МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Запорізького національного університету

О. В. Харченко

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЧАВУНУ

Методичні рекомендації до практичних робіт
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності G10 “Металургія”
освітньо-професійних програм “Металургія”
і “Металургія чорних металів”

Затверджено
Вченою радою ЗНУ
Протокол № __ від «__»_____2026 р.

Запоріжжя
2026

УДК 669.162
Х227

Харченко О. В. Теорія і технологія виробництва чавуну : методичні рекомендації до практичних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 “Металургія” освітньо-професійних програм “Металургія” і “Металургія чорних металів” : ЗНУ, 2026. 58 с.

Методичні рекомендації призначені для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Металургія», які виконують практичні завдання з дисципліни «Теорія і технологія виробництва чавуну». Методичні рекомендації містять теоретичні відомості та завдання до виконання технологічних розрахунків з оптимізації виробництва чавуну за допомогою навчально-дослідницької програми «Excalibur».

Рецензент
Д. В. Прутцьков, доктор хімічних наук, професор кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

Відповідальний за випуск
Ю. О. Бєлоконь, доктор технічних наук, завідувач кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 РУХ ШИХТИ І ГАЗІВ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ 9
1.1 Рух шихти в доменної печі 9
1.2 Рух газів в доменної печі 10
1.3 Завантаження шихти у піч та управління розподілом матеріалів 12
1.4 Контрольні питання 13
2 УТВОРЕННЯ ЧАВУНУ І ШЛАКУ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ 14
2.1 Фізико-хімічні основи термодинаміки відновлювально-окислювальних процесів 14
2.2 Навуглецювання заліза і утворення чавуну 16
2.3 Утворення шлаку 17
2.4 Контрольні питання 18
3 ИНТЕГРОВАНИЙ РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО І ТЕПЛОВОГО БАЛАНСІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ 19
3.1 Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу доменного процесу .. 19
3.2 Математичне формулювання прямої задачі 20
3.3 Математичне формулювання зворотної задачі 22
3.4 Диференціальні коефіцієнти засвоєння 23
3.5 Контрольні питання 24
4 ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ 25
4.1 Загальні положення 25
4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи 28
4.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи 28
4.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи 29
4.5 Вимоги безпеки в аварійній ситуації 29
5 ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ 31
5.1 Практична робота №1. Ознайомлення з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur». Проплавлення шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, коксу і флюсу 31
5.1.1 Порядок виконання роботи 31

5.1.2 Контрольні питання..... 32
5.1.3 Звіт з практичної роботи №1..... 33
5.2 Практична робота №2. Проплавлення шихти при виробництві чавуну із застосуванням залізної руди, окатишів, коксу і флюсу..... 34
5.2.1 Порядок виконання роботи..... 34
5.2.2 Контрольні питання..... 35
5.2.3 Звіт з практичної роботи №2..... 36
5.3 Практична робота №3. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням регламентованого відсотка агломерату, окатишів, залізної руди, коксу і флюсу..... 37
5.3.1 Порядок виконання роботи..... 37
5.3.2 Контрольні питання..... 38
5.3.3 Звіт з практичної роботи №3..... 39
5.4 Практична робота №4. Проплавлення шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, залізної руди, марганцевого концентрату, коксу і флюсу..... 40
5.4.1 Порядок виконання роботи..... 40
5.4.2 Контрольні питання..... 41
5.4.3 Звіт з практичної роботи №4..... 42
5.5 Практична робота №5. Оптимізація витрати коксу при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, коксу і флюсу..... 43
5.5.1 Порядок виконання роботи..... 43
5.5.2 Контрольні питання..... 44
5.5.3 Звіт з практичної роботи №5..... 45
5.6 Практична робота №6. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням залізної руди, окатишів, коксу і флюсу..... 46
5.6.1 Порядок виконання роботи..... 46
5.6.2 Контрольні питання..... 47
5.6.3 Звіт з практичної роботи №6..... 48
5.7 Практична робота №7. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, залізної руди двох сортів, коксу і флюсу..... 49
5.7.1 Порядок виконання роботи..... 49

5.7.2 Контрольні питання..... 50
5.7.3 Звіт з практичної роботи №7..... 51
5.8 Практична робота №8. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, залізної руди, марганцевого концентрату, коксу і флюсу..... 52
5.8.1 Порядок виконання роботи..... 52
5.8.2 Контрольні питання..... 53
5.8.3 Звіт з практичної роботи №8..... 54
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА..... 55

ВСТУП

Дисципліна «Теорія і технологія виробництва чавуну» розглядає комплекс питань, що стосуються технологічних, фізико-хімічних та техніко-економічних аспектів виробництва чавуну сучасними методами.

В курсі «Теорія і технологія виробництва чавуну» викладаються фундаментальні та прикладні знання для проведення різноманітних досліджень та вирішення задач теоретичної та практичної підготовки студентів для оволодіння основами закономірностей процесів виплавки чавуну, вивчення сучасних тенденцій щодо розробки та впровадження нових і вдосконалення існуючих технологічних схем і процесів доменного виробництва.

Курс «Теорія і технологія виробництва чавуну» розрахований на здобувачів денної та заочної форми ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності G10 «Металургія» освітньо-професійних програм «Металургія» і «Металургія чорних металів».

Основна **мета дисципліни** – надання студентам уявлень про історію розвитку та сучасний стан виробництва чавуну; формування знань теоретичних основ і навичок щодо практичного здійснення сучасних доменних технологій; підготовка фахівця для виробничої, технологічної і дослідницької діяльності у сфері виробництва чавуну.

Основними **завданнями** вивчення **дисципліни** є оволодіння здобувачами знаннями з процесів виробництва чавуну сучасними методами, вивчення фізико-хімічних закономірностей і технологічних особливостей доменних процесів, позапічної обробки з метою рафінування, зокрема десульфурації і десиліконізації чавуну.

У виданні наведено загальну фізико-хімічну характеристику відновлювально-окислювальних процесів, інтегрований розрахунок матеріального і теплового балансу плавки чавуну, комплекс практичних робіт для закріплення теоретичного матеріалу.

У результаті вивчення навчальної дисципліни студент повинен

– **знати:** основні процеси металургії чавуну; вимоги до сировини; технології сучасних доменних процесів; фізико-хімічні процеси відновлення заліза з залізовмісної шихти і рафінування передільного чавуну; можливості ресурсо- та енергозбереження при застосуванні сучасних технологій.

– **вміти:** розрахувати оптимальний склад шихти для отримання передільного чавуну з заданим хімічним складом; виконувати термодинамічний аналіз процесів металургії чавуну.

В результаті вивчення навчальної дисципліни «Теорія і технологія виробництва чавуну» здобувач повинен набути таких **результатів навчання**

(компетентностей):

– Здатність застосовувати системний підхід до вирішення проблем металургії чавуну.

– Здатність вирішувати типові інженерні завдання відповідно до спеціалізації.

– Критичне осмислення наукових фактів, концепцій, теорій, принципів і методів, необхідних для професійної діяльності в сфері металургії чавуну.

– Здатність застосовувати і інтегрувати знання на основі розуміння інших інженерних спеціальностей.

– Здатність застосовувати наукові і інженерні методи, а також комп'ютерне програмне забезпечення для вирішення типових та комплексних завдань металургії сталі, у тому числі в умовах невизначеності.

– Усвідомлення характеристик специфічних матеріалів, обладнання, процесів та продуктів металургії чавуну.

– Здатність управляти комплексними діями або проєктами відповідно до спеціалізації для забезпечення досягнення поставленої мети з урахуванням всіх аспектів вирішуваної проблеми, у тому числі пов'язаних із виробництвом, експлуатацією, технічним обслуговуванням та утилізацією.

– Здатність забезпечувати якість продукції металургії чавуну.

– Усвідомлення вимог до діяльності в сфері спеціалізації, зумовлених необхідністю забезпечення сталого розвитку.

– Здатність реалізовувати концепції ощадливого виробництва та загальні принципи зниження виробничих витрат у металургії чавуну, а також впроваджувати ресурсозберігаючі технології, які дозволяють акумулювати ресурси, спрямовані на досягнення цілей в усіх напрямках діяльності металургійного підприємства.

Навчальна дисципліна «Теорія і технологія виробництва чавуну» продовжує фахову підготовку здобувача і базується на знаннях, отриманих при вивченні таких дисциплін, як: «Хімічна термодинаміка», «Сировинні матеріали та їх підготовка до металургійного виробництва», «Теорія металургійних процесів», «Конструкція металургійних агрегатів» та ін.

Практичні роботи курсу виконуються із застосуванням багатофункціональної навчально-дослідницької програми «EXCALIBUR», яка забезпечує термодинамічний аналіз сталеплавильних процесів в системах «метал-шлак-газ» з урахуванням матеріального і ентальпійного теплового балансів. Програма виконує розрахунок різних варіантів ведення доменної плавки, позапічної обробки, десульфурації і десиліконізації чавуну.

Практичні заняття є важливою складовою частиною засвоєння навчального матеріалу з дисципліни «Теорія і технологія виробництва чавуну».

Видання допоможе здобувачам засвоїти теми, що передбачені силабусом навчальної дисципліни «Теорія і технологія виробництва чавуну», насамперед, загальну фізико-хімічну характеристику доменних процесів.

Курсом передбачені контрольні питання для самоконтролю студентів.

1 РУХ ШИХТИ І ГАЗІВ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

Матеріали, що опускаються зверху вниз, омиваються відновлювальним газовим потоком, що рухається вгору, який утворюється в горні доменної печі при спалюванні горючих матеріалів киснем дуття.

У зустрічних потоках шихти і газу здійснюється теплообмін і відновлення заліза із оксидів. В результаті цього відбуваються всі фізико-хімічні перетворення, що забезпечують одержання чавуну і шлаку.

Чим краще розподілені матеріали по перетину окружності печі, тим ефективніше йде доменний процес. Ідеальним був би такий процес, коли в будь-якому перетині печі одиниця маси залізорудного матеріалу омивалась однаковою кількістю газу. В реальних умовах цього майже ніколи не досягається із-за різної якості сировини і особливостей горіння коксу в горні. Тому ставиться питання створення найбільш сприятливих умов для максимального наближення до ідеальних.

Головним ускладненням у створенні таких умов і вивченні процесів в печі є дискретність стовпа шихти в горизонтальному та вертикальному перетинах. Це ускладнює математичний опис доменного процесу, руху матеріалів і газів, необхідний для створення системи автоматичного керування процесом і ходом доменної печі.

1.1 Рух шихти в доменної печі

Матеріали завантажуються зверху на колошник доменної печі завдяки безперервному руху їх в печі. Головними умовами опускання матеріалів в печі є [1]:

- горіння коксу в горні;
- зменшення об’єму матеріалів внаслідок уминки;
- перехід матеріалів із твердого в рідкий стан (плавлення);
- періодичний випуск із печі чавуну і шлаку.

Горіння коксу звільнює простір у фурм, в який надходить кокс, розташований вище вогнищ горіння. 80-85 % коксу надходить в зону горіння, а 15-20% витрачається в реакціях відновлення і процесі навуглецювання заліза.

Уминка відбувається за рахунок руйнування шматків неміцних матеріалів. Механічна уминка зменшує об’єм матеріалів на 10-15 % в порівнянні з об’ємом завантажених матеріалів на колошнику. При добре підготовленій шихті уминка може зменшитись до 2-5 %.

Плавлення шихти особливо важливо при малій витраті коксу. Над зонами плавлення утворюються зони прискореного сходу шихти.

Періодичний випуск продуктів плавки при нарощуванні числа випусків може зробити рух шихти більш рівномірним і навіть безперервним.

Завантажені на колошник шихтові матеріали починають поступово опускатися вниз і проходять шлях від колошника до горна за 5÷8 годин, а гази, що рухаються назустріч, за 2÷10 с. При опусканні вниз завантажені на колошник холодні матеріали безперервно омиваються гарячими відновними газами, що рухаються вгору. Відновні гази утворюються в горні при спалюванні палива в кисні дуття. За час руху матеріалів зверху вниз відбуваються всі фізико-хімічні перетворення, необхідні для отримання чавуну і шлаку.

Швидкість руху матеріалів по перетину печі не однакова. Найбільша швидкість спостерігається над осередками горіння коксу. У напрямку до центру печі вона знижується. Рух газів відбувається внаслідок тиску у горні внаслідок подачі дуття. На характер руху та розподіл газів у доменній печі впливає якість шихтових матеріалів та розподіл їх при завантаженні на колошнику печі. Отже, шихта повинна бути відповідним чином розподілена на колошнику печі, щоб забезпечити оптимальну газопроникність. У стін та в центрі печі необхідно розташовувати шматковий матеріал (великі шматки коксу та агломерату), а в проміжній зоні зосереджувати дрібніші фракції залізорудної частини шихти.

1.2 Рух газів в доменної печі

Рух газів в печі можна розглядати як рух по ряду паралельних каналів, створених частками матеріалів і сполучених між собою, або як послідовне обтікання грудок, що не мають правильної геометричної форми. Завдяки тертю о стінки каналів тиск і швидкість газів по мірі підйому зменшується.

Для управління роботою газів необхідно отримати математичні рівняння руху газів у прошарку, рішення яких дозволило б визначити реальні значення швидкостей, тиску та температур в будь-якій точці печі.

Газодинамічним показником роботи доменної печі є втрата напору газів за висотою печі, тобто перепад тиску. На перепад тиску газів впливає ряд технологічних факторів: гранулометричний склад шихти, властивості шлаку, витрати дуття тощо.

Гранулометричний склад шихти здійснює головний вплив на газодинаміку печі. Із врахуванням нерівномірно розподіленого матеріалу по колу та радіусу печі її поділяють на ряд секторів, в яких ці показники також відрізняються: в зоні низької газопроникності матеріали погано обробляються і навпаки. Тому вони приходять до горна недостатньо підготовленими і

витрачають надлишковий кокс на пряме відновлення.

Організація процесу сприяє руху газів уздовж стін, де опір газу менше, ніж в шихті з шорсткими каналами.

Оскільки шихта неоднорідна за гранулометричним складом, її розподіляють неоднаково: великі шматки рудної частини – на периферії та в центрі печі, дрібні – в проміжку між ними. Там, де знаходяться великі шматки руди, рудне навантаження на кокс менше; де розміщується дрібна руда, її навантаження на кокс більше.

Зазвичай печі оснащуються пристроями для заміру температури або вмісту CO_2 в газі по радіусу колошника на 1-2 метри нижче рівня засипу.

Витрата дуття. Підвищення витрати дуття сприяє збільшенню кінетичної енергії і швидкості руху газів і тим самим – більшому проникненню газів до центру горну і забезпечує більш рівномірний розподіл їх по перетину печі. При цьому шихта по радіусу печі обробляється рівномірніше. Проте «передув» ускладнює опускання шихти. Тому витрата дуття для різної якості шихти повинна мати свій оптимум.

Нерівномірний розподіл дуття між фурмами порушує стабільну роботу печі по колу та радіусу. Тому дуття між фурмами потрібно розподіляти рівномірно, попереджаючи розвиток канального ходу газів.

Властивості шлаків, що залежать головним чином від їх складу і температури в печі, також впливають на газодинаміку печі. Збільшення температурного інтервалу переходу руди з твердого в рідкий стан, збільшення виходу шлаку зменшують об’єми порожнин між шматками коксу і відтак знижують газопроникність. Можуть наступати відстої рідини, де замало каналів для виходу газів. Це призводить до перерозподілу газового потоку і може настати ефект «заклинання». Вище розміщені прошарки твердого матеріалу склеюються густими шлаками, утворюється склепіння, непроникне для газів. Відтак настає підвисання шихти.

Отже, потрібно використовувати агломерат з вузьким температурним інтервалом розм’якшення і належні за складом шлаки.

Час перебування газів в печі складає 2-4 с, а швидкість їх руху змінюється від 4 до 12 м/с.

Швидкість газів визначають введенням у фурми радіоактивних індикаторів (радон-222) або інертних газів і фіксують час їх проходження до колошника. За умови якісної шихти отримують розподіл швидкостей по радіусу печі, що має локальний максимум на відстані 1-2 м від стін печі.

Параметрами якості шихти, що найбільше впливають на газодинаміку печі, є еквівалентний розмір шматків ($d_{екв}$), середній діаметр шматків ($d_{сер}$) і середньоквадратичне відхилення від середнього (σ).

Еквівалентний і середній розміри шматків визначають середню газопроникність, а σ – ущільнення внаслідок різниці розмірів шматків.

Якщо значення σ велике, то матеріал характеризується більшим діапазоном за крупністю. Якщо ж σ мале, то відповідно малим. У другому випадку розподіл буде більш рівномірним, ніж в першому, а використання газів кращим.

1.3 Завантаження шихти у піч та управління розподілом матеріалів

Раціональний розподіл матеріалів в доменній печі забезпечує досягнення найкращих показників доменної плавки. Задовільним розподілом вважається таке, коли найбільша доля рудної частини шихти знаходиться в проміжку між периферійною та осьовою зонами. Це досягається прийомами завантаження на конусних засипних апаратах або іншими прийомами при використанні безконусних завантажувальних пристроїв.

Більша частина доменних печей оснащена конусними пристроями, для яких характерні наступні прийоми управління розподілом матеріалів.

Схема подачі матеріалів в піч порційна. Порція матеріалів, що надходить у піч, називається подачею. У склад подачі входить 4-6 скипів матеріалів, що набираються на великому конусі. У складі рудної частини частіше використовується агломерат (А) і окатиші (О), а у паливній – кокс (К). Тому програму подачі скорочено позначають як ААКК↓ – пряма сумісна, ККАА↓ – зворотна сумісна і таке інше.

Послідовність завантаження. Дози рудних матеріалів і коксу завантажуються в скіпи, якими вони транспортуються до колошника. Дози через приймальну лійку потрапляють у воронку малого конусу, де вони обертаються розподільником навколо вертикальної осі на заданий кут, і після відкриття малого конусу перевантажуються у воронку великого конуса. Таким чином, у воронці великого конуса набирається подача, яка після відкриття конуса потрапляє в колошниковий простір доменної печі.

При засипанні матеріалів в піч мають значення:

– траєкторія руху матеріалів з великого конуса;
– кути нахилу матеріалів в печі;
– зазор між кромкою конуса і стінкою колошника;
– робочій рівень засипу шихти в печі;
– маса залізорудної подачі;
– профіль засипу матеріалів перед завантаженням чергової порції;
– порядок завантаження матеріалів;

– режим роботи обертового розподільника шихти.

Траєкторія руху матеріалів при засипанні залежить від кута нахилу поверхні великого конуса, фізичних властивостей матеріалів і зустрічного газового потоку.

Значення природних кутів нахилу наступні: для коксу 26-28 град, для руди 28-32 град, для агломерату 31-33 град.

Зазор між кромкою конуса і стінкою колошника визначає розташування гребеня руди при однаковому рівні засипу: чим він більше, тим далі від стін розташовується гребень та навпаки. Він повинен бути оптимальним для печей різного об'єму – від 800 до 1050 мм.

Робочій рівень засипу визначається відстанню від нижньої кромки великого конуса у відкритому стані до поверхні засипу. Чим він більше, тим гребень матеріалів ближче до стін. Але надмірне збільшення рівня призводить до відбиття матеріалів від стін, і гребень зміщується до осі. Одночасно спостерігається зсув матеріалів попередньої порції до осі, оскільки падаючий матеріал має велику кінетичну енергію. Відтак газ використовується гірше, тому що порушується співвідношення руда-кокс (рудне навантаження) в мініоб'ємах печі.

Маса подачі являє собою кількість рудної (а відповідно й коксової) частини шихти у скіпі, а відповідно і у подачі: чим більше руди в скіпі, тим більше її в подачі. Аналіз геометрії розташування матеріалів при збільшенні маси подачі показує, що більше довантажується рудою осьова зона і покращується газопроникність периферії печі.

1.4 Контрольні питання

1. Які чинники впливають на розподіл матеріалів по окружності і радіусу доменної печі.
2. Які чинники визначають кут укосу шихтових матеріалів.
3. Вплив кута укосу на розподіл шихтових матеріалів.
4. Вплив маси подачі на розподіл шихтових матеріалів.
5. Вплив порядку завантаження на розподіл шихтових матеріалів.
6. Вплив рівня засипки на розподіл шихтових матеріалів.
7. Вплив обертового розподільника шихти на розподіл шихтових матеріалів.
8. Улаштування установки.
9. Розрахунок коефіцієнтів нерівномірності шихтових матеріалів по окружності і радіусу колошника.

2 УТВОРЕННЯ ЧАВУНУ І ШЛАКУ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

2.1 Фізико-хімічні основи термодинаміки відновлювально-окислювальних процесів

Термодинаміка вивчає закони теплової рівноваги і перетворення тепла в інші види енергії. Хімічна термодинаміка вивчає рівновагу хімічних реакцій, їх теплові ефекти і фактори, що впливають на них. Для характеристики системи використовують величини, що називаються параметрами стану або процесу [1].

Параметри стану: концентрація, температура, тиск, об'єм.

Параметри процесу – величини, що характеризують зміну системи, пов'язані зі зміною параметрів стану. До них відноситься ентальпія, ентропія, енергія Гельмгольца, енергія Гіббса [2].

У 1882р. Гельмгольц увів поняття «вільної енергії», названої енергією Гельмгольца, яка визначається через внутрішню енергію U, ентропію S і абсолютну температуру T рівністю:

$$A = U - TS \tag{2.1}$$

Цю енергію при постійному об'ємі називають ізохорним потенціалом.

Енергію при постійному тиску називають енергією Гіббса G, яку визначають через ентальпію S:

$$G = H - TS \tag{2.2}$$

Енергія Гіббса пов'язана з енергією Гельмгольца співвідношенням:

$$G = A + pV, \tag{2.3}$$

де p – тиск, V – об'єм.

Для розрахунків ентальпія простих речовин (хімічних елементів) при температурі 25 °С (298 К) приймають рівною нулю ($H_{298} = 0$); ентропію речовин при абсолютному нулі ($T = 0$) рівною нулю ($S_0 = 0$).

Для розрахунків використовують зміни вказаних величин: ΔG, ΔH, ΔS. Отже рівняння зміни енергії Гіббса при постійному тиску і температурі T буде:

$$\Delta G_T = \Delta H_T - T\Delta S_T \tag{2.4}$$

Розрахунки змін параметрів зазвичай виконують за стандартних умов:

парціальний тиск кожного компонента дорівнює 100 кПа, а конденсовані речовини (рідини і тверді тіла) знаходяться під цим тиском при значенні активності, що дорівнює одиниці [3].

Стандартні значення термодинамічних величин позначають верхнім індексом «нуль»: ΔG^0, ΔH^0, ΔS^0. Стандартну зміну енергії Гіббса можна обчислити через константу рівноваги K_p:

$$\Delta G^0 = -RT\ln K_p \qquad (2.5)$$

Стандартною температурою приймають 298 К, тому стандартні значення для стандартної температури позначають наступним чином ΔG^0_{298}, ΔH^0_{298}, ΔS^0_{298}.

У більшості випадків температура металургійних процесів істотно відрізняється від стандартної.

На практиці температурні умови змінюються по ходу плавки, тому в довідникової літературі ентальпія та ентропія позначаються відповідно буквами A і B, а розрахунок енергії Гіббса виконують за формулою:

$$\Delta G = A + BT \qquad (2.6)$$

При зміні температури $T\Delta S$ змінюється більше, ніж ΔH, тому $\Delta G < 0$; при рівновазі $\Delta G = 0$. Якщо $\Delta G > 0$, то реакція йде в зворотному напрямку. Процес або реакція можуть відбуватися мимовільно лише в тому випадку, коли енергія Гіббса зменшується.

При відновленні металів з оксидів залізорудних матеріалів в доменній печі визначальне значення має міцність оксидів, що визначається хімічною спорідненістю металів до кисню, яка в свою чергу визначається тиском (пружністю) дисоціації. Тиск дисоціації являє собою тиск кисню p_{O2} за умови рівноваги в системі кисень-оксид [4]:

$$Me + O_2 \rightarrow MeO_2;\ \ Kp = a_{(MeO2)}/(a_{Me}\cdot a_{O2}), \qquad (2.7)$$

де $a_{(MeO2)}$, a_{Me}, a_{O2} – активності відповідних компонентів.

Для термодинамічних розрахунків активність являє собою допоміжну розрахункову величину, яка характеризує ступінь зв’язаності молекул, атомів або іонів компоненту. При утворенні компонентом в розчині яких-небудь сполук його активність знижується, а при зменшенні сил взаємодії між

частками розчинника і розчиненим компонентом – збільшується.

При зменшенні концентрації розчиненого компонента до величин менше одного відсотка властивості реального розчину наближуються до властивостей ідеального. Такі розчини прийнято називати розведеними [5]. Згідно до закону Генрі в розведеному розчині тиск пари розчиненої речовини p_i пропорційний до його концентрації C_i, тобто $p_i = r \cdot C_i$, де r – коефіцієнт пропорційності (константа Генрі).

У розчинах активність компонентів можна прийняти пропорційною їх концентрації: $a_i = \gamma_i \cdot C_i$. Величина γ_i називається коефіцієнтом активності компонента i. Вона характеризує ступінь відхилення властивостей розчину від ідеального розчину, в якому коефіцієнт активності всіх компонентів дорівнює одиниці. У розведених розчинах коефіцієнт активності майже не змінюється. Прикладом розчину, наближеному до ідеального, є розчин марганцю в залізі в рідкому стані. В такому розчині $\gamma_i \cong 1$, і активність компонентів можна прийняти рівною їх концентрації [6].

2.2 Навуглецювання заліза і утворення чавуну

Чавун утворюється при порівняно низьких температурах в результаті розчинення вуглецю залізом. При цьому залізо знаходиться в твердому стані і його взаємодії з сажистим вуглецем утруднено із-за недостатнього взаємного контакту. В цих умовах залізо розчиняє не більше 1 % вуглецю.

Процес навуглецювання свіжовідновленого заліза в шахті печі можна розділити на чотири стадії.

<u>В першій стадії</u> при температурах 400-1000 °С на поверхні свіжовідновленого заліза відбувається випадіння сажистого вуглецю за реакціями:

$$CO + H_2 \leftrightarrow C_{саж} + H_2O + 124{,}5 \text{ МДж} \quad (2.8)$$

$$2CO \leftrightarrow C_{саж} + CO_2 + 166{,}3 \text{ МДж} \quad (2.9)$$

Протіканню цих реакцій сприяють збільшення тиску в печі, висока відновлюваність заліза, ріст основності і вмісту водню в газовій фазі [7].

<u>Друга стадія</u> пов’язана з першою і характеризується дифузією сажистого вуглецю в об’єм металевого заліза при 950-1150 °С [8]:

$$3Fe + C_{саж} \leftrightarrow Fe_3C + 15{,}0 \text{ МДж} \quad (2.10)$$

Сумарною реакцією (2.9) і (2.10) є:

$$3Fe + 2CO \leftrightarrow Fe_3C + CO_2 + 181{,}3 \text{ МДж} \qquad (2.11)$$

Третя стадія – плавлення заліза з вмістом близько 2 % вуглецю при температурах вище 1150 °С і стікання крапель по коксовій насадці з розчиненням в ньому вуглецю коксу:

$$3Fe + C_к \leftrightarrow Fe_3C \qquad (2.12)$$

Четверта стадія завершується в горні. Тут продовжується розчинення вуглецю залізом і марганцем в залежності від температури в горні, часу перебування і складу чавуну в горні. Одночасно у фурменій зоні йде окислення вуглецю чавуну [9].

За аналогією за процесом відновлення перші дві стадії можуть називатися непрямим, а останні дві – прямим навуглецюванням [10].

В сучасній доменній плавці в чавуні на випуску з урахуванням технологічних параметрів розчиняється від 3,5 до 4,5 % вуглецю. Остаточний вміст вуглецю в чавуні залежить від хімічного складу чавуну і визначається за формулою:

$$[C] = 4{,}6 + 0{,}03[Mn] - 0{,}27[Si] - 0{,}32[P] - 0{,}032[S] \qquad (2.13)$$

Марганець, хром і ванадій з вуглецем також утворюють карбіди, тому чим їх в сплаві більше, тим більше і загальний вміст вуглецю: в передільному чавуні з 1,2 % *Mn* міститься до 4,5 % вуглецю, в дзеркальному (до 25 % *Mn*) – до 5,5 %, в 75 % феромарганці – 6,5-7,0 %.

Кремній, фосфор і сірка утворюють з залізом силіциди, фосфіди і сульфіди, знижуючи його активність відносно вуглецю. Тому в ливарному чавуні з 3,5% кремнію міститься до 3,5 % вуглецю, а в 10 % феросиліції – всього лише 2 %. Вміст вуглецю в 1,5 % фосфористому чавуні не перевищує 3,2 %.

2.3 Утворення шлаку

Шлак у доменній печі є продуктом плавлення пустої породи залізорудних матеріалів і золи коксу. Порода, як правило, не відповідає вимогам для виплавки якісного чавуну. Тому для забезпечення необхідних фізико-хімічних

властивостей шлаку в шихту додають флюс.

В рудах зазвичай міститься кремнеземисто-глиноземиста порода, яка вимагає офлюсування вапняком.

Шлак складається з таких сполук: CaO, SiO_2, MgO, Al_2O_3, MnO, FeO та ін.

Частина кремнію з кремнезему відновлюється в чавун.

У складі шлаку, в залежності від хімічного складу породи, можуть бути також оксиди титану, хрому, ванадію, молібдену тощо. Взагалі хімічний склад утворюваного шлаку в першу чергу визначає хід процесів для отримання тієї чи іншої марки чавуну [11].

При нагріванні породи відбувається твердофазне спікання оксидів між собою, а також з оксидами заліза. Потім спік розм'якшується, розчиняючи в собі все більшу кількість домішок, розплавляється, утворюючи первинний шлак з великою кількістю FeO. Стікаючи вниз, оксид заліза відновлюється, переводячи шлаки в проміжні, і коли шлак стікає до горна, він містить менше 0,5 % FeO. Такий шлак називається кінцевим.

В залежності від хімічного складу породи змінюється хімічний склад шлаку. Це впливає на довжину зони шлакоутворення по висоті печі, що в свою чергу визначає газопроникність печі.

Чим протяжніше зона шлакоутворення по висоті печі, тим гірше газопроникність, тим гірше працює піч і навпаки. Тому при підготовці сировини прагнуть отримати такий агломерат, щоб він розм'якшувався і починав плавитися при більш високих температурах, що скоротить зону шлакоутворення і підвищить продуктивність печі [12].

2.4 Контрольні питання

1. Які фізико-хімічні і термодинамічні величини є параметрами стану і параметрами процесу?
2. За якої стандартної температури ентальпію простих речовин у розрахунках приймають рівною нулю?
3. Яким співвідношенням пов'язані енергія Гіббса та енергія Гельмгольца?
4. За яких термодинамічних умов процес або реакція можуть відбуватися мимовільно?
5. На які стадії можна умовно розділити процес навуглецювання свіжовідновленого заліза в шахті доменної печі?
6. Які чинники впливають на довжину зони шлакоутворення по висоті печі?

3 ИНТЕГРОВАНИЙ РОЗРАХУНОК МАТЕРІАЛЬНОГО І ТЕПЛОВОГО БАЛАНСІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

3.1 Пряма і зворотна задачі термодинамічного аналізу доменного процесу

Визначення 1. *Пряма задача термодинамічного аналізу доменного процесу* або підпроцесу полягає у визначенні кінцевих температури, мас і хімічного складу фаз системи «метал-шлак-газ» при заданих тиску, масах і температурах вихідних шихтових матеріалів, кількостях енергоносіїв і величині теплових втрат.

Визначення 2. *Зворотна задача термодинамічного аналізу доменного процесу* або підпроцесу полягає у визначенні необхідних мас вихідних шихтових матеріалів для гарантованого отримання заданих температури, маси і хімічного складу кінцевого металу з урахуванням можливих обмежень по масах матеріалів, хімічному складу і масі шлакової і газової фаз [13].

Пряма задача об'єктивно має єдине рішення, тоді як зворотна задача може мати нескінченну безліч рішень або зовсім не мати жодного рішення. Якщо зворотна задача має які-небудь рішення, то накладення умови мінімальної вартості набору шихтових матеріалів дозволяє отримати єдине оптимальне рішення цієї зворотної задачі.

Якщо рішення прямої задачі може бути самодостатнім, то при рішенні зворотної задачі необхідно щонайменше один раз звертатися до рішення прямої задачі. На практиці рішення однієї зворотної задачі з оптимізацією вимагає багатократного рішення прямої задачі.

Якщо доменний процес або підпроцес формально представити у вигляді системи, на вході якої заданий вектор незалежних керівників змінних **X** (такі як: шихтові матеріали, енергоносії, тиск і температура), а на виході – вектор залежних змінних **Y**, таких як метал, шлак і газ певного складу і маси, то *пряму задачу* термодинамічного аналізу такої системи можна визначити як функцію **Y(X).** Відповідно, *зворотна задача* визначається функцією **X(Y).**

У початковому стані система може складатися з розплавленої системи «метал-шлак» і будь-яких завантажуваних шихтових матеріалів (агломерату, залізної руди, окатишів, коксу, флюсу тощо) – в процесі плавки або на випуску з доменної печі, або тільки із завантажуваних шихтових матеріалів – на початку плавки. Крім того, в систему потрапляє матеріал футерівки печі, кількість якого визначається статистично. У кінцевому стані система має температуру T і в загальному випадку складається з розплавлених металу, шлаку і газової фази.

У кожен момент часу, або після завершення якої-небудь операції

введення матеріалів і енергії, система вважається закритою по матеріальному балансу, але відкритою для енергії, що поступає, і теплових втрат. При безперервному введенні матеріалів і енергії загальний час розбивається на короткі періоди, впродовж яких відбувається проплавлення шихтових матеріалів, що поступили. При цьому розглядається послідовність початкових і кінцевих станів системи. На кожному етапі такої послідовності вирішуються пряма і зворотна задачі в тандемі.

Рішення прямої і зворотної задачі термодинамічного аналізу будь-якого доменного процесу реалізоване у багатофункціональній навчально-дослідницькій програмі «Excalibur» [14, 15].

3.2 Математичне формулювання прямої задачі

В загальному вигляді пряма задача формулюється у вигляді рівняння стану системи «метал-шлак-газ» відносно рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі:

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}, \overline{\mathbf{m}}_{[]}, \overline{\mathbf{m}}_{()}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}, p, T, Q) = \mathbf{0}, \tag{3.1}$$

де $\mathbf{m}$ – вектор мас елементів в системі; $\overline{\mathbf{m}}_{[]}, \overline{\mathbf{m}}_{()}, \overline{\mathbf{m}}_{\{\}}$ – шукані вектори рівноважних мас елементів в металі, шлаку і газі; p, T – тиск і температура в системі; Q – теплова енергія, що надійшла в систему у вигляді енергоносіїв, за вирахуванням теплови втрат.

Рівняння стану (3.1) є рівнянням матеріального і теплового балансу доменного процесу, записаного в загальному вигляді.

Постачальником мас елементів $\mathbf{m}$ в систему є рідкий метал і шлак, футерівка печі, а також різні шихтові матеріали, що завантажуються в піч, у тому числі агломерат, залізна руда, окатиші, кокс, флюс, дуття тощо.

Умовою термодинамічної рівноваги в системі «метал-шлак-газ» являється рівність хімічних потенціалів компонентів (хімічних елементів) в металі, шлаку і газовій фазі. Крім того, має бути забезпечена електронейтральність шлакової фази. Ці умови формулюються у вигляді системи $2k+1$ рівнянь [13]:

$$\begin{cases} \Delta\mu_{[\mathrm{i}]} = RT \ln(K_{[i]} a_{[i]} / a_{(i)}) = 0, \ i = 1..k; \\ \Delta\mu_{\{\mathrm{i}\}} = RT \ln(K_{\{i\}} a_{[i]} / a_{\{i\}}) = 0, \ i = 1..k; \\ \sum_{i=1}^{k} x_{(i)} \nu_i = 0, \end{cases} \tag{3.2}$$

де $\Delta\mu_{[\mathrm{i}]}$, $\Delta\mu_{\{\mathrm{i}\}}$ – різниці хімічних потенціалів компонентів (хімічних елементів)

відповідно між металом і шлаком і між металом і газом; R – універсальна газова стала; T – температура в системі; $K_{[i)}$, $K_{[i\}}$ – константи рівноваги «метал-шлак» і «метал-газ»; $a_{[i]}$, $a_{(i)}$ $a_{\{i\}}$ – активності компонентів в металі, шлаку і газі; $x_{(i)}$ – мольні частки елементів в шлаку; ν_i – валентності елементів в шлаку; k – число компонентів в системі.

Дана система $2k+1$ нелінійних рівнянь допускає еквівалентне перетворення к системі трьох нелінійних рівнянь, яка доповнюється рівнянням енергетичного і теплового балансу. Таким чином, формальне рівняння стану (3.1) перетворюється в даному випадку на систему чотирьох нелінійних рівнянь відносно невідомих Y, Z, μ_e і T:

$$\begin{cases} F_1 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i \nu_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)\left[1+\exp(B_i - Z)\right]} = 0; \\ F_2 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)\left[1+\exp(B_i - Z)\right]} - \dfrac{N}{1+\exp(Y)\left[1+\exp(-Z)\right]} = 0; \\ F_3 = \sum_{i=1}^{k} \dfrac{n_i}{1+\left[1+\exp(A_i - Y - \mu_e \nu_i)\right]\exp(Z - B_i)} - \dfrac{N}{1+\exp(Z)\left[1+\exp(-Y)\right]} = 0; \\ F_4 = H(T) - H_0 - Q_E + Q_L = 0, \end{cases} \quad (3.3)$$

де $A_i = \ln(K_{[i)}\gamma_{[i]} / \gamma_{(i)})$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-шлак»; $B_i = \ln(K_{[i\}}\gamma_{[i]} / \gamma_{\{i\}})$ – логарифм консолідованої константи рівноваги «метал-газ»; n_i – числа молей i-го елементу в системі; $Y = \ln(N_m / N_s)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності шлаку; $Z = \ln(N_m / N_g)$ – логарифм величини, зворотної мольної кратності газу; N_m, N_s, N_g, N – числа молей в металі, шлаку, газі і системі; $\gamma_{[i]}$, $\gamma_{(i)}$, $\gamma_{\{i\}}$ – коефіцієнти активності компонентів в металі, шлаку і газовой фазі; H_0, $H(T)$ – ентальпія системи в початковому і кінцевому станах; Q_E – теплова енергія енергоносіїв; Q_L – теплові втрати.

Останнє рівняння теплового балансу $F_4 = 0$ в системі рівнянь (3.3) засновано на термохімічному законі Кирхгофу, згідно якому змінення ентальпії системи $\Delta H = H(T) - H_0$ при постійному тиску дорівнює кількості поглиненої системою теплової енергії $Q = Q_E - Q_L$.

Результатом рішення нелінійної системи (3.3) є температура системи T і набір величин μ_e, Y, Z, за якими визначаються рівноважні вмісти (числа молей) елементів в шлаку, газі і металі за формулами:

$$n_{(i)} = \frac{n_i}{1+\exp(-A_i + Y + \mu_e \nu_i)\left[1+\exp(B_i - Z)\right]};$$

$$n_{\{i\}} = \frac{n_i}{1+\left[1+\exp(A_i - Y - \mu_e \nu_i)\right]\exp(Z - B_i)}; \qquad (3.4)$$

$$n_{[i]} = n_i - n_{(i)} - n_{\{i\}}$$

Коефіцієнти активності елементів в металі і шлаку, які входять в рівняння (3.3) і (3.4), розраховуються за формулами [13, 16, 17]. Коефіцієнти активності елементів в газі і відповідні константи рівноваги розраховуються на основі законів Дальтона і Сівертса по рівновазі в подсистемі «метал-газ». Константи рівноваги «метал-шлак» за кожним компонентом визначаються за експериментальними даними про розчинність кисню в рідкому залізі залежно від концентрації даного компоненту.

3.3 Математичне формулювання зворотної задачі

Революційний шаг в решенні зворотних задач було зроблено в 1939 році Л. В. Канторовичем [18], який запропонував симплекс-метод лінійного програмування для широкого класу задач, в яких вектор вихідних параметрів **Y** лінійно залежить від вектору незалежних змінних **X**:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{K} + \mathbf{L}\mathbf{X}, \qquad (3.5)$$

де **K** – вектор констант; **L** – лінійний оператор.

За допомогою стандартного алгоритму симплекс-метода знаходиться оптимальний вектор **X** з врахуванням можливих обмежень, що накладаються на вектори **X**, **Y** і будь-які лінійні комбінації їх компонентів. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум (максимум) лінійного функціоналу $\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{X}$, який можна ототожнити з вартістю варіанту **X**, якщо **C** має значення вектору цін.

Задача зводиться до складання системи нерівностей відносно шуканого вектору мас шихтових матеріалів **X**:

$$\mathbf{F}^{\mathrm{н}} \le \mathbf{P} + (1/M_{ж})\mathbf{U}\mathbf{B}\mathbf{X} \le \mathbf{F}^{\mathrm{в}}, \qquad (3.6)$$

де $\mathbf{F}^{\mathrm{н}}$, $\mathbf{F}^{\mathrm{в}}$ – вектори заданого хімічного складу (верхня і нижня межі); **P** – вектор вихідного складу напівпродукту; $M_{ж}$ – маса рідкої сталі; **U** – діагональна матриця коефіцієнтів засвоєння елементів в металі; **B** – матриця елементного складу шихтових матеріалів.

У подальшому ця система нерівностей вирішується симплекс-методом. Недоліком цього підходу є використання сталих коефіцієнтів засвоєння.

3.4 Диференціальні коефіцієнти засвоєння

Коефіцієнти засвоєння здавна застосовуються в металургійному виробництві при визначенні кількості шихтових матеріалів, необхідних для одержання необхідного складу напівпродукту або готового металу. Величини, якими користуються, засновані на середньостатистичних даних, характерних для даного періоду плавки, складу вихідного металу, одержуваної марки сталі та прийнятого набору шихтових матеріалів. Будь-яке відхилення вказаних параметрів в ту або іншу сторону з великою ймовірністю призводить до виникнення нештатних ситуацій і, як наслідок, до виробничого браку.

Причина цього полягає в тому, що в дійсності коефіцієнти засвоєння не є константами, а залежать від температури, складу металевої, шлакової і газової фаз, а також від складу шихтових матеріалів. Більш того, засвоєння одних елементів може зменшуватися або збільшуватися при додаванні інших хімічних елементів. Тобто існують перехресні ефекти, вплив яких відомий лише на емпіричному рівні для окремих випадків.

Термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ», яка враховує хімічні взаємодії елементів, в загальному випадку є нелінійною і тому непридатною для рішення зворотної задачі засобами лінійного програмування. Проте лінеаризація термодинамічної моделі дозволяє подолати вказані труднощі.

Існує принципова можливість точного розрахунку коефіцієнтів засвоєння, в тому числі перехресних, якщо є в наявності адекватна термодинамічна модель системи «метал-шлак-газ». Якщо задані маси елементів, то така модель «повинна» розподіляти їх між металом, шлаком і газом. Із системи рівнянь (3.3) методом *неявного диференціювання з*находяться величини

$$U_{ij} = \frac{\partial m_{[i]}}{\partial m_j} = -\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_{[j]}}\right]^{-1}\left[\frac{\partial F_i}{\partial m_j}\right]\Bigg|_{m_{[i]}=\overline{m}_{[i]}}, \qquad (3.7)$$

які складають квадратну матрицю і є шуканими *диференціальними коефіцієнтами засвоєння* (ДКЗ). Фізичний зміст величин ДКЗ досить простий: «на скільки зміниться маса елемента *i* в металі при додаванні одиниці маси елемента *j* в систему». Таким чином, з'являється можливість врахувати всі перехресні ефекти впливу одних елементів на вміст інших.

Матриці ДКЗ безпосередньо використовуються для рішення задачі оптимізації кількості шихтових матеріалів з гарантованим попаданням в заданий склад напівпродукту або готового металу [12, 13]. Критерієм оптимальності при цьому служить мінімум сумарної вартості вибраних шихтових матеріалів. Під шихтовими матеріалами (ШМ) мається на увазі

широкий клас власне шихтових матеріалів, включаючи агломерат, залізну руду, рудні концентрати, окатиші, флюси (шлакоутворюючі матеріали), вуглецеві матеріали (кокс тощо), а також дуття і всі види енергоносіїв.

При оптимізації параметрів доменної плавки з використанням ДКЗ враховуються також різноманітні технологічні та організаційні обмеження, такі як:

- необхідна і допустима маса напівпродукту або готового чавуну;
- обмеження за хімічним складом металу, в тому числі вмісту вуглецю;
- обмеження за хімічним складом шлаку, в тому числі його основності;
- фактичні кількості наявних у цеху (на складі) ШМ;
- обмеження на склад групи і частку окремих ШМ, наявність обов'язкових ШМ;
- гранично допустиме зниження (підвищення) температури металу при завданні ШМ;
- граничні параметри доменної печі, включаючи її мінімальну і максимальну продуктивність, завантаження, допустиму температуру робочого об'єму;
- часові обмеження.

3.5 Контрольні питання

1. Визначення прямої і зворотної задач термодинамічного аналізу доменного процесу.
2. Математичне формулювання прямої задачі.
3. Математичне формулювання зворотної задачі.
4. Визначення і фізичний сенс диференціальних коефіцієнтів засвоєння.
5. Навести приклад найпростішої матриці ДКЗ з позначенням якісного впливу кисню, кремнію, марганцю і вуглецю один на одного.

4 ІНСТРУКЦІЯ З ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

4.1 Загальні положення

4.1.1. Дія інструкції поширюється на всі підрозділи установи чи підприємства, де виконують роботи з персональним комп'ютером (ПК).

4.1.2. Інструкція розроблена відповідно до Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 29.01.1998 № 9, Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 № 15, Правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин, затверджених наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 26.03.2010 № 65, Державних санітарних правил і норм роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ДСанПіН 3.3.2.007-98 [19], затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 10.12.1998 № 7, Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників, затверджених наказом Міністерства надзвичайних ситуацій України від 25.01.2012 № 67 (НПАОП 0.00-7.11-12).

4.1.3. За цією інструкцією студента, який використовує персональний комп'ютер (далі – користувач), інструктують перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 6 місяців (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносять до Журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці на робочому місці (у журналі має бути підпис особи, яка інструктує, та користувача).

4.1.4. Користувач зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров`я, а також про безпеку і здоров'я довколишніх при виконанні будь-яких робіт, а також під час перебування на території підприємства.

4.1.5. До роботи на персональному комп'ютері допускають осіб, які пройшли інструктажі з питань охорони праці та пожежної безпеки.

4.1.6. Користувач зобов'язаний:

- виконувати правила внутрішнього трудового розпорядку;
- не допускати за своє робоче місце сторонніх осіб;
- не виконувати вказівок, які суперечать правилам охорони праці та пожежної безпеки;
- знати правила надання домедичної допомоги;
- знати розташування та вміти користуватись первинними засобами

пожежогасіння;

- вміти працювати з ПК.

4.1.7. Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть впливати на користувача:

- підвищений рівень статичної електрики;
- нерівномірність розподілу яскравості в полі зору;
- підвищена яскравість світлового зображення;
- ураження електричним струмом;
- напруга зору та уваги;
- тривалі статичні навантаження.

4.1.8. У приміщеннях із ПК має бути природне і штучне освітлення.

4.1.9. При розміщенні робочих місць необхідно унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням.

4.1.10. При природному освітленні слід передбачити наявність сонцезахисних засобів (плівка, жалюзі, штори тощо).

4.1.11. Світлові відблиски із клавіатури, екрана та інших частин ПК у напрямку очей користувача неприпустимі.

4.1.12. Основним обладнанням робочого місця є ПК або ноутбук, монітор, клавіатура, маніпулятор, робочий стіл, стілець (крісло).

4.1.13. При розміщенні елементів робочого місця слід враховувати:

- робочу позу користувача;
- простір для розміщення користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість огляду простору поза межами робочого місця;
- можливість робити записи, розміщувати на робочому столі документацію та матеріали, які використовує користувач.

4.1.14. Розміщення елементів робочого місця не має заважати рухам та переміщенню для експлуатування ПК.

4.1.15. Монітор встановлюють так, щоб відстань від поверхні екрана до очей користувача була 600-700 мм залежно від розміру екрана.

4.1.16. Клавіатуру розміщують на робочому або окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача. Положення клавіатури та кут її нахилу залежить від побажання користувача (як правило, в межах 5-15°). Не допускати хитання клавіатури.

4.1.17. Конструкція робочого столу має бути такою, щоб оптимально розмістити на робочій поверхні обладнання, що використовують, з урахуванням кількості, розмірів, конструктивних особливостей і характеру його роботи.

4.1.18. Крісло має забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій та можливість зміни пози. Тип робочого крісла обирають залежно від характеру та тривалості роботи.

4.1.19. Раціональна поза користувача:

- ступні розташовані на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна зорієнтовані у горизонтальній площині;
- верхні ділянки рук вертикальні;
- кут ліктьового суглоба у межах 70-90°;
- зап'ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20°;
- нахил голови у межах 15-20°, а часті її повороти виключені.

4.1.20. Для забезпечення оптимальної робочої пози користувача необхідно:

- засоби праці, з якими користувач має тривалий або найбільш частий зоровий контакт, розмістити у центрі зони зорового спостереження та моніторного поля;
- забезпечити відстань близько 500 мм між найважливішими засобами праці, з якими користувач працює найчастіше.

4.1.21. ПК встановлювати на рівній твердій поверхні (столі). Не дозволено встановлювати ПК та оргтехніку на хитких підставках чи на похилій поверхні.

4.1.22. ПК не встановлювати впритул до стіни, перегородки тощо. Не допускати загородження вентиляційних отворів ПК сторонніми предметами.

4.1.23. Розетка біля ПК має бути в доступному місці, щоб в аварійних випадках можна було своєчасно його відімкнути. Не рекомендовано використовувати подовжувачі.

4.1.26. Під час переміщення ПК, периферійних пристроїв витягти вилку живлення з розетки.

4.1.27. Не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення. Заборонено ставити важкі речі на шнур живлення, тягнути чи надмірно перегинати його, скручувати та перев'язувати шнур живлення вузлом.

4.1.28. ПК під'єднувати до електромережі лише за допомогою справних штепсельних з'єднань та електророзеток заводського виробництва.

4.1.29. Штепсельні з'єднання та електророзетки мають бути зі спеціальними контактами для під'єднання нульового захисного провідника. Їхня конструкція має забезпечувати з'єднання нульового захисного провідника раніше, ніж з'єднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднань при вимкненні має бути зворотнім.

4.1.30. Заборонено під'єднувати електрообладнання до звичайної

двошнурової електромережі.

4.1.31. За невиконання цієї інструкції користувачі несуть відповідальність згідно з чинним законодавством.

4.2 Вимоги безпеки перед початком роботи

4.2.1. Оглянути робоче місце і навести на ньому лад; впевнитись, що на ньому немає сторонніх предмети, все обладнання і блоки ПК з'єднані з системним блоком з'єднувальними шнурами.

4.2.2. Перевірити надійність встановлення апаратури на робочому столі. Монітор не має стояти на краю стола. Повернути монітор так, щоб було зручно дивитися на екран — під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз; при цьому екран має бути трохи нахиленим — нижній край ближче до користувача.

4.2.3. Перевірити загальний стан апаратури, справність електропроводки, з'єднувальних шнурів, штепсельних вилок, розеток, заземлення захисного екрана.

4.2.4. Вставити вилку в розетку і впевнитися, що вона міцно тримається. Заборонено вставляти і виймати вилку мокрими руками.

4.2.5. Відрегулювати та зафіксувати висоту крісла та зручний для користувача нахил спинки.

4.2.6. За потреби приєднати до комп'ютера необхідну апаратуру (принтер, сканер тощо). Усі кабелі, що з'єднують системний блок із іншими пристроями, вмикати та вимикати лише при вимкненому комп'ютері.

4.2.7. Відрегулювати яскравість свічення, контрастність монітора.

4.2.8. Про всі виявлені несправності інформувати керівника робіт і не братися до роботи, доки їх не буде усунено.

4.3 Вимоги безпеки під час виконання роботи

4.3.1. Під час роботи на ПК:

- стійко встановити клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання, водночас передбачити можливість її поворотів та переміщень;
- якщо в конструкції клавіатури не передбачено простору для упору долонь, клавіатуру розміщують на відстані не менше 100 мм від краю столу в оптимальній зоні моніторного поля;
- під час роботи на клавіатурі сидіти рівно, не напружуватися;
- щоб зменшити несприятливе навантаження на користувача при роботі з комп'ютерною мишею (вимушена поза, необхідність постійно

контролювати якість дій), забезпечити велику вільну поверхню столу для переміщення комп'ютерної миші та зручного упору ліктьового суглоба;

- періодично при вимкненому комп'ютері прибирати пил із поверхонь апаратури спеціальними серветками.

2.3.2. При роботі з ПК заборонено:

- самостійно розбирати та ремонтувати системний блок (корпус ноутбука), монітор, клавіатуру, комп'ютерну мишу тощо;
- встромляти сторонні предмети до вентиляційних отворів ПК, ноутбука або монітора;
- ставити на системний блок ПК та периферійні пристрої металеві предмети, ємкості з водою (вази, горщики для квітів, склянки), оскільки через потрапляння води у середину апарата може виникнути пожежа або ураження електрострумом.

4.3.3. Тривалість безперервної роботи за ПК не має перевищувати 2 год. Після цього необхідно зробити 15-хвилинну перерву.

4.3.4. Якщо виник зоровий дискомфорт або інші неприємні відчуття, необхідно зробити коротку перерву.

4.3.5. Для зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втомі доцільно під час декількох перерв виконувати комплекс вправ.

4.4 Вимоги безпеки після закінчення роботи

4.4.1. Зберегти інформацію.

4.4.2. Вимкнути ПК, монітор чи ноутбук.

4.4.3. Вимкнути стабілізатор (або джерело безперебійного живлення), якщо комп'ютер під'єднаний до мережі через нього.

4.4.4. Прибрати робоче місце.

4.5 Вимоги безпеки в аварійній ситуації

4.5.1. Аварійні та небезпечні ситуації під час виконання роботи на ПК можуть виникнути у разі: короткого замикання, перевантаження блоку живлення системного блоку, перегрівання, пожежі, поломки крісла тощо.

4.5.2. У разі виникнення аварії або ситуації, що може привести до аварії, нещасного випадку, негайно від'єднати ПК від електромережі, повідомити інцидент керівникові.

4.5.3. Не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.

4.5.4. Якщо стався нещасний випадок, зберегти обстановку в робочій зоні та устаткування у такому стані, в якому вони були на момент події (якщо це не загрожує життю і здоров'ю інших працівників і не призведе до більш тяжких наслідків). Поінформувати про подію керівника робіт (іншу відповідальну особу підприємства) та в подальшому керуватися його вказівками. Вжити заходів, щоб запобігти подібним випадкам у подальшому.

4.5.5. У разі виникнення пожежі (ознак горіння), повідомити керівнику та, за потреби, викликати оперативно-рятувальну службу за телефоном 101 або 112 (назвати адресу та місце виникнення пожежі, наявність людей, повідомити своє прізвище) та вжити можливих заходів для евакуювання людей, гасіння (локалізації) пожежі наявними засобами пожежогасіння. Пам'ятати, що гасіння електротехнічних пристроїв, які перебувають під напругою, виконувати лише після їх попереднього від'єднання від електромережі. Гасити за допомогою вуглекислотних або порошкових вогнегасників, а в окремих випадках — сухим піском.

4.5.6. За потреби надати потерпілому домедичну допомогу згідно з інструкцією, що діє на підприємстві. У разі подальшого погіршення самопочуття потерпілого, не припиняючи надання домедичної допомоги, викликати за телефоном 103 швидку медичну допомогу.

4.5.7. Виконувати вказівки керівника робіт для ліквідування небезпеки.

5 ЗМІСТ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

5.1 Практична робота №1. Ознайомлення з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur». Проплавлення шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, коксу і флюсу

5.1.1 Порядок виконання роботи

Ознайомитись з інтерфейсом користувача програмного комплексу «Excalibur» згідно з матеріалами, завантаженими на сторінку дисципліни у СЕЗН Moodle.

1. Вихідні дані:

Склад агломерату і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» проплавити шихту, що складається з фіксованої маси агломерату 10 т, фіксованої маси окатишів 10 т, фіксованої маси флюсу 2,5 т, а також маси коксу в межах 3…6,2 т (інтервал 0,5 т) за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;

б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;
г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «А+О+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.1.2 Контрольні питання

1. Характеристика агломерату як комплексного шихтового матеріалу для доменної плавки.
2. Характеристика металургійного коксу як вуглецевмісного шихтового матеріалу для доменної плавки.
3. Які шихтові матеріали мають найбільший вплив на хімічний склад металу доменної плавки?
4. Як маса коксу впливає на хімічний склад чавуну і доменного шлаку? Навести графічний приклад.
5. Як маса коксу впливає на основність доменного шлаку?
6. Як маса коксу впливає на загальну вартість шихтових матеріалів?

5.1.3 Звіт з практичної роботи №1

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса коксу, т						
	3	**3,5**	**4**	**4,5**	**5**	**5,5**	**6,2**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.2 Практична робота №2. Проплавлення шихти при виробництві чавуну із застосуванням залізної руди, окатишів, коксу і флюсу

5.2.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад залізної руди і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» проплавити шихту, що складається з залізної руди в межах 13…7 т (інтервал 1 т), окатишів в межах 7…13 т (інтервал 1 т), фіксованої маси коксу 7 т і фіксованої маси флюсу 7 т за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;
г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «Р+О+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [O] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.2.2 Контрольні питання

1. Характеристика металізованих окатишів як залізовмісного шихтового матеріалу для доменної плавки.
2. Як використання металізованих окатишів впливає на хімічний склад готового металу? Додати графічний приклад.
3. Як використання металізованих окатишів впливає на хімічний склад доменного шлаку? Додати графічний приклад.
4. Як обмеження використання металізованих окатишів в шихті впливає на техніко-економічні показники доменної плавки?
5. Які чинники мають найбільший вплив на загальну вартість шихтових матеріалів доменної плавки?

5.2.3 Звіт з практичної роботи №2

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Fe руда	13	12	11	10	9	8	7
Окатиші	7	8	9	10	11	12	13
Кокс	**7**	**7**	**7**	**7**	**7**	**7**	**7**
Флюс	**7**	**7**	**7**	**7**	**7**	**7**	**7**
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення ШМ/М							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.3 Практична робота №3. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням регламентованого відсотка агломерату, окатишів, залізної руди, коксу і флюсу

5.3.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату, залізної руди і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати шихту, що складається з регламентованого відсотка агломерату (в межах 1…12 т та не більше 5…30% від маси шихти, з інтервалом 5%), залізної руди (в межах 1…10 т), окатишів (в межах 3…12 т), коксу (в межах 4…6 т) і флюсу (не більше 8 т) за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;
- вміст вуглецю в металі не менше 4,5%;
- основність шлаку не менше 1;
- маса рідкого чавуну не менше 10 т.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;

г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «Арег+О+Р+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.3.2 Контрольні питання

1. Залізовмісні замінники залізної руди в шихті доменної печі.
2. Як впливають обмеження, що вводяться, на вартість витрачених шихтових матеріалів?
3. Як збільшення частки окатишів впливає на техніко-економічні показники доменної плавки?
4. Як додавання флюсу (вапняку) впливає на техніко-економічні показники доменної плавки?
5. Як відсоток агломерату в шихті впливає на техніко-економічні показники доменної плавки?

5.3.3 Звіт з практичної роботи №3

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Маса матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Агломерат, ≤ %	не регл.	5	10	15	20	25	30
Агломерат, т							
Окатиші							
Fe руда							
Кокс							
Флюс							
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення ШМ/М							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.4 Практична робота №4. Проплавлення шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, залізної руди, марганцевого концентрату, коксу і флюсу

5.4.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату, залізної руди, марганцевого концентрату і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Mn конц	0,15	7,15	15	9,9	5	6,41	40	0,03	0,1
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» проплавити шихту, що складається з агломерату (1 т), залізної руди (7,5 т), окатишів (7 т), коксу (5,4 т), флюсу (5,5 т), а також марганцевого концентрату (в межах 0…1,2 т з інтервалом 0,2 т) за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;
г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання

«А+О+Р+Mn+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.4.2 Контрольні питання

1. Роль реакції окислення вуглецю в доменному процесі.
2. Чим обумовлений кінцевий вміст вуглецю в металі доменної плавки?
3. Який метал доменної плавки відповідає рідкому чавуну за хімічним складом і температурою?
4. Як обмеження використання агломерату впливає на техніко-економічні показники доменної плавки?
5. Як збільшення частки металізованих окатишів в шихті впливає на техніко-економічні показники доменної плавки?

5.4.3 Звіт з практичної роботи №4

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Маса матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Агломерат	1	1	1	1	1	1	1
Окатиші	7	7	7	7	7	7	7
Fe руда	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Mn конц	**0**	**0,2**	**0,4**	**0,6**	**0,8**	**1,0**	**1,2**
Кокс	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Флюс	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення ШМ/М							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.5 Практична робота №5. Оптимізація витрати коксу при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, коксу і флюсу

5.5.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe2O3	SiO2	CaO	MgO	Al2O3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO2	CaO	MgO	Al2O3	MnO	S	P	CO2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe2O3	SiO2	MgO	Al2O3	CaO	S	P	H2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати витрату коксу при виробництві чавуну з шихти, що складається з фіксованої маси агломерату 10 т, фіксованої маси окатишів 10 т, фіксованої маси флюсу 2,5 т та коксу за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;
- мінімальний вміст вуглецю в чавуні 4…4,6 мас. % з інтервалом 0,1%.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;
г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «А+О+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.5.2 Контрольні питання

1. Основні вимоги до якості металургійного коксу.
2. Який вплив чинить зола коксу на шлакоутворення доменної плавки?
3. Перелічити фізико-механічні властивості металургійного коксу.
4. Якими параметрами визначаються фізико-хімічні властивості металургійного коксу?
5. Основні вимоги доменного процесу до фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей металургійного коксу.
6. Які замінники металургійного коксу використовуються в доменному процесі?

5.5.3 Звіт з практичної роботи №5

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Оптимальна маса коксу (т) для забезпечення вмісту вуглецю не**						
	4	**4,1**	**4,2**	**4,3**	**4,4**	**4,5**	**4,6**
Кокс, т							
Загальна маса							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.6 Практична робота №6. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням залізної руди, окатишів, коксу і флюсу

5.6.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад залізної руди і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати шихту, що складається з залізної руди в межах 13…7 т (інтервал 1 т), окатишів в межах 7…13 т (інтервал 1 т), оптимальної маси коксу і оптимальної маси флюсу за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;
- вміст вуглецю в металі не менше 4,2%;
- основність шлаку не менше 1;

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;
г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «Р+О+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.6.2 Контрольні питання

1. Які закономірності спостерігаються в процесі відновлення оксидів заліза у доменній печі? Які стадії проходить процес відновлення оксидів заліза?
2. Яке співвідношення існує між прямим і непрямим відновленням заліза в доменній печі?
3. Вплив відновлювальних процесів на роботу доменної печі.
4. Особливості утворення шлаку в доменній печі.
5. Перелічити основні фізико-хімічні характеристики доменних шлаків.
6. Як збільшення основності шлаку впливає на показники доменної плавки?

5.6.3 Звіт з практичної роботи №6

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Fe руда	13	12	11	10	9	8	7
Окатиші	7	8	9	10	11	12	13
Кокс (опт.)							
Флюс (опт.)							
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення ШМ/М							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.7 Практична робота №7. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, залізної руди двох сортів, коксу і флюсу

5.7.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату, залізної руди і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Fe руда2	1,32	74,3	21,9	0,1	0,1	0,95	0,15	0,012	0,035
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати шихту, що складається з агломерату (в межах 1…7 т), залізної руди (в межах 1…10 т, ціною 30 у.о./т), залізної руди 2 (в межах 1…10 т, ціною 50 у.о./т), окатишів (в межах 3…12 т), коксу (в межах 4…6 т) і флюсу (в межах 3…8 т) за наступних умов (варіант а):

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;
- вміст вуглецю в металі не менше 4,5%;
- маса рідкого чавуну не менше 10 т.

3. Добавити наступні обмеження (умови) за варіантами і оптимізувати:

б) + основність шлаку не менше 1;
в) + кількість агломерату в шихті не більше 20%;
г) + обмежити кількість доменного шлаку до 7 т;

д) + зняти обмеження за шлаком; забезпечити масу газу, що утворюється, не менше 9 т;
е) + обмежити кількість доменного шлаку до 7,5 т;
ж) + змінити ціни на залізну руду: Fe руда – 50 у.о./т; Fe руда2 – 30 у.о./т.

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;
г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «А+О+Р2+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.7.2 Контрольні питання

1. Внесок вуглецю в тепловий баланс доменної печі.
2. Як впливають технологічні обмеження, що вводяться, на оптимальну вартість шихтових матеріалів доменної плавки?
3. Особливості відновлення кремнія, фосфора та інших елементів в доменній печі.
4. Поведінка сірки в процесі доменної плавки.
5. Які потоки зустрічаються і взаємодіють в горні доменної печі?

5.7.3 Звіт з практичної роботи №7

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

	Маса матеріалів (т) за варіантами						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Агломерат							
Окатиші							
Fe руда							
Fe руда2							
Кокс							
Флюс							
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення ШМ/М							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

5.8 Практична робота №8. Оптимізація шихти при виробництві чавуну із застосуванням агломерату, окатишів, залізної руди, марганцевого концентрату, коксу і флюсу

5.8.1 Порядок виконання роботи

1. Вихідні дані:

Склад агломерату, залізної руди, марганцевого концентрату і окатишів, мас.%:

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P
Агломерат	14	58,76	11,39	11,13	0,93	1,83	0,67	0,05	0,03
Fe руда	5,78	67,9	26,9	1,45	0,52	1,82	0,18	0,027	0,05
Mn конц	0,15	7,15	15	9,9	5	6,41	40	0,03	0,1
Окатиші	3,01	81,1	13,02	0,83	1,22	0,3	0,06	0,01	0,01

Склад флюсу, мас. %:

	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	P	CO_2
Флюс	0,27	1,8	53,49	0,73	0,28	0,06	0,08	0,01	43,02

Склад коксу, мас. %

	C	FeO	Fe_2O3	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P	H_2O
Кокс	85	1,5	2	3,5	0,2	1,5	0,5	1	0,01	3

2. За допомогою програми «**Excalibur**» оптимізувати шихту, що складається з агломерату (в межах 1…8 т та не менше 10% від маси шихти), залізної руди (в межах 1…10 т), окатишів (в межах 3…12 т), коксу (в межах 4…6 т), флюсу (не більше 8 т), а також марганцевого концентрату за наступних умов:

- середній тиск 150 кПа (1,5 атм);
- температура металу і шлаку t = 1520 + номер варіанта, °С;
- вміст вуглецю в металі не менше 4,5%;
- основність шлаку не менше 1;
- маса рідкого чавуну не менше 10 т;
- вміст марганцю в металі не менше 0,8…2% з інтервалом 0,2% (варіанти *а…ж*).

3. Зафіксувати й занести в звіт наступні дані:

а) загальні маси шихти, металу, шлаку і газу, т;
б) основність шлаку;
в) склад металу в мас. %;

г) склад шлаку в мас. % оксидів;
д) загальна вартість шихтових матеріалів в умовних одиницях.

4. На початку виконання роботи завантажити проект Chavun.fwp, завдання «А+О+Р+Mn+К+Ф» та перевірити Опції:

Розрахунок кінцевої температури – Ні;
Точний склад кінцевої проби металу – вкл.;
Автоматично оцінювати [О] на випуску – вимк.
Покращена збіжність, повільніший розрахунок – вимк.
Елементний склад шлаку – вимк.

5.8.2 Контрольні питання

1. Основні техніко-економічні показники доменної плавки. Які техніко-економічні показники мають сучасні доменні печі?
2. Структура собівартості передільного чавуну. Які складові мають найбільший вплив на собівартість?
3. В яких межах коефіцієнт використання корисного обсягу доменної печі змінювався в історичній перспективі?
4. Основні напрямки підвищення техніко-економічних показників доменної плавки і зниження собівартості чавуну.
5. Розвиток процесів інтенсифікації доменної плавки.

5.8.3 Звіт з практичної роботи №8

студента(ки) гр. _____(ПІБ), варіант _____

Матеріали	**Маса матеріалів (т) за варіантами**						
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**	**ж**
Вміст Mn, не менше	0,8%	1,0%	1,2%	1,4%	1,6%	1,8%	2,0%
Агломерат							
Окатиші							
Fe руда							
Mn конц							
Кокс							
Флюс							
Загальна маса ш.м.,т							
Вартість ш.м., у. о.							
Склад металу, мас. %							
[C]							
[Si]							
[Mn]							
[Al]							
[S]							
[P]							
[O]							
Маса металу, т							
Відношення ШМ/М							
Склад шлаку, мас. %							
(FeO)							
(SiO_2)							
(MnO)							
(Al_2O_3)							
(CaO)							
(MgO)							
(S)							
(P_2O_5)							
Маса шлаку, т							
Основність шлаку							
Маса газу, т							
Температура, °С							

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Аносов В. Г. Теорія доменної плавки : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 158 с.
2. Аносов В. Г., Цапліна Т. С. Методичне керівництво до виконання технологічних розрахунків по доменному виробництву. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 78 с.
3. Аносов В. Г. Теорія і технологія доменної плавки. Теоретична оцінка ефективності доменної плавки : зб. задач. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 71 с.
4. Аносов В. Г. Теорія і технологія доменної плавки. Оцінка ефективності доменної плавки : метод. вказівки до викон. технологічних розрахунків для курс. та диплом. проєктів і робіт. Запоріжжя : ЗДІА, 2003. 80 с.
5. Аносов В. Г. Теорія доменного процесу : метод. вказівки для проведення лаб. робіт. Запоріжжя : ЗДІА, 2006. 27 с.
6. Рижков В. Г., Балалаєва Є. А., Ткаліч І. О. Теорія і технологія виробництва чавуну : метод. вказівки до викон. лаб. робіт для студентів ЗДІА спец. 7.090401 «Металургія чорних металів». Запоріжжя : ЗДІА, 2019. 37 с.
7. Рижков В. Г., Балалаєва Є. А., Ткаліч І. О. Теорія і технологія виробництва чавуну : метод. вказівки до практ. занять і викон. контрол. робіт для студентів ЗДІА спец. «Металургія чорних металів». Запоріжжя : ЗДІА, 2019. 26 с.
8. Єфіменко Г. Г. Металургія чавуну : підруч. для вишів / Г. Г. Єфіменко, А. А. Гіммельфарб, В. Є. Левченко. Київ : Вища школа, 1988. 495 с.
9. Товаровський І. Г. Доменна плавка. Еволюція, хід процесів, проблеми та перспективи : підруч. для вишів. Дніпропетровськ : Пороги, 2003. 560 с.
10. Большаков В. І. Технологія високоефективної енергозберігаючої доменної плавки. Київ : Наукова думка, 2007. 411 с.
11. Babich A. Ironmaking Textbook / A. Babich, D. Senk, H. W. Gudenau et al. Aachen : RWTH Aachen University, 2008. 402 p.
12. Tupkary R. H., Tupkary V. R. Modern IronMaking Handbook. Dulles, Boston, New Delhi : Mercury Learning & Information, 2018. 492 p.
13. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» у системах керування плавкою, розкисленням, легуванням та позапічною обробкою сталі : монографія. Київ : Наукова думка, 2023. 228 с.
14. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп’ютерна програма «Excalibur».

Свідоцтво України про реєстрацію авторського права на твір №111007 від 12.01.2022 р.

15. Харченко О. В., Лічконенко Н. В., Мосейко Ю. В. Можливості та перспективи використання програми "Excalibur" у навчальному процесі. *Металургія* : зб. наук. пр. ЗДІА. 2013. Вип 1(29). С. 169-175.
16. Харченко О. В., Пономаренко О. Г., Корзун Є. Л. Термодинамічна модель багатокомпонентної конденсованої фази. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. № 8. С. 135-139.
17. Харченко О. В., Синяков Р. В. Термодинамічна модель багатокомпонентної рідкої шлакової фази. *Металургія* : зб. наук. пр. ЗДІА. 2016. Вип. 2(36). С. 16-22.
18. Канторович Л. В. Математичні методи організації та планування виробництва. Київ : КДУ, 1969. 67 с.
19. ДСанПіН 5.5.6.009-98. Влаштування і обладнання кабінетів комп'ютерної техніки в навчальних закладах та режим праці на персональних комп'ютерах. Державні санітарні правила та норми. Київ, 1998.
20. ДСТУ 3133-95 (ГОСТ 805-95 IDT). Чавун переробний. Технічні умови. [Чинний від 1997-07-01]. Офіц. вид. Київ : Держстандарт України, 1996.

Інформаційні джерела:

1. Теорія і технологія виробництва чавуну. *Платформа дистанційного навчання Moodle ЗНУ.* URL: https://moodle.znu.edu.ua/course/view.php?id=10872 (дата звернення: 01.11.2026).
2. Метал України та світу – новини та аналітика металургійного комплексу; досьє (колекція матеріалів преси) на підприємствах України. URL: https://ukrmet.dp.ua (дата звернення: 01.11.2026).
3. Наукова бібліотека Запорізького національного університету. URL: https://library.znu.edu.ua/ (дата звернення: 01.11.2026).
4. Національна бібліотека України імені В. І.Вернадського. URL: http://www.nbuv.gov.ua/ (дата звернення: 01.11.2026).
5. Історія металургії України. Ukrainian metallurgy history. Група у Facebook. URL: https://www.facebook.com/groups/industrialhistory (дата звернення: 01.11.2026).
6. Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки. Офіційна сторінка кафедри у Facebook. URL:

https://www.facebook.com/znu.kafomt (дата звернення: 01.11.2026).

7. Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки. Сторінка кафедри на вебсайті Запорізького національного університету. URL: https://znu.edu.ua/ukr/university/11929/12588/11985 (дата звернення: 01.11.2026).

Навчально-методичне видання
(українською мовою)

Харченко Олександр Вікторович

ТЕОРІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ЧАВУНУ

Методичні рекомендації до практичних робіт
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра
спеціальності G10 “Металургія”
освітньо-професійних програм “Металургія”
і “Металургія чорних металів”

Рецензент *Д. В. Прутцьков*
Відповідальний за випуск *Ю. О. Бєлоконь*