$Q_{\text{отх. газів}} = 1,44 \times 15,5 \times 400 = 8724, \text{ кДж/кг мазуту.}$$

Разом за рахунок згоряння 1 кг мазуту приходить тепла:

$$Q_{\text{мазута}} = 39805 + 381 - 8724 = 31463, \text{ кДж.}$$

Необхідна кількість мазуту для випалу 1 т сухої руди дорівнює:

$$M_{\text{мазута}} = (3194054 - 11816) / 31463 = 101,14, \text{ кг/т.}$$

Висновки: виходячи з розрахунку, витрата технологічних матеріалів на переробку 1 тони сухої нікелевої руди становить:

Відновлювача марки АС – 73,9 кг/т;

Електроенергії на електроплавку – 624,7 кВт/т;

Мазуту на випал – 101,14 кг/т.

Таблиця 2.10 – Тепловий баланс ТВП

Прибуток тепла					Видаток тепла				
	Статті прибутку		кДж	%		Статті видатку		кДж	%
1	тепло від спалювання				1	видалення води		1614847	39,59
	101,14	кг мазуту	4025978	98,71	2	ендот.р-ції		65515	1,61
					3	втрати з пилом		42240	1,04
					4	видалення ппп		433665	10,63
2	фіз.тепло				5	тепло відх. газів		882276	21,63
	1566,44	кг шихти	11816	0,29	6	тепло огарка		700107	17,17
	1479	нм ³ пов.	40890	1,00	7	тепл. втрати ТВП		337680	8,28
					8	нев'язка		2355	0,06
	Сума		40078684	100,0				40078684	100,00

3. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ ПЕЧІ

Об'єм металу знаходять із припущення, що одна тонна рідкого металу займає об'єм $0,145 \text{ м}^3/\text{т}$:

$$V_m = 0,145 Q = 0,145 \cdot 975 = 141,6, \text{ м}^3,$$

де Q – задана ємність ванни в т.

Об'єм шлаку для руднотермічних печей знаходиться із умови, що кількість шлаку за масою в півтора рази більшою, ніж кількість металу при густині шлаку 3 т/м^3 :

$$V_{ш} = 1,5 Q / 3 = 975 / 3 = 487,5, \text{ м}^3.$$

Об'єм руднотермічної печі для сухого огарку приймаємо вдвічі меншим ніж об'єм шлаку:

$$V_o = V_{ш} / 2 = 487,5 / 2 = 243,75, \text{ м}^3.$$

Отже, загальний об'єм руднотермічної печі:

$$V_{\text{заг}} = V_m + V_{ш} + V_o = 141,6 + 487,5 + 243,75 = 872,85 \text{ м}^3;$$

Глибина ванни металу приймається конструктивно :

$$H = 0,6 \text{ м.}$$

Тоді площа поверхні дзеркала металу становить:

$$S = V_m / H = 141,6 / 0,6 = 236, \text{ м}^2.$$

Приймаємо ванну прямокутної форми: $a \cdot b = 9,54 \cdot 24,75 = 236 \text{ м}^2$.

Висота шлакової частини ванни:

$$H_{ш} = V_{ш} / S = 487,5 / 236 = 2,06 \text{ м.}$$

Висота частини ванни під сухий огарок:

$$H_o = V_o / S = 243,75 / 236 = 1,04 \text{ м.}$$

Загальна висота ванни:

$$H = H_m + H_{ш} + H_o = 0,6 + 2,06 + 1,04 = 3,7 \text{ м.}$$

Для забезпечення ходу електродів та рівномірного розподілення шихти приймаємо висоту підзводного простору печі $h_{зв}=1,1$ м.

При визначенні зовнішніх розмірів робочого простору печі товщину футеровки поду, з метою забезпечення надійної теплоізоляції печі, приймають рівною глибині ванни.

Товщина склепіння для печей ємністю більше 40 т становить 380 – 460 мм.

Товщину кладки приймаємо 445 мм, а товщину теплоізоляційного шару – 175 мм.

Потужність пічного трансформатора визначається за формулою

$$P_{тр} = W_{теор} \Pi / \eta \cos \varphi = 625 \cdot 40 / 0,7 \cdot 0,85 = 42017, \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

де $W_{теор} = 625 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{т}$ – теоретичне значення питомої витрати енергії на плавку;
 Π – продуктивність печі, т/год.; $\Pi=40$ т/год;

$\eta = 0,5 \dots 0,7$ – к.к.д. печі;

$\cos \varphi = 0,8 \dots 0,9$ – коефіцієнт потужності печі.

Сила струму в електроді визначається за формулою:

$$I = 10^3 P_{тр} / \sqrt{3} U = 1000 \cdot 42017 / \sqrt{3} \cdot 297 = 81678, \text{ А}$$

де U – вторинна напруга.

Діаметр електрода розраховується із умови, згідно з якою фактична густина електричного струму в електроді дорівнює допустимій $j = 5 - 10 \text{ А} / \text{см}^2$:

$$I = \pi d_{ел}^2 j / 4,$$

звідки

$$d_{ел} = 2 \sqrt{I / \pi j} = 2 \sqrt{81678 / 3,14 \cdot 7} = 120, \text{ см.}$$

де I – сила струму в електроді, А.

На основі розрахунку розробляємо креслення загального виду руднотермічної печі, основних вузлів та їх монтажу.

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти розв'язане важливе технічне завдання проектування руднотермічної печі для плавки феронікелю з окисленої феронікелевої руди.

При розв'язанні даного завдання вирішено наступні задачі:

- розраховано матеріальний і тепловий баланси плавки феронікелю;
- розраховано основні розміри руднотермічної печі;
- розроблено конструкцію та спроектовано креслення загального виду руднотермічної печі для виплавки феронікелю.

В першому розділі описано будову і принцип роботи руднотермічної печі для переробки окисленої нікелевої руди.

В другому розділі розраховано матеріальний і тепловий баланси плавки феронікелю.

В третьому розділі розраховано основні розміри спроектованої руднотермічної печі.

Розроблені креслення загального виду руднотермічної печі та її бічного перерізу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гладких В.А., Гасік М.І., Овчарук О.М., Пройдак Ю.С. Проектування та обладнання електросталеплавильних та феросплавних цехів. - Дніпропетровськ: Системні технології, - 2004. - 736с.
2. Технологічна оцінка мінеральної сировини. Випробовування родовищ. Характеристика сировини: Довідник. / Під ред. П.Є. Остапенко. - М.: Надра, - 2007. - с. 272.
3. Гасік М.І., Лякішев Н.П. Теорія та технологія електрометалургії феросплавів: Підручник.-М.: СП «Інтернет Інжиніринг», - 1999. - 764с.
4. Вейзагер М. Л., Блонтшейн І. А. Стан, перспективи розвитку та техніко-економічні показники роботи зарубіжних нікель-кобальтових заводів: Оглядова інформація / Гіпронікель. - М.: ЦНДІЕЦМ, - 2007. - 70 с.
5. Методи отримання феронікелю з окислених нікелевих руд. // Кольорові метали. - 1995. - №5. - 25 с.
6. Діомідовський Д. А., Оницин Б. П., Ліньов В. Д. Металургія феронікелю. - М.: Металургія, - 1983. - 184 с.
7. Смирнов В. І., Цейдлер А. А., Худяков І. Ф., Тихонов А. І. Металургія міді, нікелю, кобальту. Ч. II. - М.: Металургія, 1966. - 406 с.
8. Проблеми отримання феронікелю з окислених нікелевих руд. // Кольорові метали. - 1992. - №6. - 25с.
9. Тацієнко І. А. Випал руди та концентратів. - М.: Металургія, - 1985. - 232 с.
10. Новіков Н.В., Соколов К.Д., Капран І.І., Овчарук О.М., Електрометалургійна переробка окислених нікелевих руд в Україні: проблеми та перспективи //Металург та гірничоруд. пром-сть. - 2005. - №4. - С.20-24.

11. Соколов К.Д., Капран І.І., Лихачов В.Ф., Овчарук О.М., Дослідження роботи футерування рудотермічних печей при виплавці феронікелю // *Металург, та гірничоруд. пром-сть.* - 2002. - №6. - С.32-35.
12. Новіков Н.В., Капран І.І., Соколов К.Д., Овчарук О.М., Гасік М.І., Петрографічні дослідження взаємодії периклазохромітової футеровки рудовідновлювальної печі з розплавом феронікелю та пічного шлаку // *Металург, і гірничоруд. пром-сть.* - 2006. - №2. - С.27-30.
13. Корольов Еге. А., Нікітіна Л. С., Панаріна Н. П. // *Кольорова металургія. Бюл. ЦНДІЕЦМ.* - 1990. - № 1. - С. 70-72.
14. Єжов Є. І. Рижов О. А., Вігдорчик Е. М., Войханська Н. Л. // *Розробка та впровадження ресурсозберігаючих технологічних процесів у нікель-кобальтовому виробництві: Наук. тр. //Гіпронікель.* - Л., - 1988. - С. 18-23.
15. *Економіка підприємства: Підручник. У 2 т. / За ред. С.Ф. Покропивний.* - К.: Вид-во «Хвиля-Прес», Донецьк, мале підприємство «Пошук». Т-во книголюбів, - 1995. - 280 с.
16. *Економіка та організація виробництва в дипломному проектуванні: Навчальний посібник для ВНЗ / Юзов О.В., Щепілов Ф.І., та ін.* - М.: *Металургія,* - 1991. - 102 с.
17. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітряної робочої зони. М.: *Видавництво стандартів,* 1988 - 75с.
18. Майоров А.Д., Митрофанов С.І., Титова З.П. // *Кольорові метали.* - 1980. - 3.- С. 110 - 112.
19. Резнік І.Д., Харлакова Т.А., Мілованова Л.С. // *Кольорові метали.* - 1981. - 9.- С. 24 - 25.
20. Титова З.П., Ковтун В.А., Яковлева Р.А., Майоров А.Д. // *Кольорові метали.* - 1988. - 4.- С. 33 - 37.
21. Севрюков Н.М. *Металургія кольорових металів.* М.: *Металургія,* 1969. 408 с.

22. Теорія металургійних процесів. Борнадський І.І.. К. Д. Вища школа, 1978 288 с.

23. Нікель: у 3 т., Т. 2./Л.Д. Резнік, Г.П. Єрмаков, Я.А Шнеерсон. - М.: ТОВ «Наука та технологія». 2001. - 468 с.

24. Піменов Л.І., Михайлов В.І. Переробка окислених нікелевих руд, М.: "Металургія", - 1972, - 336 с.

25. Технологічна оцінка мінеральної сировини. Методи досліджень: Довідник / Під ред. П.Є. Остапенко. - М.: Надра, - 1990. - з -264.

ДОДАТКИ