МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другого (магістерського) рівня освіти

на тему Розробка та дослідження автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1744
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно -інтегровані технології та робототехніка
освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
В. О. Мінаєв
(ініціали та прізвище)

Керівник проф., д.т.н. Пазюк М. Ю.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
І.А. Курілець
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно -інтегровані технології та робототехніка
Спеціалізація _____
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
«___» _____ 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Мінаєву Вячеславу Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка та дослідження автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей
керівник роботи Пазюк М. Ю., професор, докт.техн.наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «19» вересня 2025 року № 1304-с
2 Строк подання студентом роботи 12 грудня 2025 р.
3 Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз використання математичних моделей у системах управління доменними печами, методів оптимального розподілу сировинних і паливно-енергетичних ресурсів; моделювання системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів; математична модель і алгоритми оптимального розподілу сировинних і енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей; розробка програмного забезпечення для рішення завдань оптимального управління ресурсами доменних печей.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): схема доменного виробництва; математичне забезпечення показників доменного процесу; алгоритм розрахунку оптимального розподілу ресурсів

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1-4	проф. Пазюк М. Ю.		

7 Дата видачі завдання 24.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз використання математичних моделей у системах управління доменними печами та їхними комплексами, методів оптимального розподілу сировиних і паливно-енергетичних ресурсів Постановка задачі дослідження	27.01-09.02.25	
2	Моделювання системи оптимального розподілу сировиних та паливно-енергетичних ресурсів у домінному виробництві	26.05-08.06.25	
3	Розробка моделі і алгоритму рішення завдань оптимального розподілу сировиних і енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей	09.06-22.06.25	
4	Розробка програмного забезпечення для рішення завдань оптимального управління сировиними і паливно-енергетичними ресурсами комплексу доменних печей	23.06-06.07, 24.11-07.12.2025	
5	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю, підготовка доповіді	08.12-14.12.25	

Студент _____ Вячеслав Мінаєв
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ Михайло ПАЗЮК
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Сергій БАШЛІЙ
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Мінаєв В. О. Розробка та дослідження автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», науковий керівник М. Ю. Пазюк, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

У роботі розроблено метод оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей; математичну модель та створено сукупність алгоритмів для оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів між печами доменного цеху; функціональну модель автоматизованої інформаційно-моделюючої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху з використанням системного підходу, методології IDEF0 та з урахуванням вимог інженерно-технологічного та управлінського персоналу металургійного підприємства та досліджено метод управління розподілом сировинних і паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві у нестабільними сировинними умовами.

Ключові слова: доменна піч, паливно-енергетичні ресурси, системгний підхід оптимізація, автоматизація, система управління, алгоритм

ABSTRACT

V. Minaev. Development and Research of an Automated System of Optimal Distribution of Raw Materials and Fuel and Energy Resources of a Complex of Blast Furnaces

The final master's qualifying work for completion of the higher education in the specialty 174 "Automation, computer-integrated technologies and robotics", supervisor: M. Yu. Paziuk, Zaporizhzhia National University, Engineering Education and Research Institute, Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems. Zaporizhzhia, 2025.

The work developed a method for optimal distribution of raw materials and fuel and energy resources in a complex of blast furnaces; a mathematical model and a set of algorithms for optimal distribution of raw materials and fuel and energy resources between the furnaces of the blast furnace shop; a functional model of an automated information modeling system for optimal distribution of raw materials and fuel and energy resources of the blast furnace shop using a system approach, IDEF0 methodology and taking into account the requirements of the engineering, technological and managerial personnel of the metallurgical enterprise, and investigated a method for managing the distribution of raw materials and fuel and energy resources in blast furnace production in unstable raw material conditions.

Keywords: blast furnace, fuel and energy resources, system approach optimization, automation, control system, algorithm

ЗМІСТ

Вступ……. 8
1 Аналіз використання математичних моделей у системах управління доменними печами та їхними комплексами, методів оптимального розподілу сировиних і паливно-енергетичних ресурсів…….. 12
1.1 Сировинні та теплоенергетичні аспекти сучасної доменної плавки… 12
1.2 Застосування математичних моделей у системах управління доменними печами та їх комплексами……... 17
1.3 Стан питання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей……. 21
1.4 Постановка завдань дослідження……. 27
2 Структура і функціональне моделювання системи оптимального розподілу сировиних та паливно-енергетичних ресурсів у домінному виробництві…… 29
2.1 Змістовна постановка завдання оптимального розподілу сировинних та енергетичних ресурсів у доменному цеху……. 29
2.2 Розробка схеми оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей…… 33
2.3 Функціональна модель автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху……. 38
2.4 Висновки до розділу 2…… 48
3 Математична модель і алгоритми рішення завдань оптимального розподілу сировиних і енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей…….. 49
3.1 Математична постановка задачі…… 49
3.2 Математичне забезпечення розрахунку показників, що характеризують тепловий, шлаковий та газодинамічний режими доменної плавки…… 55

3.2.1 Тепловий режим доменної плавки……. 55
3.2.2 Шлаковий режим доменної плавки…… 60
3.2.3 Газодинамічний та дуттєвий режими доменної плавки……... 65
3.2.4 Розрахунок коефіцієнтів лінеаризованої моделі……... 68
3.3 Математичне забезпечення завдання вибору оптимального складу доменної шихти……. 73
3.4. Математичне забезпечення задачі оптимального розподілу паливно-енергетичних ресурсів……... 78
3.5 Висновки до розділу 3…… 82
4 Розробка та опис програмного забезпечення для рішення завдань оптимального управління сировиними і паливно-енергетичними ресурсами комплексу доменних печей……... 83
4.1 Методи проєктування та реалізації програмного забезпечення з управління паливно-енергетичними ресурсами у доменному виробництві…… 83
4.2 Програмне забезпечення системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів……. 92
4.3 Висновки за розділом 4……. 101
Висновки……..... 103
Список використаних джерел інформації……... 105
Додаток А…….. 110

ВСТУП

Актуальність теми. Металургійна промисловість є базовою для інших галузей – машинобудування, будівництва, електротехніки та інших. При цьому більше 90% продукції, що одержується в металургії, припадає на сталь, у технологіях виробництва якої особливе місце займає доменний процес. Доменне виробництво є найскладнішим у ланцюжку виробництва сталі, найбільш ресурсоємним та енергоємним процесом.

Доменний процес має високий рівень автоматизації. Про це свідчать сучасні пристрої та технічні системи, наприклад, засипні апарати з контролем рівня засипу, системи контролю температури колошникового газу по радіусу та колу печі, системи контролю температури тіла холодильників та визначення прогару повітряних фурм та інші засоби контролю технології доменної плавки. Для управління доменною плавкою застосовуються різноманітні системи управління та контролю, до яких належать автоматизовані робочі місця, системи підтримки прийняття рішень, інформаційно-моделюючі системи, експертні системи та ін. Науковою базою технічних та програмних засобів автоматизації є відповідні математичні моделі.

Аналіз використовуваних нині математичних моделей під час розподілу сировинних і паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей показав, що розподіл ресурсів під час планування роботи побудовано експертної оцінці технологічного персоналу, а методи їх оптимального розподілу мало використовуються. Це визначило актуальність роботи та необхідність розробки відповідної автоматизованої системи.

Мета дослідження. Зниження витрат на доменний переділ та підвищення його енергоефективності на основі розробки та застосування методів та алгоритмів оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві, прогнозування роботи комплексу доменних печей в умовах зміни сировини та палива, нестабільності складу та властивостей залізорудної сировини, що проплавляється.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети у кваліфікаційній роботі сформульовано і вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати підходи та методи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей.

2. Розробити алгоритму оптимального розподілу сировини та палива з урахуванням вимог технологічного персоналу на основі створеного методу та функціональної моделі стосовно комплексу доменних печей при зміні характеристик дуття, складу та властивостей проплавлюваної залізорудної сировини та палива.

3. Розробити автоматизовану систему оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей з урахуванням вимог, що висуваються до сучасних інформаційних систем.

Об'єкт дослідження. Процес завантаження доменної печі.

Предмет дослідження. Розподіл сировини та палива у доменній печі.

Методи дослідження ґрунтуються на: структурному аналізі; фізико-хімічні закономірності основних процесів, що протікають у доменній печі; використання методів математичного моделювання доменного процесу та математичного програмування; сучасні принципи розробки алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованих систем управління складними технологічними процесами та комплексами агрегатів у металургії.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Застосовано метод оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів в організаційно-технологічній системі доменного цеху, що відрізняється інтеграцією фізико-хімічних закономірностей основних процесів об'єкта управління та перерахункових моделей.

2. Розроблено структуру алгоритму оптимального розподілу сировини і палива в комплексі доменних печей, що відрізняється декомпозицією задачі оптимізації, формуванням базових режимів функціонування доменних печей на інтервалі не менше одного місяця з подальшою можливістю їх корекції шляхом

вибору періодів, аналогічних прогнозним за режимними параметрами і властивостями.

3. Запропоновано метод вирішення складних математичних завдань при розробці ПЗ автоматизованих систем, що відрізняється синтезом пакетів прикладних програм зі спеціалізованим ПЗ, призначеним для моделювання процесів в окремих технологічних агрегатах, та із зовнішніми математичними пакетами з метою використання наявних у них алгоритмів вирішення математичних завдань.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання наукових та практичних результатів дослідження:

- при вирішенні завдань оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві;

- при розробці математичного та програмного забезпечення автоматизованих систем для управління складними технологічними об'єктами та їх комплексами у металургії.

Особистий внесок дослідника полягає у розробці математичного забезпечення для оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві; розроблення функціональної моделі автоматизованої системи оптимального розподілу ресурсів у комплексі доменних печей; розроблення відповідного програмного забезпечення; у дослідженні методів управління розподілом сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві за змінних сировинних умов, що забезпечують підвищення техніко-економічних показників доменної плавки; узагальнення та наукове обґрунтування отриманих результатів, формулювання висновків та рекомендацій.

Апробація результатів досліджень. Основні положення і результати магістерської роботи доповідалися і обговорювалися на XVIII університетської науково-практичної конференції студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених Молода наука - 2025» (14-18 квітня 2025р., м. Запоріжжя).

Структура та обсяг магістерської роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел інформації з 52 найменування, викладена на 110 сторінках машинописного тексту, включаючи 21 рисунок та 1 додаток.

1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ У СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ДОМЕННИМИ ПЕЧАМИ ТА ЇХНИМИ КОМПЛЕКСАМИ, МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ СИРОВИНИХ І ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

1.1 Сировинні та теплоенергетичні аспекти сучасної доменної плавки

Металургія України, будучи базовою галуззю, має забезпечити розвиток економіки нашої країни, її найважливіших складових - машинобудування, хімії, енергетики, транспорту, будівництва та інших.. Для збереження позицій на світовому ринку металів та задоволення потреб у металопродукції на внутрішньому ринку в країні прийнято «Концепцію сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах» [1]. Цей документ визначає сценарії модернізації галузі для задоволення потреб оборонного та промислового комплексів, посилення конкурентоспроможності на світових ринках шляхом впровадження новітніх енергозберігаючих та екологічно чистих технологій, а також підвищення державної підтримки для забезпечення економічної та національної безпеки.

Вирішення цих основних завдань забезпечується цілеспрямованою, діяльністю всіх стадіях металургійного виробництва від підготовки рудної сировини до отримання готової продукції.

Для чорної металургії важливими стадіями виробництва є доменний переділ. Ця технологія досить енергоємна, вона споживає 48,6% різних видів палива з теплового балансу інтегрованого металургійного комбінату, що наказує на необхідність зниження енерго- та ресурсоємності одержуваної продукції. При цьому прогнозується, що до 2020 року попит на основні види металовиробів збільшиться з досягненням рівня 390 кг сталі/людини. Очікується, що за рахунок використання енергоефективних технологій відбудеться зниження загальної витрати пального з рівня 2007 р. до 2020 р. на 14%, а електроенергії на 28% при досягненні питомих витрат

енергоспоживання до 20-25 ГДж/т продукції за рахунок застосування енергозберігаючої техніки та технологій.

На жаль, питома витрата палива на одну тонну прокату в нашій країні вища на 25 %, ніж у Японії та на 37,5 %, ніж у країнах Європейського союзу [2].

Причиною відставання є як використання фізично зношеного обладнання та морально застарілих технологій, так і низький рівень впровадження наукових досягнень у галузі енерго- та ресурсозбереження. Така ситуація склалася в багатьох галузях народного господарства, тому головна мета розвитку як чорної металургії, так і багатьох інших галузей промисловості - їх перетворення на нові, високотехнологічні та конкурентоспроможні галузі, інтегровані у світову металургію в рамках міжнародного поділу праці.

На новому витку розвитку науки і техніки формування вітчизняної металургії відбувається за умов [3]:

1. Практично сформувалися ринки сировини та палива. При цьому зникнення економічних кордонів між державами призвело до того, що імпорт сировини та експорт готової продукції стали звичайним явищем вітчизняної металургії.

2. У світі відбувається скорочення, а деяких регіонах і зникнення родовищ залізних руд. Це призвело до того, що найбільші металургійні комбінати країни, побудовані поблизу родовищ залізняку, змушені працювати на привізній сировині. У світі змінюються вимоги до екологічної чистоти металургійного виробництва. Продуктивність, як важливий принцип планової економіки, поступилася своїм місцем енерго- та ресурсозбереженню.

3. Найближчим часом виробництво чорних металів альтернативними способами не зміниться. Про це свідчить той факт, що протягом останніх 20 років частка чорних металів, вироблених у всьому світі позадоменним шляхом, не перевищувала 5-6%.

Факторами, які обмежують розвиток чорної металургії в Україні та більшості інших країн, є нині дефіцит сировинних та паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) та техногенне забруднення навколишнього середовища [4].

Високий рівень конкуренції на світовому ринку призвів до того, що зниження собівартості продукції за рахунок підвищення енергетичної ефективності та зниження теплових втрат при використанні ПЕР на підприємствах чорної металургії стало одним із напрямків виживання. Це з тим, частка витрат на ПЕР (електроенергія, природний газ, технологічний кисень, коксівне вугілля, мазут та інших.) у загальному кошторисі витрат за виробництво продукції становить понад 30 %. При цьому енергетичні витрати на підприємствах чорної металургії у європейських країнах становлять 18-22%. Найбільшими споживачами ПЕР на металургійних комбінатах є доменні та прокатні виробництва. До електроємних виробництв відносяться електросталеплавильні цехи, кисневі станції. Обсяг споживаних ПЕР виробництва одиниці виробленої продукції називається енергоємністю, у чорної металургії це обсяг ПЕР виробництва однієї тонни сталі (Гкал/т).

Енергоємність металопродукції визначається якістю постачання матеріальних та енергетичних ресурсів, технічним станом агрегатів та їх відповідністю світовому рівню розвитку науки і техніки, кон'юнктурними факторами, екологічними обмеженнями та ін.

Для вироблення стратегії зменшення енергоємності виробленої продукції змінних умовах використовується принцип домінуючого ланки. У чорній металургії такою ланкою є виробництво чавуну. Доменне виробництво є найенергоємнішим серед переділів чорної металургії, на його частку припадає 50-75% енергетичних витрат підприємств повного циклу. Тому економія енергетичних ресурсів при виробництві чавуну знижує енергоємність виробництва сталі 0,5-0,75 %.

Зазначені величезні потоки матеріальних та енергетичних потужностей у доменному цеху вимагають науково обґрунтованих та безпомилкових методів управління доменним процесом, оскільки неправильні дії технологічного персоналу при прийнятті рішень можуть призводити до суттєвих економічних втрат.

Металургійний кокс є основним енергоносієм та найдорожчим компонентом доменної шихти, тому важливим завданням удосконалення технології виробництва чавуну є зменшення витрати коксу. У собівартості чавуну понад 50 % витрат посідає залізорудну частину шихти (агломерат, котуни) і близько 40 % на ПЕР, у своїй витрати на кокс становлять понад 90 % від загальних витрат за паливо.

Таким чином, основним напрямом політики енерго- та ресурсозбереження у доменному виробництві є зниження витрати коксу. Це може бути забезпечено за рахунок застосування інших видів палива (природний газ, пилокутне паливо), як замінників коксу, збагачення дуття киснем та оптимізації режимних параметрів печей. Результати роботи доменних печей у XXI столітті підтверджують перспективність такої технології [5].

Не варто виключати з уваги і залізорудну частину шихти. Проте питання зниження питомої витрати залізорудних компонентів шихти перебувають поза доменного виробництва. Питома витрата залізорудної частини шихти визначається вмістом у ній заліза, яке, своєю чергою, залежить від хімічного складу руд, умов їх видобутку та збагачення.

Шляхи вдосконалення доменного виробництва та результати цієї роботи добре відомі. Останнім часом досягнуто рекордних показників роботи печей за продуктивністю, питомою витратою коксу та вуглеводневих добавок, за витратами технологічного кисню та температурою дуття. Досягнення високих показників визначили такі технічні та технологічні заходи [6]:

- застосування окускованих та офлюсованих залізорудних матеріалів із високим вмістом заліза до 65 %;

- застосування природного газу та пиловугільного палива у поєднанні зі збагаченням повітряного дуття киснем;

- встановлення сучасних повітронагрівачів з можливістю нагрівання дуття до 1300 ºС;

- зтосування безконусних завантажувальних пристроїв, що надають можливість зміни рудного навантаження по радіусу печі;

- застосування сучасних комп'ютерних систем управління, спеціальних засобів вимірювання показників процесу та контролю стану доменної печі;

- робота на стійких кислих шлаках з подальшою десульфурацією сірчистого чавуну, що виплавляється (з вмістом сірки до 0,06 %);

– застосування високоякісних вогнетривких матеріалів та ефективних систем охолодження.

Перспективним напрямом у розвитку доменного виробництва є подальше зниження витрати природних ресурсів та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, що може бути досягнуто за рахунок наступного [6]:

- технічне оснащення доменних печей сучасними засобами вимірювання та контролю;

- удосконалення технології доменної плавки комплексних залізних руд, агломерату та котунів;

- розробка заходів, спрямованих на продовження кампанії доменних печей до 20 років і більше;

- впровадження систем управління та інформаційно-моделюючих систем на основі останніх досягнень науки.

Вітчизняний та зарубіжний досвід переконливо доводить, що розвиток металургійних підприємств, їх технічне переозброєння, вирішення проблем якості та конкурентоспроможності металопродукції вимагають докорінного вдосконалення систем збору, зберігання, обробки, передачі та використання інформації, що застосовуються як для управління технологічними процесами, так і для управління виробництвом загалом.

Аналіз стану питання з реально використовуваними математичним моделям під час управління доменної плавкою показує, що є великий розрив між потенційними можливостями технічних засобів автоматизації та діючими системами управління та аналізу роботи доменного цеху. Тому виділимо наукові та технічні проблеми створення систем управління в доменному виробництві, найважливішими з яких є [7-13]:

- використання сучасних досягнень в галузі математичного моделювання, розпізнавання образів, теорії та практики доменної плавки, теорії управління при розробці автоматизованих систем управління;

- розробка на основі сучасних досягнень відповідного математичного забезпечення;

- створення інформаційно-моделюючих та експертних систем, систем підтримки прийняття рішень для управління як окремими доменними печами, так і їх комплексами.

1.2 Застосування математичних моделей у системах управління доменними печами та їх комплексами

Сучасні тенденції щодо створення та підтримки автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) доменних печей характеризуються послідовним оснащенням усіх печей надійними засобами вимірювання та контролю, комп'ютерною технікою.

Витрати в цілому на контрольно-вимірювальні прилади та автоматику (КВП) АСУ ТП оцінюються приблизно в 15% від вкладень у капітальний ремонт доменної печі.

На сьогодні всі доменні печі у промислово розвинених країнах обладнано АСУ ТП, проте вони мають різне призначення. Одні виконують лише функцію контролю за доменним процесом, інші призначені для прямого управління плавкою. Лише деякі з діючих автоматизованих систем включають до свого складу модельні системи управління технологічним режимом доменної плавки [14-16]. Такі модельні системи працюють у режимі порадника оператора доменної печі. Кінцевою метою створення систем управління доменними печами та їх комплексами є розробка такої системи, яка забезпечить безаварійну роботу виробництва та створить умови для мінімізації витрат на виробництво чавуну з урахуванням обмежень, обумовлених вимогами технології та можливостями обладнання.

Аналіз наукових праць у галузі математичного моделювання доменного процесу останніми роками, вкладених у рішення комплексу технологічних завдань, дозволяє виділити праці наступних вчених- металургів Большакова В. І. [6], Товаровського І. Г. [17], та ін.

Найпростішими вважаються балансові моделі доменного процесу, вони описують закономірності тепло- та масообміну в доменній печі в найзагальнішому вигляді і характеризують початковий і кінцевий стан матеріальних та енергетичних потоків у печі [18]. Матеріальні та теплові баланси, що лежать в основі моделей цього класу, встановлюють взаємозв'язки між режимними параметрами процесу та показниками роботи печі. Однак низька достовірність вихідних даних у минулому пов'язана з недосконалістю способів чи неможливістю контролю за показниками доменного процесу, призводила до похибок модельної оцінки.

Добре відомі моделі, в основі яких лежить розрахунок загального теплового балансу та показників доменної плавки за методикою, запропонованою А. Рістом [19]. Розроблена балансова модель призначена для аналізу роботи доменної печі та розробки нових режимів плавки на основі розрахунку температурних полів матеріалу та газу в просторі печі, опису процесів відновлення заліза з урахуванням геометричних характеристик печі та характеру газорозподілу [20].

Загальний тепловий баланс дозволяє прогнозувати показники роботи печі на основі аналізу статей приходу та витрати тепла, він розраховується за початковим та кінцевим станом системи. Однак він не дозволяє оцінити вплив умов перебігу процесів теплообміну в об'ємі печі. Наприклад, не враховується, за яких температур відбувається передача тепла від газів до шихти по висоті печі. Тому навіть за малої нев'язці складових загального теплового балансу неможливо визначити характер перебігу процесів у діапазоні від початкового стану системи до кінцевого.

З цієї причини виникла потреба у визначенні розподілу тепла за висотою доменної печі. Вирішити таке завдання можна за допомогою аналізу зональних

теплових балансів [17, 21], для складання яких потрібне розуміння характеру фізико-хімічних та теплообмінних процесів між різними температурними зонами печі. Зональні теплові баланси дозволяють знаходити лімітуючі (визначальні) зони печі, їх перевагою є можливість визначення температури колошникового газу розрахунковим шляхом. З одного боку, це дає більше можливостей щодо прогнозування ходу процесу порівняно з моделями на основі загального теплового балансу, а, з іншого боку, за такого підходу доводиться приймати низку припущень про ступінь завершеності процесів у різних температурних інтервалах.

Наступним витком у розвитку балансових моделей є математико-статистичний метод визначення техніко-економічних показників доменної плавки та створення на його основі балансово-статистичних моделей доменного процесу [22]. У цьому вся підході використовуються статичні залежності, наприклад, залежність ступеня прямого відновлення заліза від витрати відновників, ступеня використання оксиду вуглецю від витрати палива та інших.

Іншим класом математичних моделей доменного процесу є кінетичні моделі, серед яких можна виділити кінетико-динамічну модель доменного процесу [23-26]. Вона включає рівняння матеріального та теплового балансів, теплообміну між потоками газів та шихти, кінетики основних фізико-хімічних реакцій. У цій моделі також представлений ряд динамічних характеристик доменних печей при зміні показників процесу різними каналами управління.

При роботі з кінетичними моделями існує ряд проблем, причиною яких є, перш за все, неможливість отримання повних даних про процеси, що протікають в нижній частині доменної печі. Наприклад, відсутні дані про залежність швидкостей відновлення заліза і кремнію від температури, про коефіцієнти тепловіддачі між газом, коксом і рідкими продуктами плавки, не піддається повному математичному опису час перебування чавуну і шлаку, що спінюється між горизонтами переходу в рідкий стан і рівнем фурм.

Крім того, в кінетичних моделях існують складності при описі руху шихтових матеріалів у шахті печі, а необхідність попереднього визначення кінетичних характеристик залізорудної сировини потребує параметричного налаштування моделі для конкретних умов роботи. Все це обмежує практичне значення математичних моделей цього класу.

Перспективним на вирішення завдань аналізу та прогнозу роботи доменних печей є натурно-модельный підхід. Основою цього підходу є натурно-математичне моделювання, у якому натурні (реальні) дані об'єкті використовуються разом із частковими математичними моделями, описують окремі боку процесу. Найчастіше це дозволяє використовувати при вирішенні завдань щодо простий математичний апарат, в той же час враховувати фізичну сутність процесів, що протікають в об'єкті. Стосовно доменного процесу цей підхід вперше використано у 1993 році на металургійних підприємствах СНГ.

Згідно з натурно-модельним підходом модель доменної печі умовно можна розділити на дві частини - модель базового (еталонного) стану та прогнозуючу модель. Модель базового стану призначена для адаптації математичної моделі до реальних умов роботи та дозволяє оцінювати стан доменної печі за усередненими показниками за минулий (базовий) період роботи печі. Для побудови математичної моделі базового стану використовується інформація про склад і властивості шихти, чавуну і шлаку, характеристики комбінованого дуття і колошникового газу та ін.

Натурно-модельний підхід дозволив створити математичну модель доменного процесу, що має властивість адаптованості до умов роботи на конкретній доменній печі при існуючих системах збирання, обробки та зберігання інформації. При роботі ця модель використовує ряд настроювальних коефіцієнтів, які застосовуються лише до умов роботи конкретної печі та визначаються досвідченим шляхом.

Моделювання теплового стану доменної печі при такому підході показало хороші результати для вирішення завдань контролю та аналізу теплового режиму, проте слабкий облік або виключення з розгляду особливостей

дуттєвого, газодинамічного та шлакового режимів накладало обмеження практичного застосування математичної моделі. Тому надалі на основі фундаментальних фізичних уявлень про процес доменної плавки модель була вдосконалена. У ній були враховані параметри дуттєвого, газодинамічного та шлакового режимів, що суттєво розширило можливості використання моделі.

Розроблена за допомогою натурно-модельного підходу балансова модель доменного процесу в загальному вигляді є системою детермінованих залежностей, що характеризують тепловий, відновлювальний, дуттєвий, газодинамічний і шлаковий режими, зону в'язкопластичного стану рудних матеріалів (зону когезії).

На основі балансової моделі доменного процесу розроблено методику прогнозу показників роботи печі при зміні параметрів подачі, властивостей та складу шихтових матеріалів, характеристик комбінованого дуття. Система модельної підтримки прийняття рішень, що працює на основі цього, призначена як для діагностики, так і прогнозування роботи доменних печей і включає наступні блоки: розрахунок балансів (теплового, матеріального, окремих елементів); розрахунок зони когезії; діагностика теплового, шлакового та газодинамічного режимів доменної плавки.

1.3 Стан питання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей

Переведення металургійних комбінатів з державної власності в приватну, а економіки від планової до ринкової призвели до того, що підприємства зіткнулися з питаннями економічної ефективності при виробництві чавуну і змушені були самостійно вирішувати завдання оптимізації складу шихти, оцінки раціональності використання різних добавок до повітряного дуття та побудови стратегії управління комплексом домівок. З іншого боку, нестабільні зовнішні умови призводять до значних відхилень поточних технологічних режимів доменних печей від оптимальних. До зовнішніх умов відносяться

безаварійна робота внутрішньозаводських постачальників сировинних та енергетичних ресурсів (аглофабрика, коксохімічне виробництво, киснево-компресорний цех, станція подачі природного газу), допоміжне обладнання (повітрянагрівачі та ін.), стабільність поставок і якість сировинних ресурсів ін) від зовнішніх постачальників [27-29]. Залежність ефективності використання вуглеводневих добавок (природний газ, пило-вугільне паливо) від багатьох факторів та наявність обмежень на їхню витрату значно ускладнює завдання щодо визначення оптимальних характеристик гарячого дуття, при яких досягаються найкращі техніко-економічні показники роботи всього комплексу доменних печей.

Тому в сучасних умовах різко зросла необхідність у побудові та використанні автоматизованих систем оптимізації умов роботи доменних печей на основі методів оперативного керування технологічним режимом доменної плавки.

Вирішення задач оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу агрегатів здійснюється із застосуванням методів математичного моделювання та математичного програмування, широко використовуються у різних галузях промисловості – металургійній, хімічній, енергетиці та інших. У зв'язку з цим заслуговують на увагу роботи з моделювання та оптимізації процесів Лісієнко В.Г. [30, 31], Рея У. [33], Цирліна А.М. [32], Таха Х.А. [34], Цимбала В.П. [35], Спіріна Н.А., Рейклейтіса Г. [36] та інших.

Оптимальний розподіл сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей є актуальним завданням, оскільки технологічні показники роботи окремих печей суттєво різняться. Наприклад, окремі доменні печі мають різний ступінь використання відновлення моноксиду вуглецю та водню, що визначає доцільність оцінки ефективності добавки газу до повітряного дуття. Відмінність у показниках пояснюється конструктивними особливостями профілю печі, фізичним станом футерування печі, типом засипного пристрою та багатьма іншими факторами. Тому важливо мати

методику, яка дозволить оцінити ефективність використання ресурсів та здійснити їх оптимальний розподіл у комплексі доменних печей.

Існуючі економіко-математичні моделі призначені на вирішення завдань оптимального розподілу ресурсів між технологічними агрегатами. Стосовно доменного виробництва вони не враховують повною мірою процеси теплообміну, газодинаміки, шлакообразования і обмеження на них. Тому такі моделі практично не використовуються фахівцями у чорній металургії. Математичні моделі оптимального розподілу сировини і палива в доменному виробництві також недостатньо розвинені, тому що повною мірою не беруть до уваги різні сторони процесу та особливості роботи окремих печей.

Надалі розглядається завдання стратегічного розподілу залізорудної сировини та встановлення характеристик комбінованого дуття у комплексі доменних печей. Тому питання динаміки та перехідних процесів не враховуються, а предметом розгляду є лише статичні.

Оптимізаційні моделі. Це зумовлено тим, що зміна характеристик комбінованого дуття здійснюється за необхідності, але за нормальних умов роботи періодичність усереднення інформації зазвичай становить один місяць.

Постановка задачі оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів потребує вивчення статичних характеристик, що описують вплив зміни умов плавки на техніко-економічні показники роботи доменних печей. Для цього на кожній доменній печі виконується розрахунок індивідуальних особливостей впливу виду, складу та властивостей залізорудної сировини, індивідуальних диференціальних еквівалентів заміни коксу. Для розрахунку використовуються різні підходи оцінки зазначених змінних, наприклад, загальний тепловий баланс [18] та баланс тепла в окремих зонах печі, комплексні критерії протікання теплообмінних, відновлювальних, газогідродинамічних процесів, експериментальні дані щодо ефективності вдування палив через повітряні фурми та інші [17, 21, 22].

Постановка завдання також вимагає аналізу та опису зовнішніх та внутрішніх обмежень. У реальних умовах доводиться оцінювати фактори та

особливості роботи окремих доменних печей, які можна врахувати лише методом експертної оцінки. Також необхідно враховувати і резерви по ресурсах, що виділяються цеху. При інцидентах та аварійних режимах необхідно мати формалізовані та заплановані прийоми маневреного перерозподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів. Вирішити це завдання можна лише з використанням методів математичного моделювання та розробки на їх основі автоматизованих систем.

Створенням систем автоматизації та розробкою математичних моделей оптимізації доменного процесу займалися у різний час відомі вітчизняні та зарубіжні вчені Большаков В.І., Товаровський І.Г., Ченцов А.В. і Шаврін С.В., Андронов В.М. та багато інших [6, 22, 36, 37].

Постановка та розв'язання задачі оптимального розподілу кількох потоків видів сировини та палива для паралельно працюючих агрегатів, до яких можна віднести і доменні печі, представлена у роботах [39]. Це завдання є наочним прикладом більш загального класу завдань про розподіл обмеженої кількості сировинних та паливно-енергетичних ресурсів між кількома споживачами. При цьому сумарна витрата ресурсів по групі агрегатів повинна дорівнювати заданому значенню, тобто. враховуються обмеження типу суворої рівності. Це дозволяє використовувати для вирішення задачі метод множників Лагранжа. При цьому залежність цільової функції та обмежень від змінних стану (витрат паливно-енергетичних ресурсів, сировини тощо) може мати у загальному випадку нелінійний вигляд.

В результаті вирішення такого завдання було зроблено важливий висновок: при оптимальному розподілі потоків сировини похідні від критеріїв оптимальності всіх процесів (агрегатів), на які ця сировина розподіляється, повинні бути рівними між собою. Такий результат представляє практичний інтерес і може часом бути використаний в організацію управління та планування виробництва.

Застосування цього висновку до доменного виробництва дозволили Товаровському І.Г. та Бородуліну А.В. показати в своїх роботах [17, 38], що

найбільша економія коксу в комплексі печей (або найменший перевитрата у разі негативного впливу того чи іншого ресурсу) буде при такому розподілі цього ресурсу, коли невелика його зміна на кожній печі викликає однакову зміну витрати коксу на всіх печах. Якщо розподіляти ресурс інакше, то печах з меншою економією коксу на одиницю додаткового ресурсу можна його зменшити, збільшивши на таку ж величину на печах з більшою величиною економії і отримавши загальну економію коксу по групі печей. Очевидно, що сутність постановки та вирішення задачі не змінюється при виборі як критерій оптимізації не витрати коксу, а будь-якого іншого критерію, наприклад, продуктивності, собівартості чавуну, його якості тощо.

Такий підхід застосовується до розподілу будь-якого обмеженого ресурсу (різні види сировини та коксу, дуттєві добавки, нагрівання дуття тощо), а також для оптимізації режимних параметрів печей за критерієм найкращого результату для всього комплексу печей. Недоліком такого підходу для вирішення задач оптимізації є те, що він не дозволяє визначати найкращі характеристики комбінованого дуття на кожній з печей цеху у випадках зміни обсягу виділених цеху ресурсів, зупинки печей, а також оцінювати максимальні значення цих ресурсів, які можуть ефективно використовувати цех. У запропонованих методах не враховуються, як правило, індивідуальні для кожної печі цеху обмеження на тепловий, газодинамічний і шлаковий режими плавки, порушення яких можливі при виконанні рекомендацій щодо розподілу ресурсів. Метод множників Лагранжа застосовується у разі обмежень типу суворої рівності. У реальних виробничих ситуаціях потрібно також облік обмежень на кшталт «більше» і «менше», що значно ускладнює рішення цим методом.

Зараз існує інший підхід, який дає змогу мінімізувати зазначені недоліки. Автори дійшли висновку, що через невеликі коливання середніх показників доменного процесу щодо базових значень можна використовувати принцип малих відхилень і звести завдання оптимізації до лінійного математичного програмування.

Формулювання та послідовність розв'язання задачі оптимального розподілу паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей з урахуванням індивідуальних особливостей теплового, газодинамічного та шлакового режимів, а також конструктивних та режимних параметрів показують, що натурно-модельный підхід і принцип опорно- обуреного руху дозволяє виключити вплив інструментальних і систематичних похибок інформаційних каналів. Недоліком такого підходу є необхідність оцінки похибки лінеаризації моделі системи, що оптимізується, проте він дозволяє значно більшою мірою врахувати технологічні особливості функціонування кожної з доменних печей окремо, використовуючи при цьому обмеження типу нерівностей. Використовуючи дані дослідних плавок, було показано, що при коливаннях витрати природного газу в межах 25 м3/т чавуну та вмісту кисню в повітряному дутті в межах 0,5%, коефіцієнт нелінійності доменного процесу не перевищує 4-5%. Подальший аналіз нелінійності доменного процесу дозволив встановити межі зміни режимних параметрів, у яких допустиме використання лінеаризованих моделей.

Як показує практика, коливання режимних параметрів печей у реальних умовах не перевищують знайдених меж. Це дозволяє надалі використовувати лінеаризовані моделі для вирішення завдань оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному цеху.

У той же час, відомі алгоритми оптимального розподілу залізорудної сировини, природного газу та технологічного кисню мають такі недоліки:

1. Вони дозволяють оцінити ефективність використання різних видів залізорудної сировини, природного газу та технологічного кисню за минулий період роботи при відомих складі та властивостях завантажуваної шихти, дуттєвих та інших контрольованих керуючих впливів на кожній доменній печі. При цьому вони не дозволяють вирішувати завдання прогнозу при зміні властивостей залізорудної сировини та коксу, дуттєвих характеристик, тобто. за відсутності комплексу вхідних та вихідних змінних окремих агрегатів та системи в цілому, що суттєво обмежує сферу їх застосування.

2. Алгоритми оптимального розподілу сировини в доменному виробництві призначені для вибору оптимального складу шихти в межах однієї доменної печі, але не призначені для перерозподілу наявних ресурсів у всьому комплексі доменних печей з урахуванням індивідуальних особливостей кожного працюючого агрегату. Існуючі алгоритми вибору оптимального складу шихти також враховують економічну складову (вартість окремих видів сировини).

1.4 Постановка завдань дослідження

Сьогодні робота підприємств чорної металургії характеризується нестабільним попитом на металопродукцію. Доменні цехи найбільших металургійних комбінатів працюють в умовах напруженого ринку сировинних та паливно-енергетичних ресурсів. Це пов'язано як з переходом економіки на ринкові відносини, так і з виснаженням родовищ коксівного вугілля та залізняку.

У силу відсутності на даний момент повних математичних моделей доменного процесу для вирішення завдань аналізу та прогнозування показників роботи комплексу доменних печей при оптимальному розподілі ресурсів можуть бути використані принципи натурно-математичного моделювання, при якому основою моделі є натурні (реальні) дані про об'єкт у їх тісному поєднанні з математичними моделями.

У зв'язку з зазначеним вище, метою даного дослідження є вирішення актуальної науково-практичної задачі зниження витрат на доменний переділ та підвищення його енергоефективності на основі розробки та застосування нових методів та алгоритмів оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві, прогнозування роботи комплексу доменних печей в умовах зміни кон'юнктури ринку сировини та палива.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати підходи та методи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей. Розробити метод оптимального розподілу ресурсів на основі натурно-математичного моделювання, використання фізико-хімічних закономірностей процесів та принципу малих відхилень вихідних змінних та змінних стану на околицях базового режиму з метою прогнозування роботи окремих печей та цеху в цілому.

2. Розробити алгоритм оптимального розподілу сировини та палива з урахуванням вимог технологічного персоналу на основі створеного методу та функціональної моделі стосовно комплексу доменних печей при зміні характеристик дуття, складу та властивостей проплавлюваної залізорудної сировини та палива.

3. Розробити автоматизовану систему оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей з урахуванням вимог до сучасних інформаційних систем.

2 СТРУКТУРА І ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ СИРОВИНИХ ТА ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У ДОМІННОМУ ВИРОБНИЦТВІ

2.1 Змістовна постановка завдання оптимального розподілу сировинних та енергетичних ресурсів у доменному цеху

При вирішенні завдань оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей (доменного цеху) та виборі оптимальних керуючих впливів слід враховувати специфіку доменної плавки, особливості конструктивних і режимних параметрів окремих агрегатів, комплекс обмежуючих та лімітуючих факторів, а також стан окремих печей.

При постановці та вирішенні завдання розподілу паливно-енергетичних та сировинних ресурсів використовується опорно-обурений рух об'єкта та принцип малих відхилень змінних щодо базового режиму.

Використовуваний підхід ґрунтується на таких положеннях: при відносно невеликих коливаннях вхідних змінних та керуючих впливів щодо базових значень доцільно використовувати принцип малих відхилень та звести задачу оптимізації до лінійного математичного програмування.

Планування роботи доменного цеху визначається попитом на чавун з боку конвертерного цеху з виробництва сталі і здійснюється за виробничою програмою на календарний рік. У програмі задається місячне виробництво з кожної доменної печі з урахуванням графіка ремонтів по цеху (ремонтів печей та повітронагрівачів, турбовоздуходувного господарства та ін.), що враховує час на ремонт, зупинку та задувку печей. Створення виробничої програми доменного цеху здійснюється нерозривно з річним плануванням виробництва на всьому ланцюжку переділів чорної металургії: доменне та мартенівське виробництво, проміжне нагрівання сталі та прокатка. Завантаження виробництва здійснюється як з урахуванням потреб споживачів, так і планованими запасами палива та сировини: коксу, технологічного кисню та природного газу, агломерату та окатишів.

Місячне виконання виробничої програми з окремих доменних печей характеризується найчастіше великими відхиленнями від планованих показників з виробництва чавуну, викликаними інцидентами та аваріями (порушення нормального сходу шихти, утворення настилів і боротьба з ними, прогар фурми або холодильників, неполадки в роботі механічного. малими відхиленнями від сумарного виробництва чавуну у цеху. Мале відхилення у виробництві реалізується оперативним зміною продуктивності окремих печей рахунок перерозподілу використовуваних сировинних і паливно-енергетичних ресурсів. У таких умовах важливим завданням є оптимальний розподіл сировинних та паливно-енергетичних ресурсів між доменними печами.

Розглянемо послідовність розв'язання задачі оптимального розподілу сировини та палива у комплексі доменних печей при плануванні роботи цеху на один місяць.

Оптимальний розподіл ресурсів у планованому періоді роботи (проєктному періоді) здійснюється згідно з натурно-модельним підходом на основі відомих показників роботи доменних печей за минулий період роботи (базовий період), в якості якого зазвичай приймається останній звітний місяць.

Алгоритм розрахунку оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей представлений на рисунку 2.1 та включає наступні етапи:

1. Оцінка достовірності вихідної інформації за базовий період, розрахунок комплексу показників ходу теплообмінних, відновних, газодинамічних процесів, процесів шлакоутворення доменної плавки, а також розрахунок коефіцієнтів передачі (коефіцієнтів пофакторного аналізу) різними каналами впливу на кожній печі. При неможливості визначення деяких з цих коефіцієнтів за математичною моделлю доменного процесу вони приймаються за довідковими даними (технологічною інструкцією), прийнятими для умов роботи доменного цеху в цілому;

2. Завдання умов роботи у проєктному періоді для цеху загалом і кожної печі окремо. На цьому етапі виконуються:

-завдання виробництва на цех загалом, розподіл виробництва з кожної доменної печі. Розподіл може здійснюватися пропорційно виробництву у базовому періоді, або вручну методом експертної оцінки з урахуванням технічного стану кожної печі, графіка ремонтів, запланованих зупинок печей, особливостей постачання печей та якості сировинних та паливно-енергетичних ресурсів;

- завдання характеристик гарячого дуття на кожній печі (температура та вологість). Вологість дуття визначається за таблицею сезонної вологості в регіоні, можливе коригування з урахуванням зволоження дуття парою;

- встановлення хімічного складу та властивостей компонентів шихти, у тому числі залізорудних матеріалів, флюсів та коксу та ін;

-завдання допустимого діапазону частки котунів у шихті на кожній печі. Частка окатишів у шихті є режимним обмеженням для кожної печі та пояснюється постачанням видів залізорудної сировини, особливостями технології плавки, технічним станом агрегатів, роботою обладнання та ін факторами конкретної печі;

3. Завдання обмежень на цех загалом щодо надходження (витрати) залізорудної сировини (окатиші, агломерат, рудні добавки), флюсів та коксу, введення резервів технологічного кисню та природного газу;

4. Завдання обмежень на роботу кожної печей цеху, тобто, на тепловий, дуттєвий, газодинамічний та шлаковий режими, а також на якість виплавлюваного чавуну (необхідний вміст кремнію і марганцю, допустимий вміст сірки);

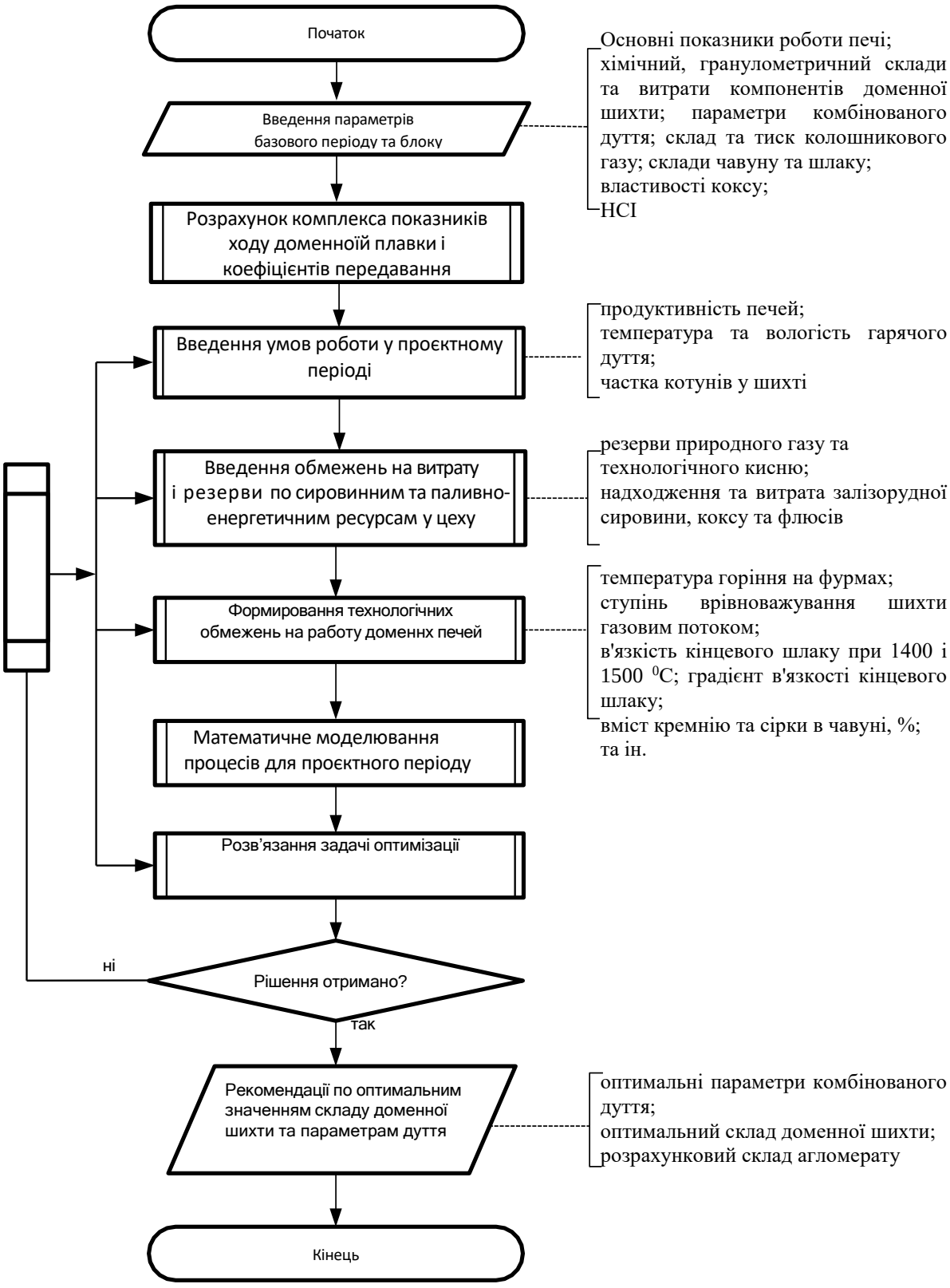


Рисунок 2.1 - Алгоритм розрахунку оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей

5. Математичне моделювання процесів для проєктного періоду окремих доменних печей та цеху в цілому. Передбачається додаткова оцінка лінійності моделі, за потреби здійснюється коригування перерахункових коефіцієнтів. Здійснюється попередня оцінка техніко-економічних показників, показників ходу теплообмінних, відновлювальних, газодинамічних процесів, процесів шлакоутворення доменної плавки окремих печей при зміні властивостей та складу шихтових матеріалів, температури та вологості дуття;

6. Розв'язання задачі оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів. Здійснюється визначення оптимальних значень на кожній доменній печі та загалом по цеху:

- основних техніко-економічних показників плавки (продуктивності, інтенсивності плавки, питомої витрати коксу);

- складу доменної шихти (витрат залізорудних матеріалів, флюсів, коксу), за потреби та основності агломерату;

- характеристик дуття (витрат дуття, природного газу та технологічного кисню);

7. Аналіз отриманих результатів, за необхідності коригування задачі. У разі відсутності розв'язання задачі здійснюється діагностика причин та коригування постановки задачі. При коригуванні можлива зміна умов роботи у проєктному періоді, складу та значень обмежень на роботу доменних печей.

2.2 Розробка схеми оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей

Схема оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному цеху представлена на рис. 2.2 та включає наступні основні блоки:

1. Розрахунок комплексу показників, що характеризують тепловий, газодинамічний, шлаковий та дуттєвий режими кожної з доменних печей цеху за базовий період. Розрахунок провадиться з використанням відомої балансової

математичної моделі доменного процесу. Її складова частина модель базового (еталонного) стану дозволяє оцінити стан кожної доменної печі та вплив вхідних змінних та керуючих впливів на тепловий, газодинамічний та шлаковий режими доменної плавки з використанням фактичних та розрахункових показників:

- розміри профілю доменної печі (діаметри колошника, розпару та горна, висоти конструктивних елементів печі та корисна висота печі);

- загальна кількість повітряних фурм, а також кількість працюючих фурм, їх діаметр і висів;

- склад шихти (агломерат, котуни, металодобавки, рудні добавки, флюси), питомі витрати окремих компонентів, хімічні та фракційні склади;

- Питома витрата коксу, його технічний і гранулометричний склади, міцність коксу M25, стирання коксу M10, гаряча міцність (CSR) і реакційна здатність (CRI), хімічний склад золи коксу;

- характеристики комбінованого дуття (температура, тиск та вологість дуття, вміст кисню у дутті, витрата природного газу);

- характеристики рідких продуктів плавки (маса та хімічні склади чавуну та шлаку, температура чавуну);

- характеристики колошникового газу (температура, тиск, вміст у газі CO2, CO та H2, винесення колошникового пилу та його склад);

- розрахункові комплексні показники.

Усього використовується понад 500 звітних та близько 50 розрахункових показників. На підставі результатів, отриманих за допомогою моделі базового стану, прогнозуюча модель дає можливість оцінити показники доменного процесу у разі зміни умов плавки.

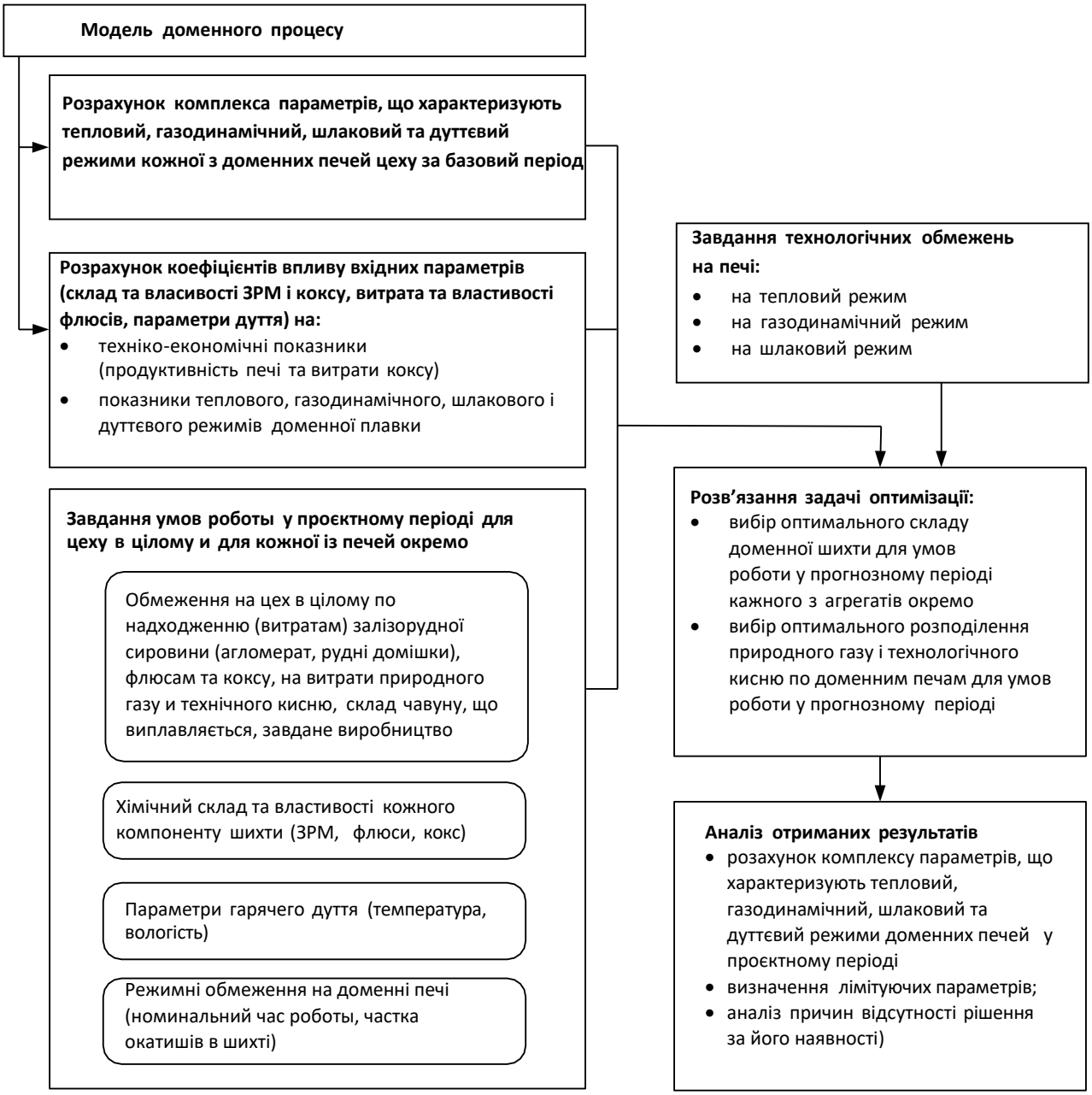


Рисунок 2.2 - Схема оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей

2. Розрахунок коефіцієнтів лінеаризованої моделі із застосуванням математичної моделі доменного процесу. Коефіцієнти моделі враховують вплив зміни основних вхідних та вихідних змінних як на техніко-економічні показники процесу (продуктивність та витрата коксу), так і на показники теплового, газодинамічного та шлакового режимів плавки.

Так, у моделі теплового стану розраховуються коефіцієнти впливу наступних показників процесу:

- збільшення температури гарячого дуття на 10^0 С;

- зниження вологості дуття на 1 г/м^3;

- збільшення об'ємної частки кисню в дуття на 1%;

- збільшення витрати природного газу на 1 м3/т чавуну;

- зниження масової частки кремнію в чавуні на 0,1%;

- зниження масової частки сірки в чавуні на 0,01%;

- підвищення вмісту заліза в шихті на 1% (при постійному відношенні CaO/SiO_2);

- підвищення вмісту заліза в шихті на 1% (при постійному відношенні SiO_2/Fe);

- збільшення кількості металодобавок у шихті на 10 кг/т чавуну;

- виведення з шихти 10 кг/т вапняку, кварциту та інших флюсів;

- підвищення масової частки котунів на 1%.

Коефіцієнти впливу технологічних факторів (у тому числі і організаційних) на питому витрату коксу та продуктивність доменної печі, які не розраховуються в моделі доменного процесу, приймаються за даними технологічної інструкції [39].

Надалі, враховуючи лінійність моделі, ці коефіцієнти зчитуються постійними кожної печі стосовно обраному базовому періоду під час вирішення завдань прогнозу.

Оцінюється можливість лінеаризації математичної моделі доменного процесу для умов роботи окремих печей, визначаються можливі межі змін сировинних, дуттєвих та режимних параметрів та застосування для вирішення задачі оптимізації методів лінійного математичного програмування. При цьому використовуються методи оцінки лінійності доменного процесу.

3. Завдання умов роботи у проєктному періоді для цеху загалом і кожної печі окремо, представлені раніше у п. 2.1.

4. Завдання технологічних обмежень на кожну з доменних печей, що характеризують тепловий, газодинамічний і шлаковий режим доменної плавки, склад і властивості чавуну, що виплавляється.

5. Завдання цільової функції та розв'язання задачі оптимізації. Розв'язання задачі оптимізації здійснюється в два етапи. На першому етапі вирішується завдання вибору оптимального складу доменної шихти для умов роботи у прогнозному періоді кожного з агрегатів окремо. Рішення здійснюється при заданому співвідношенні витрати агломерату і котунів, заданих витратах металодобавок (інших матеріалів). Передбачається можливістю коригування складу та властивостей кінцевого шлаку витратами флюсів та основністю агломерату (при необхідності). Завдання оптимізації вирішується з урахуванням технологічних обмежень та забезпечення заданого виробництва чавуну.

На другому етапі вирішується завдання оптимального розподілу природного газу та технологічного кисню по доменних печах для умов роботи у прогнозному періоді. Це завдання зводиться до задачі лінійного програмування та враховує наступне:

- формалізуються обмеження на тепловий, газодинамічний та шлаковий режим доменної плавки кожної доменної печі цеху;

- формалізуються обмеження в цілому по цеху на виконання плану з виробництва чавуну, на витрати природного газу, технологічного кисню та коксу;

- співвідношення витрат природного газу та технологічного кисню задається з умови підтримки температури горіння на фурмах у заданому інтервалі;

- забезпечення максимальної економічної ефективності від використання природного газу та технологічного кисню в доменному виробництві.

6. Аналіз одержаних результатів. У процесі вирішення завдання оптимізації можуть виникнути випадки, коли обмеження, накладені на різні режими роботи печі, суперечливі. І тут відсутня область допустимих рішень і

тому передбачена діагностика причин відсутності рішення. Під час знаходження лімітуючих факторів виконується коригування умов роботи у проєктному періоді або зміна обмежень на режими роботи печей. Коли рішення знайдено, здійснюється визначення техніко-економічних показників плавки і розрахунок комплексу показників, що характеризують тепловий, газодинамічний, шлаковий і дуттєвий режими кожної з доменних печей цеху в проєктному періоді.

2.3 Функціональна модель автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху

При проєктуванні автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху (АІС ОРТЕР) було використано методологію функціонального моделювання та графічну нотацію IDEF0. Методологія IDEF0 призначена для створення опису інформаційної системи та її зовнішнього оточення до визначення остаточних вимог до неї. При цьому закладені в неї методи, правила та процедури дають можливість описувати будь-які системи, а не лише інформаційні. IDEF0 застосовується на ранніх етапах створення систем і дозволяє запобігти можливим помилкам при подальшій розробці та супроводі систем.

У основі IDEF0 лежить методологія структурного аналізу та проєктування SADT (Structural Analysis and Design Technique), запропонована Дугласом Т. Россом [40-42]. IDEF0-модель визначає, які функції виконує система і що вона виробляє. На моделі вказується, яка інформація використовується для управління, а також які ресурси та засоби застосовуються для виконання її функцій.

Перевагою методології IDEF0 є те, що вона забезпечує можливість обміну інформацією про систему, що розглядається на мові, зрозумілій не тільки розробнику системи, а і фахівцю-експерту в предметній галузі. Це

реалізується за рахунок графічного представлення моделі як ієрархії діаграм, що забезпечує компактність, строгість і точність представлення інформації.

Функціональна модель розроблена з використанням програмного забезпечення Ramus Educational та містить понад 200 блоків на п’яти рівнях декомпозиції. З метою опису інформаційної системи, що розробляється, далі буде розглянуто кілька верхніх рівнів функціональної моделі.

Верхній рівень моделі показує основні потоки інформації, які проходять через систему, що проєктується, її зовнішній вигляд представлений на рис. 2.3. На цьому рівні показано, що система, що розробляється, приймає на вхід звітні показники роботи доменних печей у базовому періоді та умови роботи в проєктному періоді. Результати вирішення завдання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів подаються у чисельному та графічному вигляді.

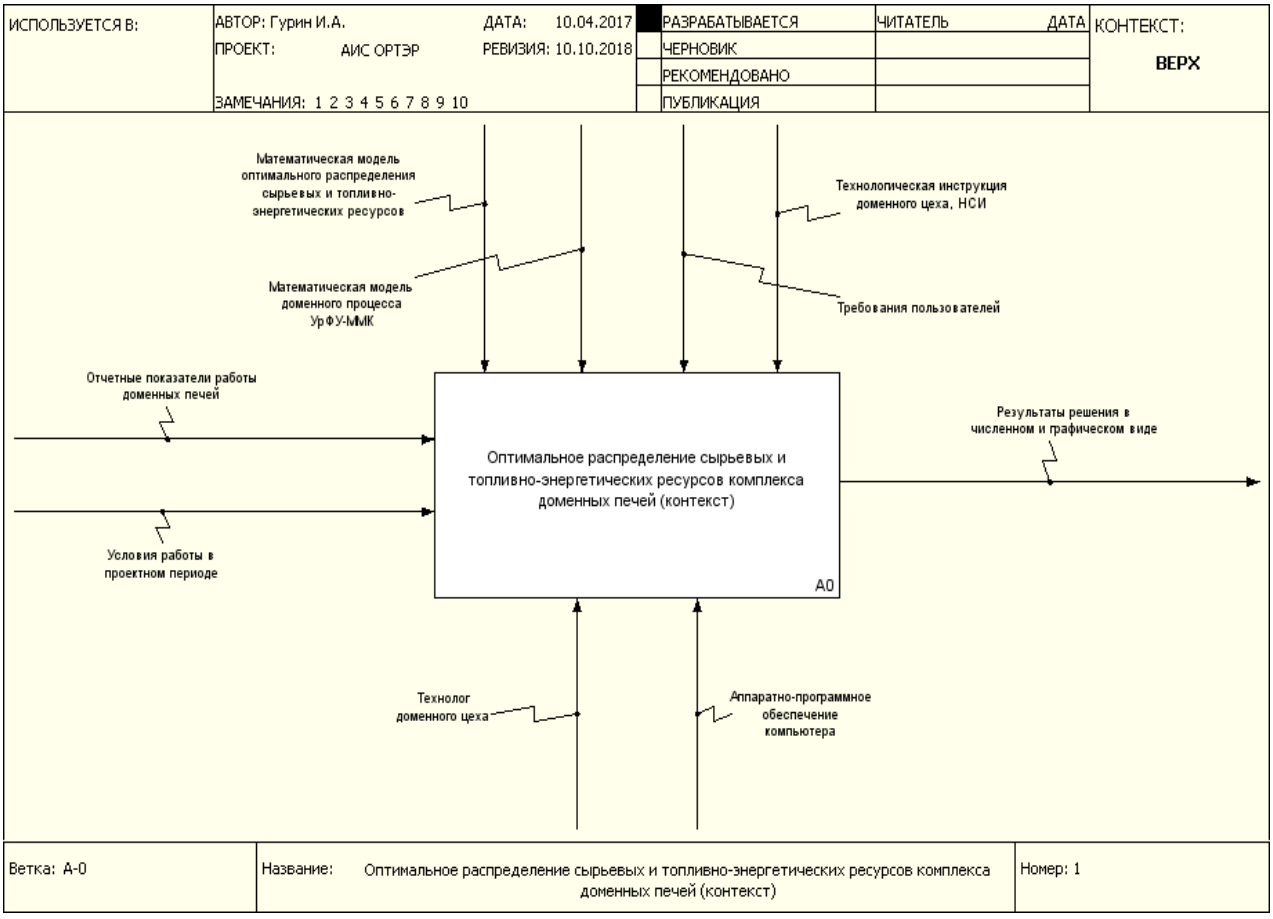


Рисунок 2.3 - Верхній рівень функціональної моделі

Інтерфейс управління складається з чотирьох компонентів: математичної моделі доменного процесу, математичної моделі системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному цеху, вимог користувачів, а також технологічної інструкції доменного цеху та блоку нормативно-довідкової інформації (НДІ).

Математична модель доменного процесу включає набір алгоритмів та рівнянь для розрахунку та оцінки показників теплового, газодинамічного, дуттєвого та шлакового режимів плавки, а математична модель оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів призначена для визначення оптимальних значень витрати сировини та палива на кожній доменній печі.

Технологічна інструкція доменного цеху є головним керівним документом, який визначає єдині технологічні правила та практичні прийоми для персоналу доменного цеху по організації виробничого процесу з метою отримання необхідного виробництва чавуну заданої якості при мінімізації питомих витрат сировини, енергетичних та трудових витрат, а також забезпечення безпеки праці обслуговуючого персоналу.

Блок НДІ включає інформацію про коригувальні коефіцієнти (не визначених за моделлю процесу), насипних масах коксу, агломерату, котунів та інших шихтових матеріалів, про втрати тиску по тракту гарячого дуття, набір емпіричних коефіцієнтів, що використовуються в алгоритмах, допустимі значення показників, що характеризують тепловий, шлаковий і газодинам.

Механізмами функціональної моделі є апаратно-програмне забезпечення у складі інформаційно-обчислювального центру АСУ (ІОЦ АСУ) та технолог доменного цеху у складі технологічної групи доменного цеху (ДЦ).

Відповідно до методології функціонального моделювання IDEF0, інформаційну систему розбито кілька взаємозалежних підсистем, представлених рис. 2.4.

Функція «Підготувати дані базового періоду» (A1) є першим підготовчим етапом для вирішення задачі оптимального розподілу сировинних та паливно-

енергетичних ресурсів комплексу доменних печей. Декомпозиція блоку А1 представлена рис. 2.5.

Функціональний блок А11 служить для вибору звітного періоду (місяць та рік), який приймається як базовий. Для обраного періоду здійснюється вибірка середньомісячних даних про роботу доменного цеху, причому як джерело виступає централізована база даних АСУ доменного цеху.

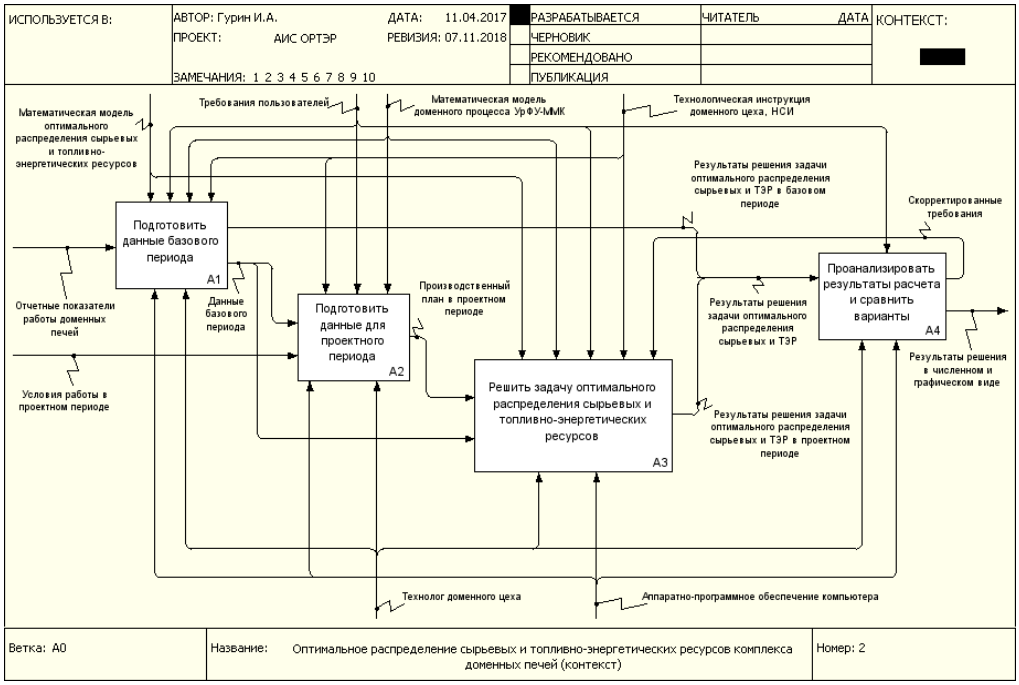


Рисунок 2.4 – Декомпозиція першого рівня функціональної моделі

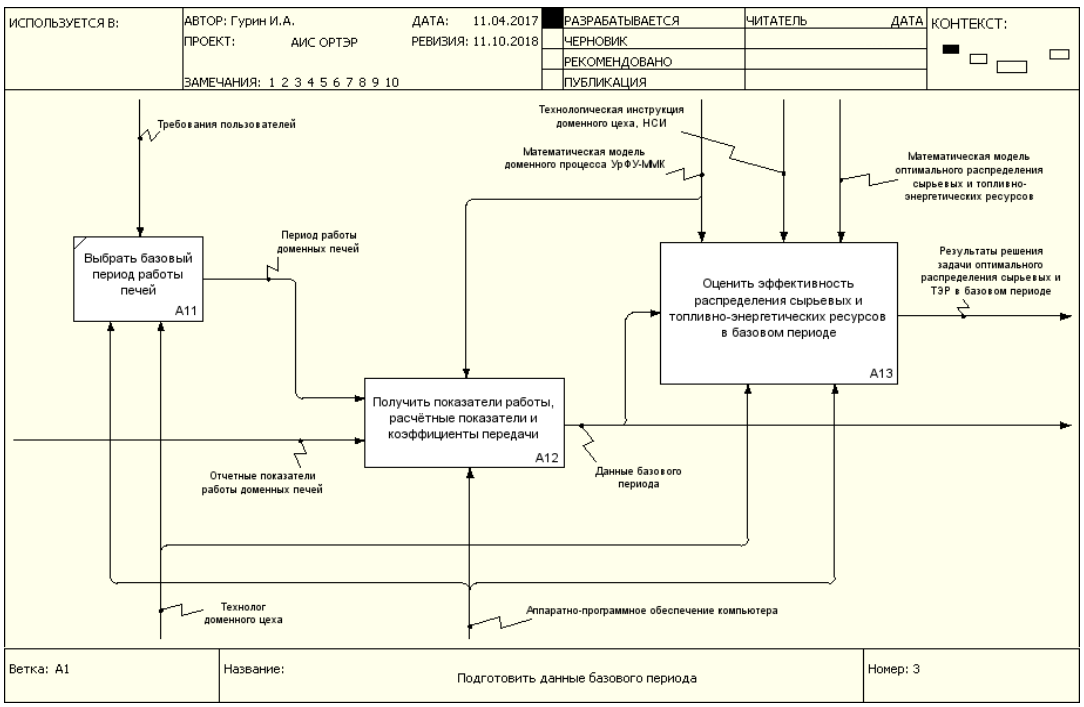


Рисунок 2.5 – Декомпозиція блоку А1 «Підготувати дані базового періоду»

Звітні дані в базі формуються спеціалістами інженерно-технологічної групи доменного цеху щомісяця за допомогою існуючих програмних модулів та затверджуються начальником цеху. При цьому вони містять інформацію щодо основних розділів доменного виробництва:

- конструктивні розміри доменної печі;

- техніко-економічні показники роботи печей;

- фізичні властивості, хімічний склад та витрати завантажуваних шихтових матеріалів та коксу;

- характеристики колошникового газу;

- хімічні склади та характеристики паливно-енергетичних ресурсів (комбінованого дуття);

- хімічний склад та температура рідких продуктів плавки;

- контрольовані показники теплового, дуттєвого, газодинамічного та шлакового режиму доменної плави (із системи АСУ ТП);

- облік простоїв та стану технологічного обладнання.

За отриманими даними у блоці А12 здійснюється розрахунок показників ходу теплообмінних, відновлювальних та газодинамічних процесів, процесів шлакоутворення. Звітні та розрахункові показники служать для розрахунку коефіцієнтів передачі лінеаризованої математичної моделі оптимального розподілу сировини та палива в комплексі доменних печей. Коефіцієнти дозволяють оцінити вплив відхилень параметрів шихти та дуття, продуктів плавки як на техніко-економічні показники доменного процесу (витрата коксу та продуктивність печі), так і на показники теплового, газодинамічного та шлакового режимів плавки. Отриманий з бази даних масив показників роботи, а також розраховані за моделлю доменного процесу комплексні показники та коефіцієнти складають дані базового періоду. Декомпозиція блоку А12 представлена на рис. 2.6.

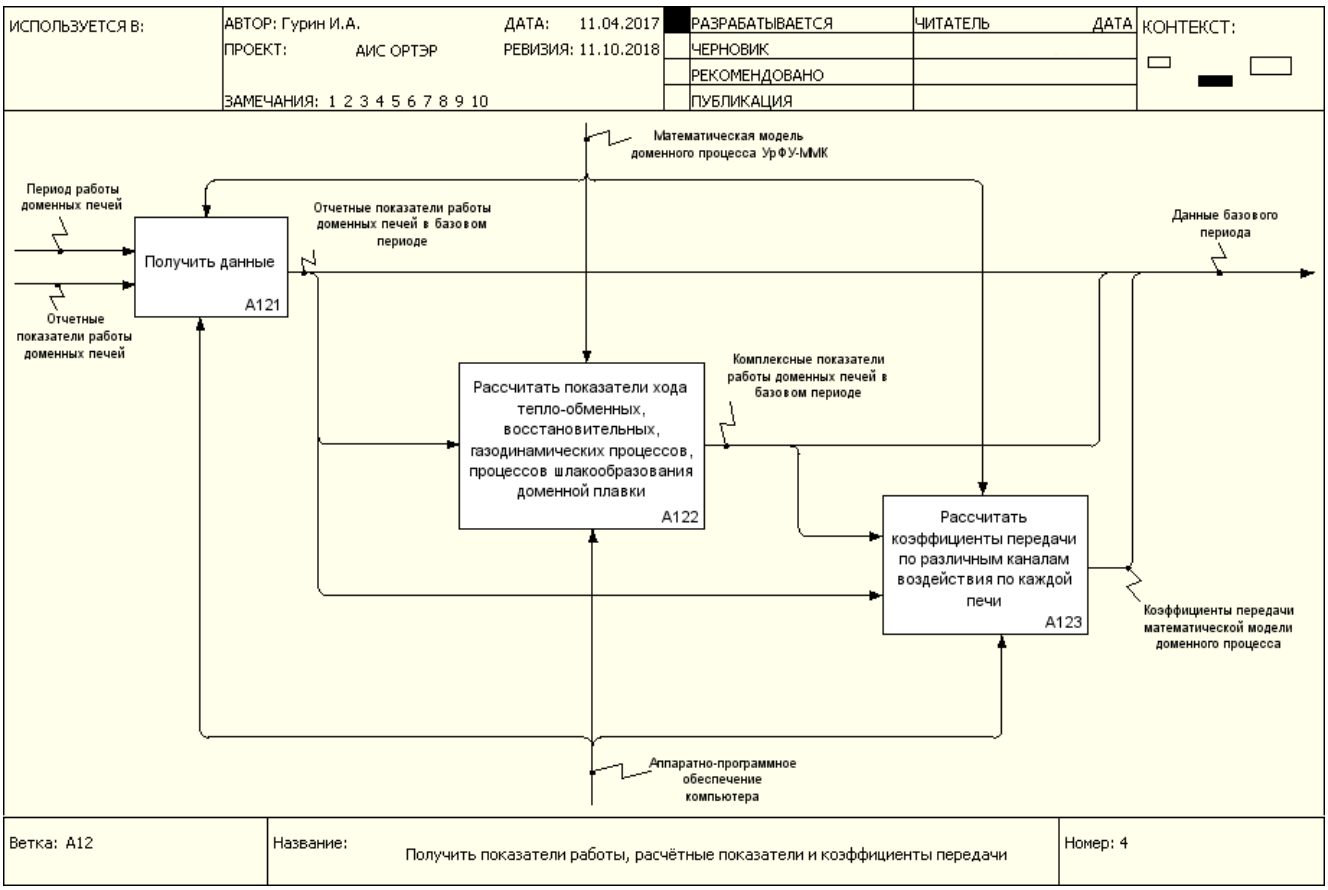


Рисунок 2.6 - Декомпозиція блоку A12 «Отримати показники роботи, розрахункові показники та коефіцієнти передачі»

Наступний блок A13 є опціональним та призначений для оцінки ефективності розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у базовому періоді. Тут здійснюється постановка та вирішення задачі оптимізації, результатом якого є визначення оптимального складу шихти, витрат природного газу та технологічного кисню на кожній доменній печі у базовому періоді.

Функція «Підготувати дані для проєктного періоду» (A2) є другим підготовчим етапом і призначена для завдання технологом умов та обмежень на роботу окремих доменних печей та цеху загалом у проєктному періоді. Декомпозиція блоку A2 представлена на рис. 2.7.

Декомпозиція блоку «Заповнити план із виробництва» (A21) представлена на рис. 2.8. Він включає введення номінального часу роботи доменних печей у проєктному періоді, завдання планованої продуктивності печей, а також

розрахунок на основі цих даних місячного виробництва чавуну. Планування продуктивність окремих доменних печей не входить у рамки дослідження, а здійснюється технологом з урахуванням індивідуальних особливостей печей, які проблематично врахувати при моделюванні (конструктивні особливості профілю печі, ступінь зносу кладки, технічний стан обладнання).

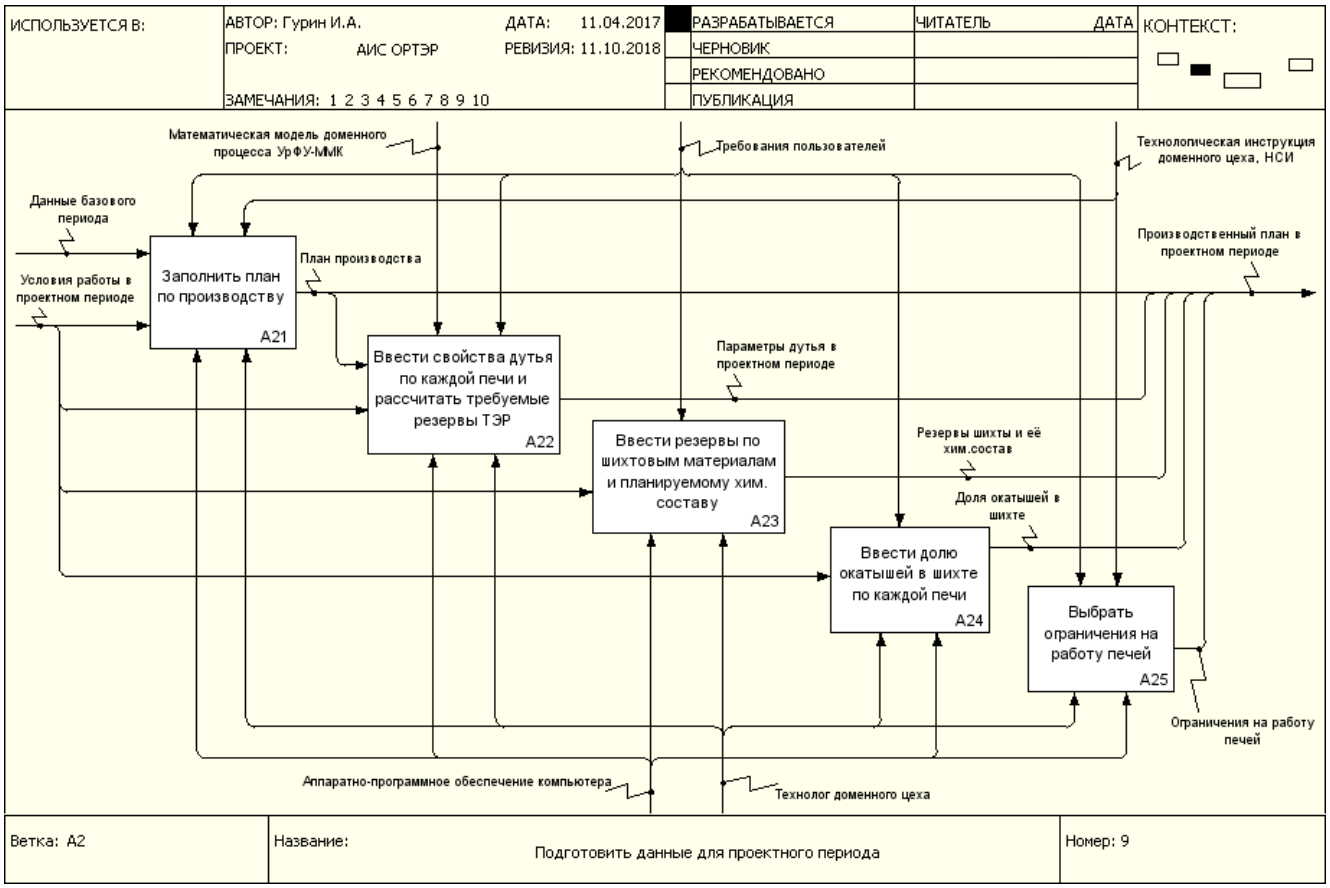


Рисунок 2.7 - Декомпозиція блоку А2 «Підготувати дані для проєктного періоду»

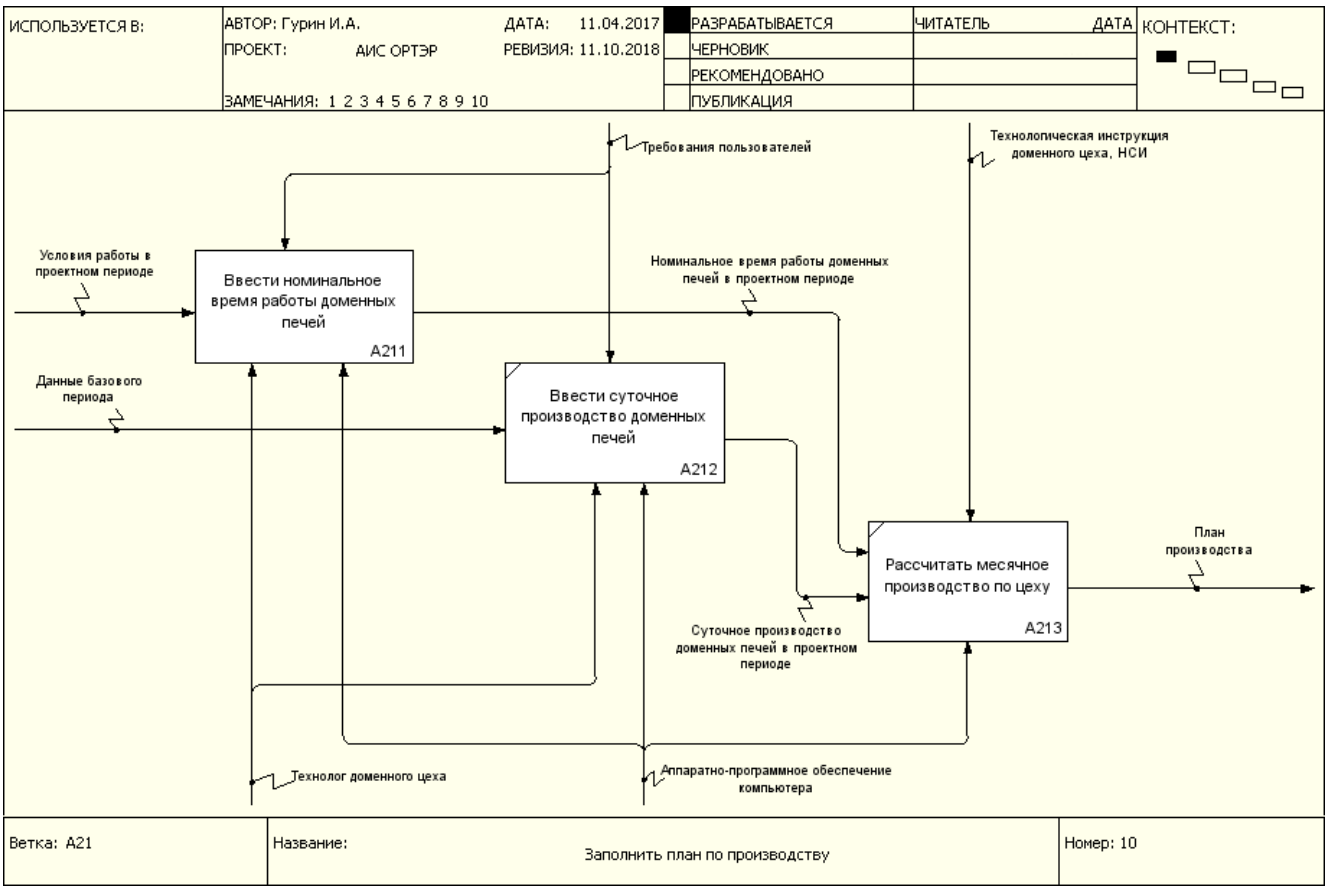
У блоках здійснюються:

- введення характеристик дуття та розрахунок необхідних резервів природного газу та технологічного кисню;

- введення резервів по кожному компоненту шихти, їх хімічних складів та фізичних властивостей;

- введення допустимого діапазону частки котунів у шихті на кожній печі.

Далі здійснюється вибір обмежень на вирішення задачі та завдання діапазонів допустимих значень технологічних показників. Список допустимих обмежень розглянуто у розділі 3.



Рисунорк 2.8 - Декомпозиція блоку А21 «Заповнити план виробництва»

Функція «Вирішити задачу оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів» (А3) є основною. Крім розв'язання задачі лінійного програмування здійснюється оцінка лінійності моделі і, при необхідності, коригування коефіцієнтів впливу. Декомпозиція блоку А3 представлена на рис. 2.9.

Перевірка отриманого рішення включає розрахунок техніко-економічних показників плавки, розрахунок показників теплового, газодинамічного, дуттєвого та шлакового режимів плавки, а також пошук факторів, що лімітують, у разі відсутності рішення завдання. Декомпозиція блоку А34 «Перевірити отримане рішення» представлена на рис. 2.10.

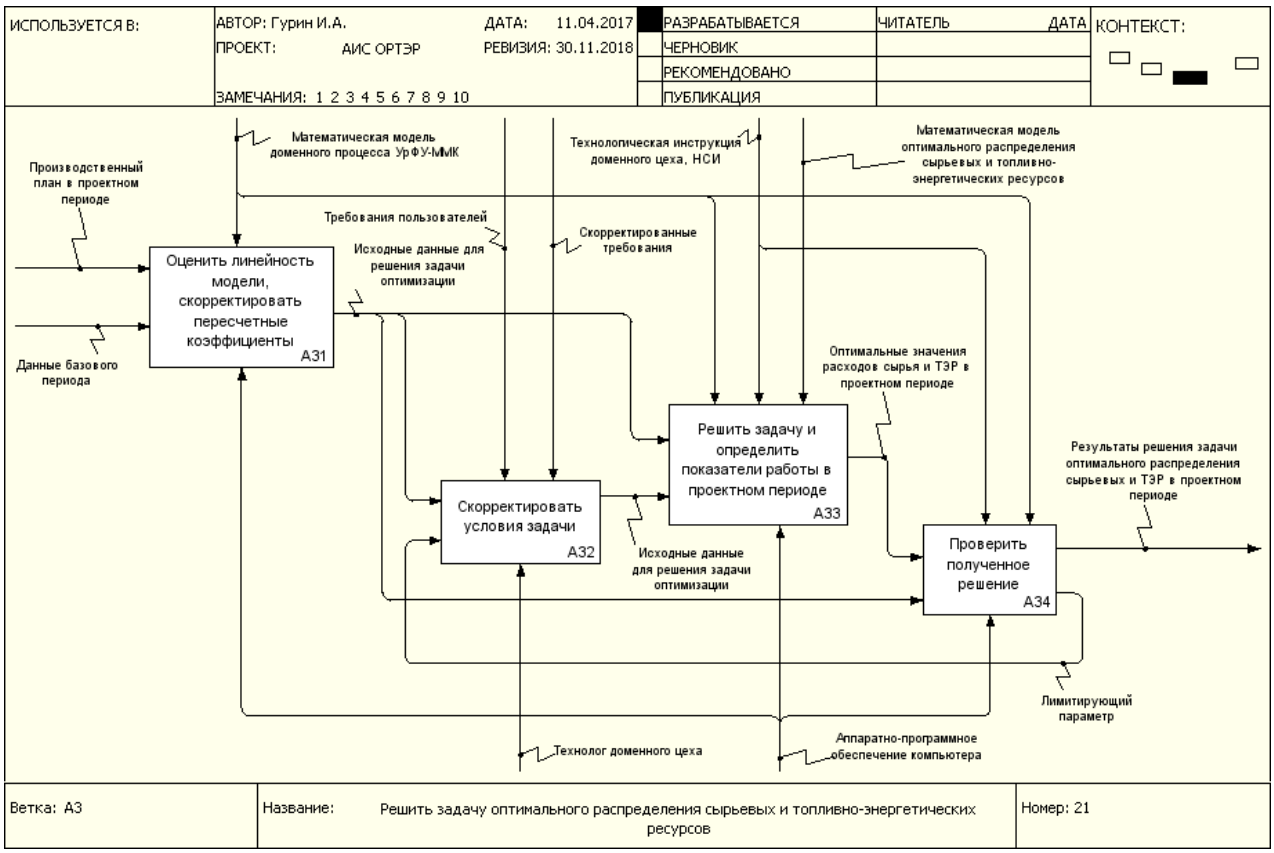


Рисунок 2.9 – Декомпозиція блоку А3 «Вирішити завдання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів»

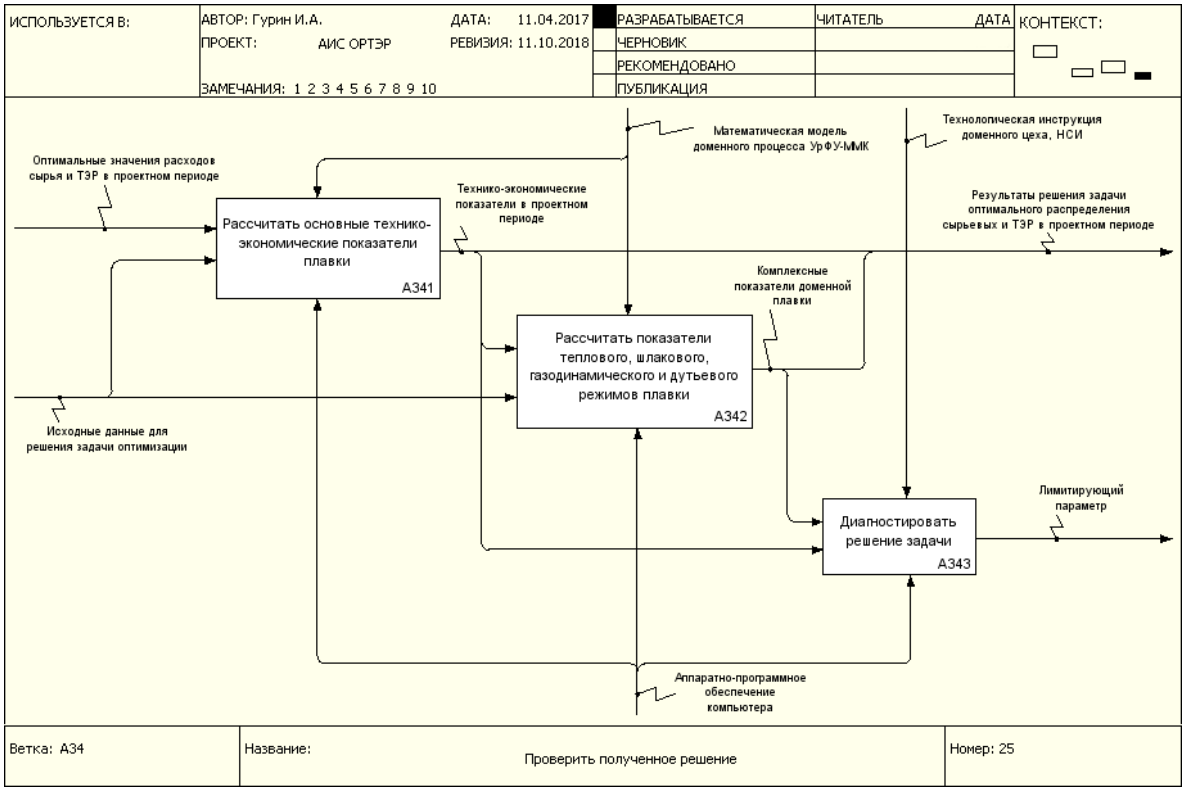


Рисунок 2.10 - Декомпозиція блоку А34 «Перевірити отримане рішення»

Функція «Проаналізувати результати розрахунку та порівняти варіанти» (А4) призначена для перегляду результатів розв'язання задачі у чисельному та графічному вигляді, їх аналізу користувачем системи, для збереження результатів на диск у вигляді звіту у форматах файлів офісного пакета Microsoft Word та Excel, а також для порівняння кількох варіантів розрахунку. При аналізі отриманого рішення завдання вимоги користувачів можуть коригуватися, у разі уточнюються умови роботи у проєктному періоді і область допустимих значень технологічних показників. Декомпозиція блоку А4 представлена на рис. 2.11.

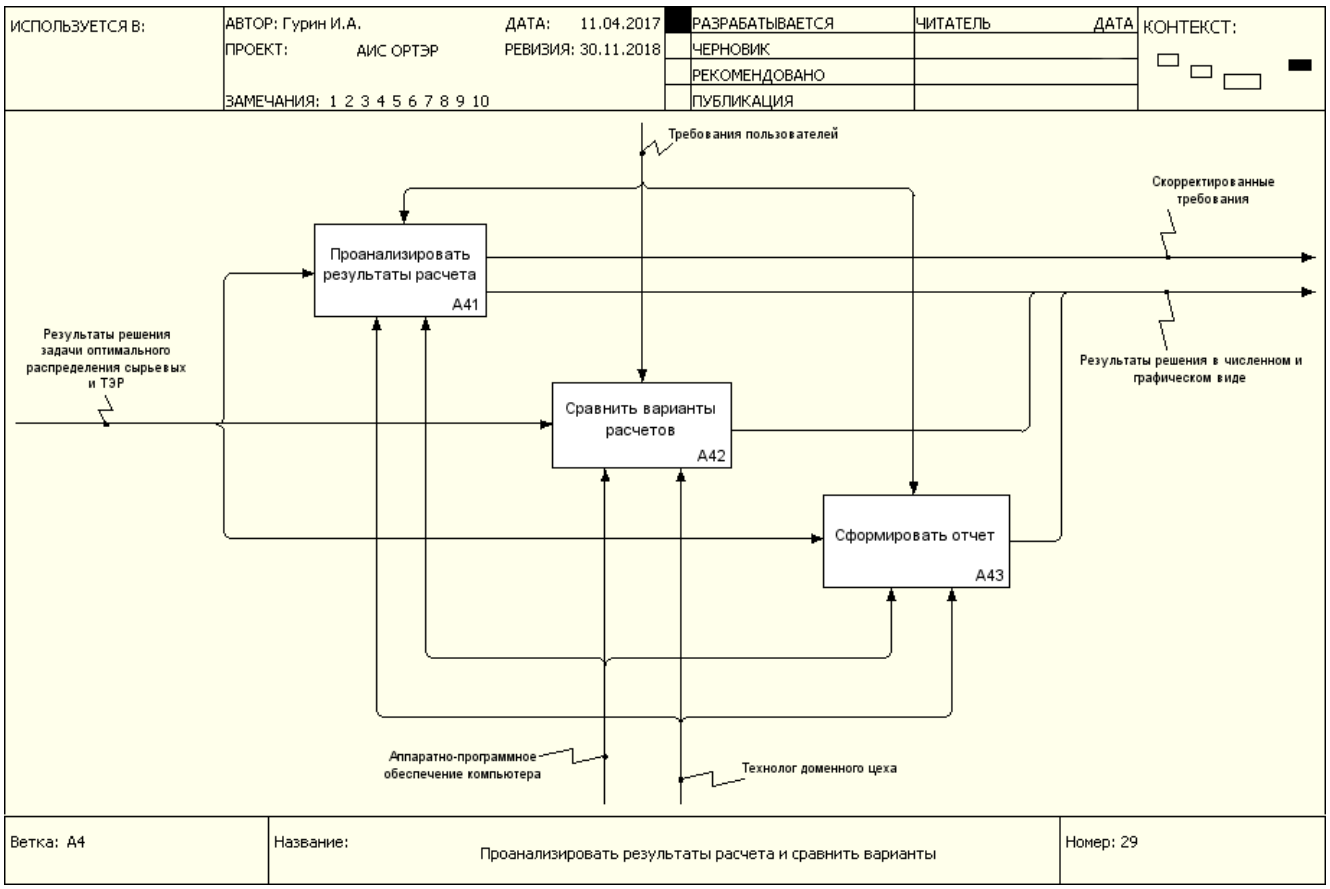


Рисунок 2.11 - Декомпозиція блоку А4 «Проаналізувати результати розрахунку та порівняти варіанти»

2.4 Висновки до розділу 2

1. З використанням системного підходу розроблено структуру алгоритму оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей. Алгоритм призначений для аналізу та прогнозування роботи доменного цеху в умовах зміни кон'юнктури ринку сировини та палива, нестабільності складу та властивостей проплавлюваної залізорудної сировини з метою зниження витрат на доменний переділ та підвищення його енергоефективності.

2. З використанням можливостей методології IDEF0 та з урахуванням вимог інженерно-технологічного та управлінського персоналу розроблено функціональну модель автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху. Модель містить понад 200 блоків на п'яти рівнях декомпозиції, визначає основні функції та взаємозв'язки між окремими функціональними блоками автоматизованої системи, керуючі дії та механізми виконання кожної функції.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І АЛГОРИТМИ РІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ СИРОВИНИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У КОМПЛЕКСІ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

3.1 Математична постановка задачі

Вирішення завдання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей починається з розрахунку комплексу вихідних змінних у базовому періоді. Для цього здійснюється моделювання процесів, що протікають в окремих доменних печах:

- моделювання теплового режиму доменної плавки: оцінюється вплив режимних параметрів на продуктивність печі та питома витрата коксу, здійснюється прогноз хімічного складу рідких продуктів плавки та колошникового газу при зміні властивостей комбінованого дуття та завантажуваних шихтових матеріалів;

- моделювання властивостей кінцевого шлаку: визначення виходу, складу та політерми в'язкості кінцевого шлаку, розрахунок десульфурующей здатності шлаку та вмісту сірки в чавуні;

- моделювання дуттєвого та газодинамічного режимів: оцінка впливу характеристик комбінованого дуття та завантажуваної шихти на розміри фурменного вогнища та перепади тиску в нижній та верхній зонах доменної печі;

- оцінка відновлювальних процесів: розрахунок ступеня прямого та непрямого відновлення оксидів заліза, ступеня використання водню та монооксиду вуглецю.

Отримані дані використовуються для розрахунку коефіцієнтів передачі різними каналами впливів: контрольовані вхідні (у тому числі і керуючі) дії – вихідні змінні, а також показники ефективності та стану. Коефіцієнти передачі визначаються з використанням моделі доменного процесу для кожної доменної печі.

При постановці та вирішенні розглянутої задачі оптимізації враховуються обмеження на наявні запаси окремих компонентів шихти (залізорудних матеріалів, коксу, флюсів), природного газу та технологічного кисню, а також на задане виробництво чавуну на цех загалом:

- За витратою і-го компонента шихти:

$$\sum_{j=1}^{n} \mathrm{X}_{ij} \leq X_{i\Sigma}, \tag{3.1}$$

де n – кількість доменних печей у цеху, шт.;

X_{ij} – витрати i-го компоненту шихти на j-ій печі, т/період;

$X_{i\Sigma}$ – резерви i-го компоненту шихти у проєктному періоде, т/період.

- За витратою природного газу:

$$\sum_{j=1}^{n} V_j^{\text{ПГ}} \leq V_{\Sigma}^{\text{ПГ}}, \tag{3.2}$$

де $V_j^{\text{пг}}$ – витрати природного газу на j-ій печі, м^3/ч;

$V_{\Sigma}^{\text{ПГ}}$ – резерв по расходу природного газа в проєктном периоде, м^3/ч.

- За витратою технологічного кисню:

$$\sum_{j=1}^{n} V_j^{\text{O2}} \leq V_{\Sigma}^{\text{O2}}, \tag{3.3}$$

де V_j^{O2} – витрати технологічного кисню на j-ой печи, м^3/ч;

V_{Σ}^{O2} – резерв за витратою кисню у проєктному періоді, м^3/ч.

- За витратою чавуну:

$$\sum_{j=1}^{n} P_j = P_\Sigma. \quad (3.4)$$

де P_j – завдане виробництво чавуну на j-ій печі, т/добу;

P_Σ – задане виробництво чавуну в доменному цеху, т/добу.

Обмеження керуючих впливів для цеху в цілому, а також для окремих доменних печей представлені на рис. 3.1.

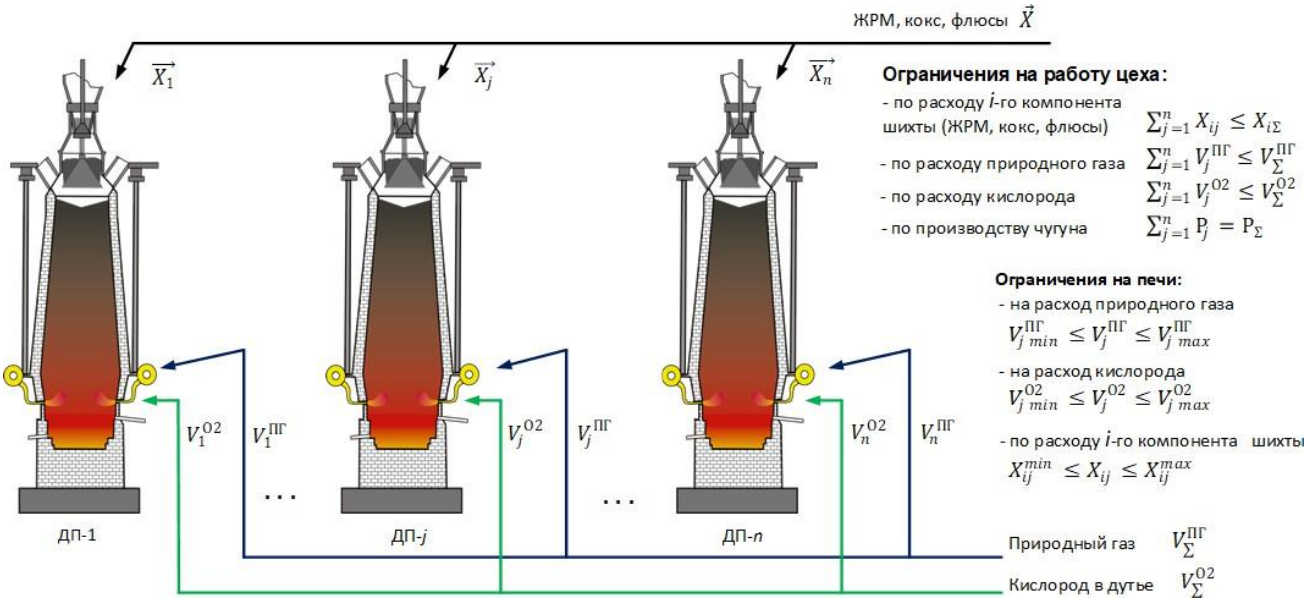


Рисунок 3.1 - Схема формування обмежень на роботу цеху та витрата ресурсів на окремих печах для завдання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей

Нормальний режим роботи доменних печей може бути забезпечений лише за одночасного контролю за показниками теплового стану, шлакового та газодинамічного режимів доменної печі. Оцінка перебігу відновлювальних процесів є основою при розрахунку комплексних показників теплового, шлакового та газодинамічного режимів. При веденні печі значення показників цих режимів накладаються обмеження.

Діапазон значень щодо кожного обмеження вибирається виходячи з технології доменної плавки стосовно конструктивних і режимних параметрів

роботи конкретної печі. Технологічні обмеження доменної плавки на j-ій печі цеху враховуються такими показниками:

- теоретична температура горіння на фурмах, °С:

$$T_j^{min} \le T_j\left(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}\right) \le T_j^{max}, \quad (3.5)$$

де T_j^{min} і T_j^{max} - мінімальна та максимальна теоретична температура горіння у печі, ^{0}С.

- відношення теплоємностей потоків шихти та газу у верхньому ступені теплообміну, од.:

$$m_j^{min} \le m_j(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le m_j^{max}, \quad (3.6)$$

де m_j^{min} і m_j^{max} - мінімальне та максимальне значення відношення теплоємностей потоків шихти та газу у верхньому ступені теплообміну на j-ій печі, од.;

$\overrightarrow{X_j}$ - витрати компонентів залізорудних матеріалів, флюсів на j-ій печі, кг/т чавуну.

- узагальнений показник теплового стану низу печі, МДж/т чавуну:

$$Q_{нj}^{min} \le Q_{нj}(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le Q_{нj}^{max}, \quad (3.7)$$

де $Q_{нj}^{min}$ і $Q_{нj}^{max}$ - мінімальне та максимальне значення узагальненого показника теплового стану низу на j-ій печі, МДж/т чавуну.

- ступінь врівноважування шихти газовим потоком, частка:

$$СУ_j(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le СУ_j^{кр}, \quad (3.8)$$

де $СУ_j^{кр}$ - критичний ступінь врівноваження шихти на j-ій печі, частка.

- швидкість закінчення дуття з фурм, м/с:

$$w_j^{min} \le w_j(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}) \le w_j^{max}, \quad (3.9)$$

де $w_j{}^{min}$ и $w_j{}^{max}$ - мінімальна та максимальна швидкість закінчення дуття з фурм на j-ій печі, м/с.

- в'язкості шлаку при різних температурах, наприклад, при температурі шлаку 1400 °С, Па·с:

$$\eta_{1400j}^{min} \le \eta_{1400j}(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le \eta_{1400j}^{max}, \quad (3.10)$$

де $\eta_{1400j}{}^{min}$ і $\eta_{1400j}{}^{max}$ - мінімальне та максимальне значення в'язкості шлаку при температурі шлаку 1400 °С, Па·с;

- допустимі межі основ шлаку, наприклад, $B_2 = CaO/SiO_2$, од.:

$$B_{2j}^{min} \le B_{2j}(V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le B_{2j}^{max}, \quad (3.11)$$

де $B_{2j}{}^{min}$ і $B_{2j}{}^{max}$ - мінімальне та максимальне значення основності шлаку $B2$ на j-ій печі, од.

- градієнти в'язкості шлаку в діапазоні в'язкості шлаку від 25 до 7 пуаз, у межах температури шлаку 1400-1500 °С, Па·с/°С:

$$(\Delta\eta_7^{25})_j\ (V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le (\Delta\eta_7^{25})_j^{max} \quad (3.12а)$$

$$\left(\Delta\eta_{1400}^{1500}\right)_j\ (V_j^{ПГ}, V_j^{O2}, \overrightarrow{X_j}) \le \left(\Delta\eta_{1400}^{1500}\right)_j^{max} \quad (3.12б)$$

де $(\Delta\eta_7{}^{25})_j{}^{max}$ – максимальне значення градієнту в'язкости шлаку в діапазоні в'язкості шлаку від 25 до 7 пуаз на j-ій печі, Па·с/°С;

$(\Delta\eta_{1400}{}^{1500})_j^{max}$ – максимальне значення градієнту в'язкости шлаку в межах температури шлаку 1400-1500) ^{0}C на j-ій печі, Па·с/°С.

- частка окатишів у залізорудній частині шихти, частки:

$$R_j^{min} \le R_j(\overrightarrow{X_j}) \le R_j^{max}, \quad (3.13)$$

де $R_j{}^{min}$ і $R_j{}^{max}$ - мінімальне та максимальне значення частки окатишів у залізорудній частині шихти на j-ій печі, частки.

- вміст сірки, кремнію та марганцю в чавуні, %:

$$[S]_j^{min} \le [S]_j \le [S]_j^{max}, \quad (3.14а)$$

$$[Si]_j^{min} \le [Si]_j \le [Si]_j^{max}, \quad (3.14б)$$

$$[Mn]_j^{min} \le [Mn]_j \le [Mn]_j^{max}, \quad (3.14в)$$

де $[S]_j{}^{min}$, $[Si]_j{}^{min}$ і $[Mn]_j{}^{min}$ – мінімальне значення вмісту сірки, кремнію та марганцю в чавуні, %;

$[S]_j{}^{max}$, $[Si]_j{}^{max}$ і $[Mn]_j{}^{max}$ - максимальне значення вмісту сірки, кремнію та марганцю в чавуні, %.

Гранично допустимі значення величин визначаються методом математичного моделювання, а за неможливості визначення за моделлю – методом експертних оцінок, що дозволяє здійснювати налаштування моделі на реальний процес, у тому числі шляхом формалізації досвіду технологічного персоналу. Дані обмеження забезпечують отримання чавуну необхідного хімічного складу, стабілізацію газодинамічного режиму за рахунок рівного сходження шихтових матеріалів, підтримання в допустимих межах теплового стану в нижньому та верхньому щаблях теплообміну. Досягаються також високі техніко-економічні показники за рахунок кращого використання

відновлювального потенціалу CO та H2, повної конверсії природного газу в районі фурменних факелів.

Розглянемо математичне забезпечення розрахунку показників, що використовуються у моделі системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей.

3.2 Математичне забезпечення розрахунку показників, що характеризують тепловий, шлаковий та газодинамічний режими доменної плавки

3.2.1 Тепловий режим доменної плавки

При моделюванні теплового стану доменної печі визначається комплекс показників, які дозволяють оцінити вплив вхідних величин на продуктивність печі та питому витрату коксу. Також моделювання цього режиму дозволяє спрогнозувати зміну хімічного складу продуктів плавки при зміні складу і властивостей шихтових матеріалів, що завантажуються, і комбінованого дуття.
При моделюванні теплового стану доменної печі використовується натурно-модельний підхід та концепція двоступеневого розвитку процесів теплообміну у доменній печі, запропонована професором Б. І. Китаєвим [43, 44]. Відповідно до цієї концепції, теплообмін між потоками шихти і газу доменної печі здійснюється послідовно в двох зонах (верхній і нижній), які розділені зоною уповільненого теплообміну. При цьому вважається, що верхня теплова зона визначає інтенсивність розвитку процесів непрямого відновлення, а нижня визначає витрати тепла на пряме відновлення заліза та домішок, а також фізичне нагрівання чавуну та шлаку. Характер температурного поля визначається співвідношенням теплоємностей потоків шихти та газів. Під теплоємністю потоку W розуміється добуток витрати потоків шихти або газу на питому теплоємність речовини потоку:

$$W_{\text{м}} = G_{\text{м}} c_{\text{м}}, \tag{3.15}$$

$$W_{\text{г}} = G_{\text{г}} c_{\text{г}}, \tag{3.16}$$

де $G_{\text{М}}$ и $G_{\text{Г}}$ – витрата потоку шихти та газу, кг/с;

$c_{\text{М}}$ и $c_{\text{Г}}$ – питома теплоємність речовини потоку, Дж/(кг·^{0}С).

Зона уповільненого теплообміну, що розділяє зони активного теплообміну, характеризується відношенням теплоємностей потоків шихти та газу:

$$m = \frac{W_{\text{М}}}{W_{\text{Г}}} \approx 1,$$

верхній ступінь теплообміну має $m < 1$, а нижня $m > 1$ [43, 44].

Для забезпечення нормального теплового стану шахти доменної печі модель оптимального розподілу ресурсів вводиться обмеження на відношення теплоємностей потоків шихти і газу в шахті печі. У цьому наявність верхньої щаблі теплообміну має зберігатися, т.к. її наявність є невід'ємним атрибутом, що забезпечує стійкість перебігу доменного процесу та економічності плавки.

Для оцінки теплового стану низу печі використовується узагальнений показник теплового стану низу доменної печі:

$$Q_{\text{р}} = \frac{q_{\text{г}}}{P} + Q_{\text{ш}} - 31750[Fe]r_d - Q_{\text{ф}} - Q_{\text{п}}, \tag{3.17}$$

де $q_{\text{Г}}$ – корисна теплова потужність газового потоку, яка враховує фізичне тепло дуття, тепло горіння вуглецю до монооксиду вуглецю, тепло, витрачене на конверсію природного газу і дисоціацію водяної пари, втрати тепла з газовим потоком, що залишає нижню зону печі, кДж/хв;

P – продуктивність печі (інтенсивність плавки), т/хв;

$Q_{\text{Ш}}$ – кількість тепла, що надходить до нижньої зони печі з шихтою при температурі $t_{ш0}$, кДж/т чугуна;

r_d – ступінь прямого відновлення заліза, од.;

31750 - тепловий ефект реакції прямого відновлення заліза, кДж/т чавуну;

$[Fe]$ – вміст заліза у чавуні, %;

$Q_{\text{ф}}$ – витрати тепла на розкладання флюсів, кДж/т чавуну;

$Q_{\text{п}}$ - теплові втрати у навколишнє середовище через фурмовий пояс, розпар та заплічники, кДж/т чавуну.

Розрахунок узагальненого показника теплового стану низу доменної печі виконується із залученням технологічної інформації про процес, при цьому теплові втрати можуть бути розраховані в порівнянні з показником оптимальних витрат тепла на виплавку 1 тонни чавуну цього складу:

$$Q_{\text{опт}} = \sum_{i=1}^{n} q_i [X]_i + \text{c}_{\text{ч}} t_{\text{ч}} + \text{c}_{\text{ш}} t_{\text{ш}} U, \qquad (3.18)$$

де q_i – тепловий ефект реакції відновлення і-го елемента, кДж/10 кг елементу;

$[X]_i$ – вміст і-го елемента (кремній, марганець та ін.) у чавуні, %;

$\text{c}_{\text{ч}}$ і $\text{c}_{\text{Ш}}$ – теплоємність чавуну та шлаку, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{ч}}$ і $t_{\text{Ш}}$ – температура чавуну і шлаку, °С;

U – вихід шлака, т/т чавуну.

Як один з розрахункових комплексних показників теплового режиму доменної плавки використовується теоретична температура горіння [18].

Нормальний технологічний режим доменної плавки можливий за умови встановлення певних значень теоретичної температури горіння в межах 1850-2300 ^{0}С. При зменшенні цієї температури нижче 1850 ^{0}С виявляються всі характерні ознаки холодного ходу плавки і, навпаки, при перевищенні значення понад 2300 ^{0}С, з'являються ознаки розігріву низу печі.

Розглянемо алгоритм розрахунку теоретичної температури горіння, що використовується в моделі. На першому етапі визначається витрата дуття, необхідна для спалювання 1 кг вуглецю коксу:

$$V_{д}^{к} = \frac{0{,}9333}{0{,}01 \cdot \omega + 0{,}00124 \cdot f}, \quad (3.19)$$

де ω – вміст кисню у дутті, %;

f – вологість дуття, г/м^3.

Витрата дуття для конверсії 1 м^3 природного газу дорівнює:

$$V_{д}^{пг} = \frac{0{,}5}{0{,}01 \cdot \omega + 0{,}00124 \cdot f}. \quad (3.20)$$

Вихід фурменного газу з розрахунку на 1 кг вуглецю коксу, що згорає у фурм, м^3/кг:

$$V_{г}^{к} = 1{,}8667 + V_{д}^{к}(1 - 0{,}01 \cdot \omega + 0{,}00124 \cdot f). \quad (3.21)$$

Вихід фурменного газу на 1 м3 природного газу, що конвертується, м^3/м^3:

$$V_{г}^{пг} = 3 + V_{д}^{пг}(1 - 0{,}01 \cdot \omega + 0{,}00124 \cdot f). \quad (3.22)$$

Тепловміст гарячого дуття за вирахуванням теплоти розкладання вологи дуття, кДж/м^3:

$$i_{д} = c_0 \cdot t_{д} - 0{,}00124 \cdot f\left(10800 - c_{H_2O} \cdot t_{д}\right), \quad (3.23)$$

де $t_Д$ – температура гарячого дуття, °С;

c_0 – теплоємність двоатомних газів, кДж/(м^3·К);

c_{H_2O} – теплоємність парів води при температурі дуття, кДж/(м^3·К).

При цьому теплоємність двоатомних газів (CO, N_2, O_2) та теплоємність парів води при температурі гарячого дуття визначаються за такими рівняннями:

$$c_0 = 1{,}2897 + 0{,}000121 \cdot t_д, \quad (3.24)$$

$$c_{H_2O} = 1{,}4560 + 0{,}000282 \cdot t_д. \quad (3.25)$$

Далі визначається теплозміст шматків коксу, що прийшов до фурм, кДж/кг:

$$i_к = c_к \cdot t_к, \quad (3.26)$$

де $c_к$ – теплоємність коксу, кДж/(кг·К) (приймається рівною 1,65 кДж/(кг·К));

$t_к$ – температура коксу, що прийшов до фурм, ^{0}С (приймається 1500 °С).

Тепловміст горнових газів, кДж/(м^3·К):

$$W_г = \frac{W_c + V_д^к \cdot i_д + i_c + \sigma(W_s + V_д^{пг} \cdot i_д)}{V_г^К + \sigma \cdot V_г^{пг}}, \quad (3.27)$$

де W_C - теплота неповного горіння вуглецю коксу, кДж/кг (приймається 9800 Дж/кг);

W_S - теплота конверсії природного газу, кДж/м3 (приймається 1500 кДж/м^3);

σ – витрата природного газу в розрахунку на 1 кг вуглецю коксу, що згорає у фурм, м^3/кг.

За знайденим значенням тепломістку горнових газів визначається значення теоретичної температури горіння (в інтервалі температур 1850-2300 ^{0}С):

$$t_{\text{Т}} = 165 + 0{,}6113 \cdot W_{\text{Г}}. \quad (3.28)$$

3.2.2 Шлаковий режим доменної плавки

Шлаковий режим доменної плавки значною мірою визначає техніко-економічні показники роботи печі – питома витрата коксу та продуктивність. Склад шлаку та його властивості впливають на газодинамічні, теплові та відновлювальні процеси в доменній печі.

Тому метою моделювання шлакового режиму є отримання шлаку, характеристики якого забезпечують нормальне протікання всіх процесів доменної печі починаючи зі стадії розм'якшення, подальшої фільтрації первинного шлакового розплаву в коксовій насадці і закінчуючи отриманням кінцевого шлакового розплаву, а також отримання чавуну необхідного.

Алгоритм моделювання шлакового режиму доменної плавки представлений на рис. 3.2 і включає блоки:

- визначення виходу та складу шлаку.

- визначення політерми в'язкості шлаку.

- визначення температур початку та кінця розм'якшення залізорудних матеріалів, товщини зони когезії.

- визначення десульфуруючей здатності шлаку та вмісту сірки в чавуні.

- діагностика шлакового режиму.

Кінцевий доменний шлак характеризується тим, що сума оксидів кальцію, кремнію та алюмінію складає зазвичай 80-90 % маси і саме ці оксиди значною мірою визначають основні властивості шлаку – його температуру плавлення, в'язкість, щільність, поверхневий натяг, сіркопоглинальну здатність та інші.

Однією з найважливіших характеристик шлаку його основність. Під основністю розуміють відношення мас основних оксидів до кислих:

$$B = \frac{CaO + MgO + MnO + FeO}{SiO_2 + Al_2O_3}, \quad (3.29)$$

де CaO, MgO, MnO, FeO та ін – вміст відповідних оксидів у шлаку, %.

Вміст монооксиду заліза (FeO) при нормальному режимі плавки зазвичай становить трохи більше 0,2-0,6 %. Це з дуже високим ступенем переходу заліза в чавун – понад 99 %. Через низький вміст оксидів заліза та оксидів марганцю для характеристики основності шлаку використовуються рівняння:

$$B_0 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}, \quad (3.29а)$$

$$B_1 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2}, \quad (3.29б)$$

$$B_2 = \frac{CaO}{SiO_2}. \quad (3.29в)$$

З основністю шлаку тісно пов'язана його інша характеристика - в'язкість. В'язкість будь-якої рідини, у тому числі шлаку, обумовлена внутрішнім тертям. Розрізняють динамічну в'язкість η та кінематичну ν. Ці два показники пов'язані між собою через густину шлаку ρ:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (3.30)$$

Для нормального шлакового режиму плавки динамічна в'язкість шлаку повинна бути в межах 0,30-0,65 Па·с або 3-6,5 пуаз [5, 10, 44]. В'язкість шлаку залежить від багатьох факторів, у тому числі від температури:

$$\eta = A \cdot \exp\left(\frac{E_\eta}{RT}\right), \quad (3.31)$$

де E_η – енергія активації в'язкої течії, кДж/моль;

Т – температура шлаку, °С;

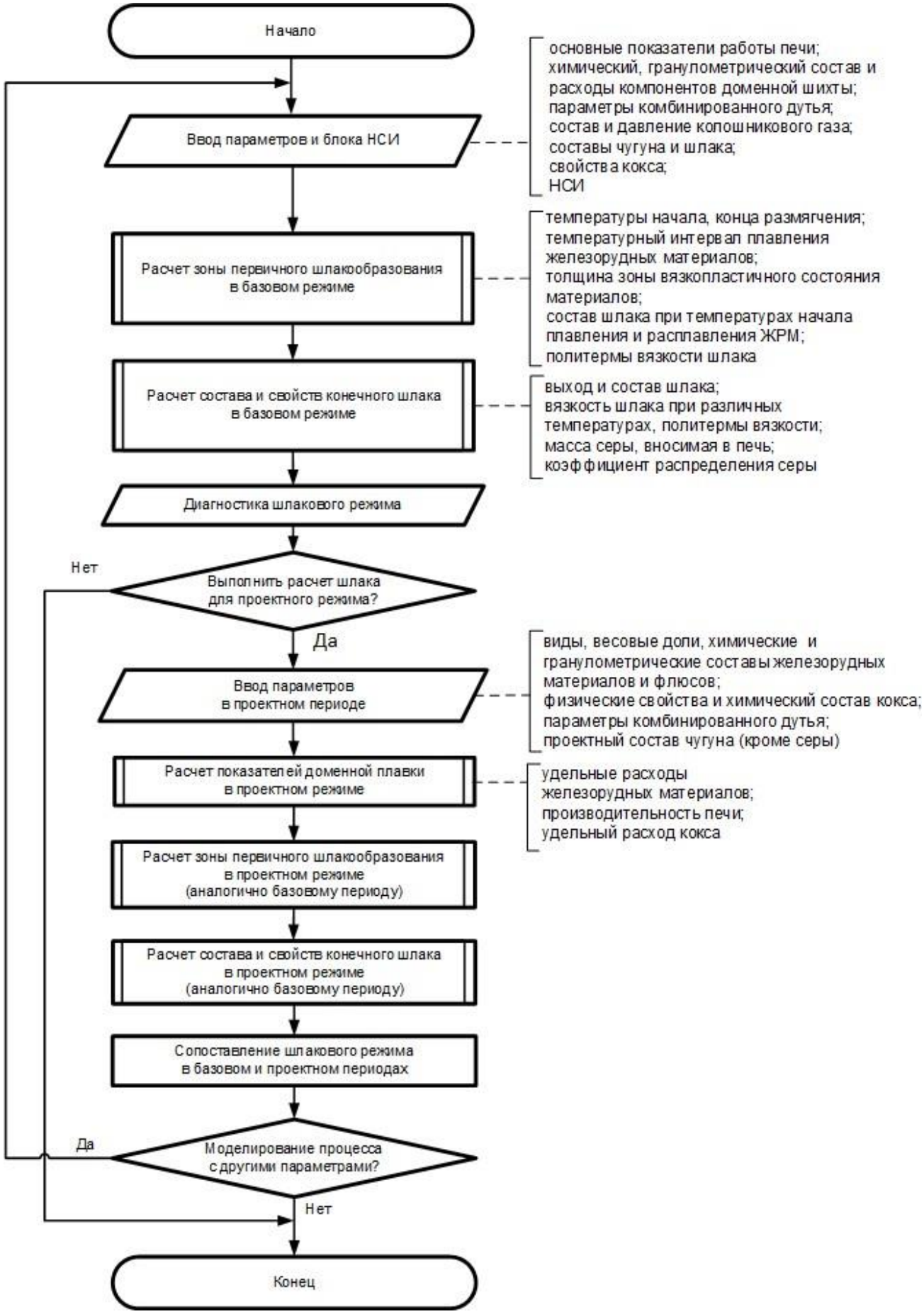


Рисунок 3.2 – Алгоритм розрахунку показників шлакового режиму

A – константа (залежить від природи шлаку);

R – газова стала, кДж/(моль·К).

Одні оксиди при доменній плавці повністю переходять у шлак (CaO, MgO, Al_2O_3), інші – у переважній масі (SiO_2, TiO_2) і, нарешті, легковідновлювані оксиди заліза, марганцю та ін переходять у шлак у невеликій кількості. В основі розрахунку виходу та складу шлаку (вміст у шлаку CaO, SiO_2, Al_2O_3, MnO, MgO, TiO_2) лежать рівняння матеріальних балансів основних хімічних елементів та їх сполук.

В основі аналітичного розрахунку в'язкості шлаку лежать діаграми шлакової системи CaO - SiO_2 - Al_2O_3 - MgO при температурах 1400 і 1500 ^{0}C в області реальних значень доменних шлаків і відома залежність в'язкості гомогенних шлакових розплавів від температури.

Для технологів, що ведуть доменну плавку, необхідно знати не тільки чисельні значення в'язкості при фіксованих температурах, наприклад, 1400 і 1500 ^{0}C, але характер залежності в'язкості від температури в діапазоні 1350-1550 ^{0}C.

При виконанні дослідження використано рівняння Ле-Шательє, що дозволяє знаходити вигляд політерми в'язкості:

$$lg(lg(\eta)) = a_0 + a_1 \cdot t_{\text{шл}}, \tag{3.32}$$

де a_0, a_1 – коефіцієнти (апріорно невідомі);

$t_{\text{Шл}}$ – температура шлаку.

При відомих значеннях в'язкості шлаку конкретного складу при температурах 1400 і 1500 ^{0}C, вирішуючи систему рівнянь виду (3.32), можна знайти чисельні значення коефіцієнтів a_0 і a_1, а по них отримати функціональну залежність в'язкості шлаку від його температури.

Відомо, що розплав із коксової насадки починає витікати, коли його в'язкість досягає 2,5 Па·с. У зв'язку з цим за умовну температуру плавлення

шлаку прийнято температуру, при якій шлак має в'язкість 2,5 Па·с. Температура плавлення шлаку перебуває за рівнянням:

$$t_{\text{пл}} = \frac{lglg25 - a_0}{a_1}. \quad (3.33)$$

Однією з найважливіших характеристик шлакового режиму є стійкість шлакових систем. За зміною в'язкості залежно від його хімічного складу шлаки поділяються на «стійкі» та «нестійкі».

«Стійкі» при зміні складу мало змінюють свою в'язкість, а «нестійкі» при невеликій зміні хімічного складу швидко змінюють свою плинність.

Шлаки зміни в'язкості в залежності від температури поділяються на «довгі» та «короткі». Для «коротких» шлаків, на відміну від «довгих», характерною є різка зміна в'язкості при незначних коливаннях температури шлаку. Для оцінки стійкості шлаку моделі використовується показник – градієнт в'язкості шлаку, чисельно рівний зменшенню в'язкості шлаку зі збільшенням температури шлаку на 1 ^{0}C діапазоні в'язкості шлаку від 25 до 7 пуаз:

$$\Delta\eta_7^{25}/_{\Delta t} = \frac{25 - 7}{t_{\text{шл}}^7 - t_{\text{шл}}^{25}}. \quad (3.34)$$

Градієнт в'язкості шлаку поряд з допустимими при різних температурах шлаку діапазонами в'язкості шлаку використовується при моделюванні шлакового режиму як обмежуючий фактор. У цьому вибір граничних значень кожного з діапазонів і градієнта в'язкості здійснюється шляхом експертного оцінювання. Так, для умов роботи доменних печей прийнято такі обмеження:

- якщо в'язкість шлаку при температурі 1450 ^{0}C знаходиться в межах 5,5-7,0 пуаз, то шлак характеризується підвищеною в'язкістю в області робочих температур;

- якщо в'язкість шлаку за нормальної температури 1450 ^{0}C перевищує 7 пуаз, то області робочих температур вона перевищує допустимі межі для нормального режиму плавки;

- якщо в'язкість шлаку при температурі 1450 ^{0}C менше 2 пуаз, то шлак характеризується малою в'язкістю, має високу агресивність до вогнетривкої кладки і руйнує гарнісаж;

- якщо градієнт в'язкості в діапазоні в'язкості шлаку 25-7 пуаз перевищує 0,35 пуаз/^{0}C, шлак відноситься до типу «коротких». У цьому випадку можливе захаращення горна, утворення настилів або застигання шлаку в жолобах. Нормальний режим доменної плавки утруднений.

Одним із завдань, покладених на доменний шлак, є переведення сірки з чавуну в шлак. Показником, що характеризує сіркопоглинальну здатність шлаку, є коефіцієнт розподілу сірки між чавуном і шлаком:

$$L_S = \frac{(S)}{[S]}, \tag{3.35}$$

де (S) – вміст сірки у шлаку, %;

$[S]$ – вміст сірки в чавуні, %.

Чим вище значення L_S, тим ефективніше виконує свою роль шлак, як десульфуратор.

Значення коефіцієнта розподілу сірки визначається основністю шлаку та температурою шлаку. У моделі оптимального розподілу ресурсів передбачено завдання допустимого вмісту сірки у чавуні.

3.2.3 Газодинамічний та дуттєвий режими доменної плавки

При моделюванні газодинамічного режиму використовується натурно-модельний підхід, оскільки вплив характеристик комбінованого дуття та завантажуваної шихти на газодинаміку доменної печі визначається величезною кількістю змінних, у тому числі неконтрольованих.

Розрахунок газодинамічного режиму дозволяє оцінювати вплив характеристик комбінованого дуття і шихти, що завантажується, на перепади тиску в окремих зонах доменної печі, оцінювати ступінь наближення шару шихти до критичного стану (тугий хід, підвисання та інші порушення рівного сходу шихти). Така оцінка проводиться за рівнем врівноваження шару шихти газом як зверху печі, і у зоні шлакоутворення.

Розрахунок значення ступеня врівноважування шихти газовим потоком з урахуванням втрат напору під час проходження дуття через фурми виконується так:

$$СУ_{общ} = \frac{10 \cdot (Р_д - Р_{к.г.} - \Delta Р_{пот})}{Н_0 \cdot \gamma_н^ш}, \quad (3.36)$$

де $Р_Д$ и $Р_{К.Г.}$ – тиск дуття і тиск колошникового газу, ат;

$Н_0$ – корисна висота доменної печі, м;

$\gamma_н^ш$ – насипна маса шихти, т/м^3.

Насипна маса шихти визначається за рівнянням:

$$\gamma_н^ш = Р_ш^\Sigma \Big/ V_ш^\Sigma, \quad (3.37)$$

де $Р_ш^\Sigma$ - маса шихтових матеріалів отримання 1 т чавуну, т/т чавуну;

$V_ш^\Sigma$ - обсяг шихтових матеріалів отримання 1 т чавуну, мЗ/т чавуну.

Маса шихтових матеріалів отримання 1 т чавуну визначається сумою питомих витрат основних компонентів - агломерату, котунів і коксу:

$$Р_ш^\Sigma = Р_{агл} + Р_{ок} + k, \quad (3.38)$$

де $Р_{агл}$ - питома витрата агломерату, т/т чавуну;

$Р_{ок}$ - питома витрата котунів, т/т чавуну;

k - питома витрата коксу, т/т чавуну.

Об'єм шихтових матеріалів на отримання 1 т чавуну знаходиться за питомими витратами компонентів шихти та довідковими даними про насипну масу агломерату, котунів та коксу, визначається рівнянням:

$$V_{ш}^{\Sigma} = \frac{P_{агл}}{\gamma_{н}^{агл}} + \frac{P_{ок}}{\gamma_{н}^{ок}} + \frac{k}{\gamma_{н}^{к}}, \quad (3.39)$$

де $\gamma_{н}^{агл}$, $\gamma_{н}^{ок}$ і $\gamma_{н}^{к}$ – насипні маси агломерату, котунів та коксу, т/м^3.

Максимальне значення загального ступеня врівноваження шихти для доменних печей становить 55%, що підтверджується практикою ведення доменної плавки. Крім загального ступеня врівноважування, у моделі передбачена оцінка окремо ступеня врівноважування у верхній та нижній частинах печі:

$$СУ_{низ} = \frac{10 \cdot (P_{д} - P_{к.г.} - \Delta P_{пот})}{H_{низ} \cdot \gamma_{н}^{ш}}, \quad (3.40)$$

$$СУ_{верх} = \frac{10 \cdot (\Delta P_{верх})}{(H_{0} - H_{низ}) \cdot \gamma_{н}^{ш}}, \quad (3.41)$$

де $H_{низ}$ – відстань від рівня фурм до горизонту отвору в шахті печі для вимірювання статичного тиску, м;

$\Delta P_{верх}$ - верхній перепад тиску, ат.

Розрахунок дуттєвого режиму дозволяє оцінити розміри фурменного осередку (розміри кисневої та вуглекислотної зон горіння). Його розміри істотно впливають практично на всі процеси, що відбуваються в доменній печі. Оптимальні значення розмірів вогнища фурмену визначаються як результат тривалого аналізу роботи доменних печей. Наприклад, для доменних печей малого обсягу найкращі показники роботи печі досягаються за умови, коли

площа вогнищ фурмену становить 30-35 % площі горна печі. Важливим показником при розрахунку дуттєвого режиму є швидкість дуття з фурм:

$$W_{\text{ист}} = \frac{\left(0{,}95 \cdot Q_{\text{д}} + \frac{V_{\text{пг}} \cdot \text{Р}}{1440}\right) \cdot (t_{\text{д}} + 273) \cdot 77{,}73}{n \cdot d_{\text{ф}}^2 (1 + \text{Р}_{\text{д}})}, \quad (3.42)$$

де $Q_{\text{Д}}$ - хвилинна витрата дуття, м3/хв;

$t_{\text{Д}}$ - температура гарячего дуття, °С;

$V_{\text{ПГ}}$ - витрата природного газу, м3/т чавуну;

Р - продуктивність печі, т/сут;

n - кількість працюючих повітряних фурм, шт.;

$d_{\text{ф}}$ - діаметр повітряних фурм, мм.

У моделі оптимізації вибору паливно-енергетичних ресурсів передбачено завдання обмеження на швидкість дуття з фурм. При низькій швидкості закінчення дуття з фурм перед фурмами формується зона горіння малої протяжності, що зумовлює відхилення від нормального режиму доменної плавки. Розвивається периферійний газовий потік, що зрештою призводить до великих теплових втрат, зниження відновлювальної здатності газу та формування «непродувного» шару в центрі печі. Максимальна швидкість закінчення дуття обмежується газодинамічної характеристикою повітродувної машини і пояснюється квадратичним підвищенням втрат напору дуття на тракті підведення його до печі зі збільшенням витрати дуття. Особливо важливо зважати на це обмеження, коли закриваються одна або кілька фурм доменної печі.

3.2.4 Розрахунок коефіцієнтів лінеаризованої моделі

На цьому етапі здійснюється розрахунок коефіцієнтів лінеаризованої моделі. При натурно-модельному підході оцінка прогнозних значень вихідних змінних виходить в результаті вирішення лінеаризованих балансових

співвідношень шляхом розкладання скалярної функції Y декількох змінних x = (x_1, …, x_i, …, x_n) на інтервалі Δx = (Δx_1, …, Δx_i, …, Δx_n) x_0 = (x_{10}, …, x_{i0}, …, x_{n0}), характерною для базового стану, у ряд Тейлора і в наступному обліку тільки перших членів цього ряду по кожному з аргументів:

$$Y(x) = Y(x_0) + \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial Y}{\partial x_i}(x_i - x_{i0}) \tag{3.43}$$

Рівняння (3.43) можна записати у вигляді:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^{n} k_i \Delta x_i. \tag{3.44}$$

де Δx_i – відхилення i-ої змінної процесу x_i від її базового значення x_{i0}.

Використання лінеаризованих залежностей та принципу адитивності окремих режимних параметрів дозволяє аналізувати лише відносно невеликі відхилення змінних від їхнього базового рівня.

Розглянемо як приклад розрахунок коефіцієнтів необхідної зміни маси коксу в подачі за зміни умов плавки. Розрахунок ґрунтується на використанні теплових балансів окремих зон або печі в цілому [18].

Збільшення температури гарячого дуття на 10 ^{0}C знижує витрату коксу, кг/т чавуну:

$$\Delta k_1 = -\frac{0{,}01 \cdot Q_{\text{нд}}}{0{,}01 \cdot q_{c_\Phi} \cdot \text{C}_\Phi} \tag{3.45}$$

або у %

$$\Delta k_1\ \% = \left(\frac{\Delta k_1}{k \cdot 1000}\right) \cdot 100, \qquad (3.46)$$

де $C_ф$ – кількість вуглецю коксу, що згорає у фурм, кг/т чавуну;

$q_{C_Ф}$ – тепловий ефект реакції горіння коксу, кДж/кг;

$Q_{нд}$ – кількість тепла, що вноситься нагрітим дуттям, кДж/кг.

Зниження ступеня прямого відновлення оксидів заліза на 0,01 призводить до зниження питомої витрати коксу, кг/т чавуну:

$$\Delta k_2 = -\frac{10 \cdot [Fe] \cdot 27{,}16}{0{,}01 \cdot q_{C_Ф} \cdot C_ф}. \qquad (3.47)$$

Виведення з шихти 10 кг/т чавуну кварциту призводить до економії коксу, кг/т чавуну:

$$\Delta k_3 = -\frac{18900}{0{,}01 \cdot q_{C_Ф} \cdot C_ф}. \qquad (3.48)$$

Зниження вмісту кремнію в чавуні на 0,1% призводить до зниження витрати коксу, кг/т чавуну:

$$\Delta k_4 = -\frac{22600}{0{,}01 \cdot q_{C_Ф} \cdot C_ф}. \qquad (3.49)$$

Розрахунок коефіцієнтів впливу інших змінних на витрату коксу здійснюється аналогічно з використанням даних балансової моделі доменного процесу.

Інший набір коефіцієнтів враховує вплив вхідних змінних зміну продуктивності доменної печі.

Розглянемо алгоритм розрахунку поправки на продуктивність печі зі збільшенням вмісту кисню у повітряному дутті на 1%. Форсування плавки дмухом лімітується газодинамічних обмежень, при перевищенні певної витрати дуття настає підвисання шихти в печі. Тому при збагаченні дуття киснем через скорочення обсягу газів з'являється можливість подальшого форсування плавки дмухом зі зростанням продуктивності печі.

Спочатку розраховується витрата дуття для спалювання 1 кг вуглецю коксу в базовому та прогнозному періодах:

$$V_д^{к.Б} = \frac{0{,}9333}{0{,}01 \cdot \omega^Б + 0{,}00062 \cdot (f_1 + f_2)}, \quad (3.50)$$

$$V_д^{к.П} = \frac{0{,}9333}{0{,}01 \cdot (\omega^Б + 1) + 0{,}00062 \cdot (f_1 + f_2)}, \quad (3.51)$$

де $\omega^Б$ – вміст кисню у дутті у базовому варіанті, %;

f_1 – волога на зволоження дуття, г/м^3;

f_2 – природна вологість дуття (приймається за технологічною інструкцією), г/м^3.

Далее определяется расход дуття для конверсии 1 м^3 природного газа в базовом и прогнозном периодах:

$$V_д^{пг.Б} = \frac{0{,}5}{0{,}01 \cdot \omega^Б + 0{,}00062 \cdot (f_1 + f_2)}, \quad (3.52)$$

$$V_д^{пг.П} = \frac{0{,}5}{0{,}01 \cdot (\omega^Б + 1) + 0{,}00062 \cdot (f_1 + f_2)}. \quad (3.53)$$

Розраховується вихід фурменного газу при спалюванні 1 кг вуглецю коксу в базовому та прогнозному періодах:

$$V_{Ф.г.}^{к.Б} = 1{,}8667 + V_{д}^{к.Б} \cdot (1 - 0{,}01 \cdot \omega^{Б} + 0{,}00124 \cdot (f_1 + f_2), \quad (3.54)$$

$$V_{Ф.г.}^{к.П} = 1{,}8667 + V_{д}^{к.П} \cdot (1 - 0{,}01 \cdot (\omega^{Б} + 1) + 0{,}00124 \cdot (f_1 + f_2). \quad (3.55)$$

Також визначається вихід фурменного газу при конверсії 1 м^3 природного газу в базовому та прогнозному періодах:

$$V_{ф.г.}^{п.г.Б} = 3 + V_{д}^{пг.Б} \cdot (1 - 0{,}01 \cdot \omega^{Б}) + 0{,}00124 \cdot (f_1 + f_2), \quad (3.56)$$

$$V_{ф.г.}^{п.г.П} = 3 + V_{д}^{пг.П} \cdot (1 - 0{,}01 \cdot (\omega^{Б} + 1) + 0{,}00124 \cdot (f_1 + f_2). \quad (3.57)$$

Потім розраховується питомий вихід фурменного газу в базовому та прогнозному періодах, м3/т чавуну:

$$V_{ф.г.}^{уд\ Б} = \left(V_{ф.г.}^{к.Б} + V_{ф.г.}^{пг.Б}\right) \cdot C_{ф}^{Б}, \quad (3.58)$$

$$V_{ф.г.}^{уд\ П} = \left(V_{ф.г.}^{к.П} + V_{ф.г.}^{пг.П}\right) \cdot C_{ф}^{Б}. \quad (3.59)$$

Визначається обсяг колошникового газу в печі з урахуванням його збільшення за рахунок прямого відновлення оксидів заліза:

$$V_{кол.г.}^{уд\ Б} = \left(V_{ф.г.}^{к.Б} + V_{ф.г.}^{пг.Б}\right) \cdot C_{ф}^{Б} + 10 \cdot [Fe] \cdot r_d \cdot 22.4/56, \quad (3.60)$$

$$V_{кол.г.}^{уд\ П} = \left(V_{ф.г.}^{к.П} + V_{ф.г.}^{пг.П}\right) \cdot C_{ф}^{Б} + 10 \cdot [Fe] \cdot r_d \cdot 22{,}4/56. \quad (3.61)$$

Нарешті, перебуває зміна продуктивності печі у разі підвищення вмісту кисню в дуття на 1 %:

$$\Delta P_{O2} = \left| \frac{V_{кол.г}^{уд.Б} - V_{кол.г.}^{уд.П}}{V_{кол..г.}^{уд.Б}} \cdot 100 \right|. \quad (3.62)$$

Так само з використанням даних моделі доменного процесу знаходяться коефіцієнти передачі інших змінних на продуктивність, а також розраховуються набори коефіцієнтів впливу на показники теплового, шлакового та газодинамічного режимів плавки.

Вирішення задачі оптимізації сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху здійснюється у два етапи. На першому етапі реалізується вибір оптимального складу доменної шихти кожної печі окремо, на другому - оптимального розподілу природного газу та технологічного кисню у комплексі доменних печей. Запропонована декомпозиція розв'язання задачі обумовлена особливостями доменного процесу, котрого основні управляючі впливу зосереджені «згори» і здійснюються завантаженням шихтових матеріалів, і навіть «знизу» рахунок вибору раціональних характеристик комбінованого дуття. Така послідовність розв'язання задачі оптимізації спрощує процедуру розв'язання задачі лінійного програмування рахунок зниження її розмірності.

3.3 Математичне забезпечення завдання вибору оптимального складу доменної шихти

Використання натурно-модельного підходу дозволило звести завдання вибору оптимального складу доменної шихти та оптимального розподілу сировинних ресурсів у комплексі доменних печей до задачі лінійного програмування. При постановці та розв'язанні задачі оптимізації враховуються як технологічні обмеження стан доменної плавки, і обмеження наявні запаси ресурсів.

Алгоритм розрахунку оптимального розподілу сировинних ресурсів (залізорудних матеріалів, флюсів) представлений на рис. 3.3, де очевидні призначення та функції окремих етапів.

Цільова функція є виразом вартості завантажуваної сировини в проєктному періоді і має дві складові:

- вартість завантажуваних залізорудних матеріалів (агломерату, котунів та металодобавок) та флюсів загалом по цеху;

- вартість коксу з урахуванням зміни його питомої витрати за зміни умов плавки.

Таким чином, цільова функція набуває вигляду:

$$Z = \sum_{j=1}^{n} \left(\mathrm{M}_{\mathrm{к}j} \cdot \mathrm{C}_{\mathrm{к}j} \cdot P_j + \sum_{i=1}^{k} X_{ij} \mathrm{C}_i \right) \rightarrow \min_{X_{ij}}, \qquad (3.63)$$

де n - кількість доменних печей у цеху, шт.;

k - кількість компонентів шихти, од.;

$M_{\mathrm{к}j}$ - питома витрата коксу в проєктному періоді, кг/т чавуну;

$\mathrm{C}_{\mathrm{к}j}$ - ціна коксу на j-й печі у проєктному періоді, грн./кг;

P_j - задане виробництво чавуну на j-ій печі в проєктному періоді, т/період;

X_{ij} - витрати і-го компонента шихти на j-ої печі в проєктному періоді, т/період;

C_i – ціна і-го компонента шихти у проєктному періоді, грн./т.

Витрата коксу в проєктному періоді визначається наступними факторами: температура і вологість гарячого дуття, хімічний склад і фізико-хімічні властивості залізорудних матеріалів, вміст золи в коксі та її хімічний склад, міцність і стирання коксу та ін. Ці фактори є контрольованими, але некерованими і враховуються. Питома витрата коксу на j-ї печі визначається за виразом:

$$M_{\mathrm{к}j} = M_{\mathrm{к}j}^{\mathrm{б}} + \sum_{i=1}^{m} K_i \Delta x_i, \qquad (3.64)$$

де $M_{\mathrm{кj}}{}^{\mathrm{б}}$ - питома витрата коксу в базовому періоді, кг/т чавуну;

m - кількість факторів, що впливають на витрату коксу, од.;

K_i - коефіцієнт впливу зміни фактора на витрату коксу, кг/(т чавуну·од. виміру фактора);

Δx_i – зміна фактора у проєктному періоді до базового, од. вимірювання фактора.

Витрата окремих компонентів залізорудних матеріалів та флюсів у проєктному періоді обмежена наявними ресурсами. При цьому витрата і компонента шихти на конкретній печі в проєктному періоді може змінюватися в допустимому діапазоні.

Обмеження на витрати різних компонентів шихти на окремих доменних печах описується нерівністю:

$$X_{ij}^{min} \leq X_{ij} \leq X_{ij}^{max}, \tag{3.65}$$

де X_{ij}^{min} і X_{ij}^{max} – мінімальне та максимальне значення витрати і-го компонента шихти на j-ій печі, т/період.

При порівнянні фактичного і теоретичного виходу чавуну, розрахованого різними методиками (за балансом заліза, балансом вуглецю, балансом кисню), встановлено, що метод розрахунку продуктивності за балансом заліза є найбільш точним.

Тому для отримання заданого виробництва чавуну на j-ій печі використовується обмеження у вигляді рівності, що враховує виробництво за балансом заліза:

$$\frac{\sum_{i=1}^{k}[Fe]_i X_{ij}}{1-[Si]_j-[Mn]_j-[C]_j} = P_j \cdot \left(1 + K_{\text{пот } j}\right), \tag{3.66}$$

де $[Fe]_i$ – вміст заліза в і-му компоненті шихти у проєктному періоді, %;

$K_{\text{пот}j}$ – частка втрат чавуну зі шлаком, шламом і колошниковим пилом, од.;

$[Si]_j, [Mn]_j, [C]_j$ – планований вміст кремнію, марганцю та вуглецю в чавуні на j-ій печі в проєктному періоді, од.

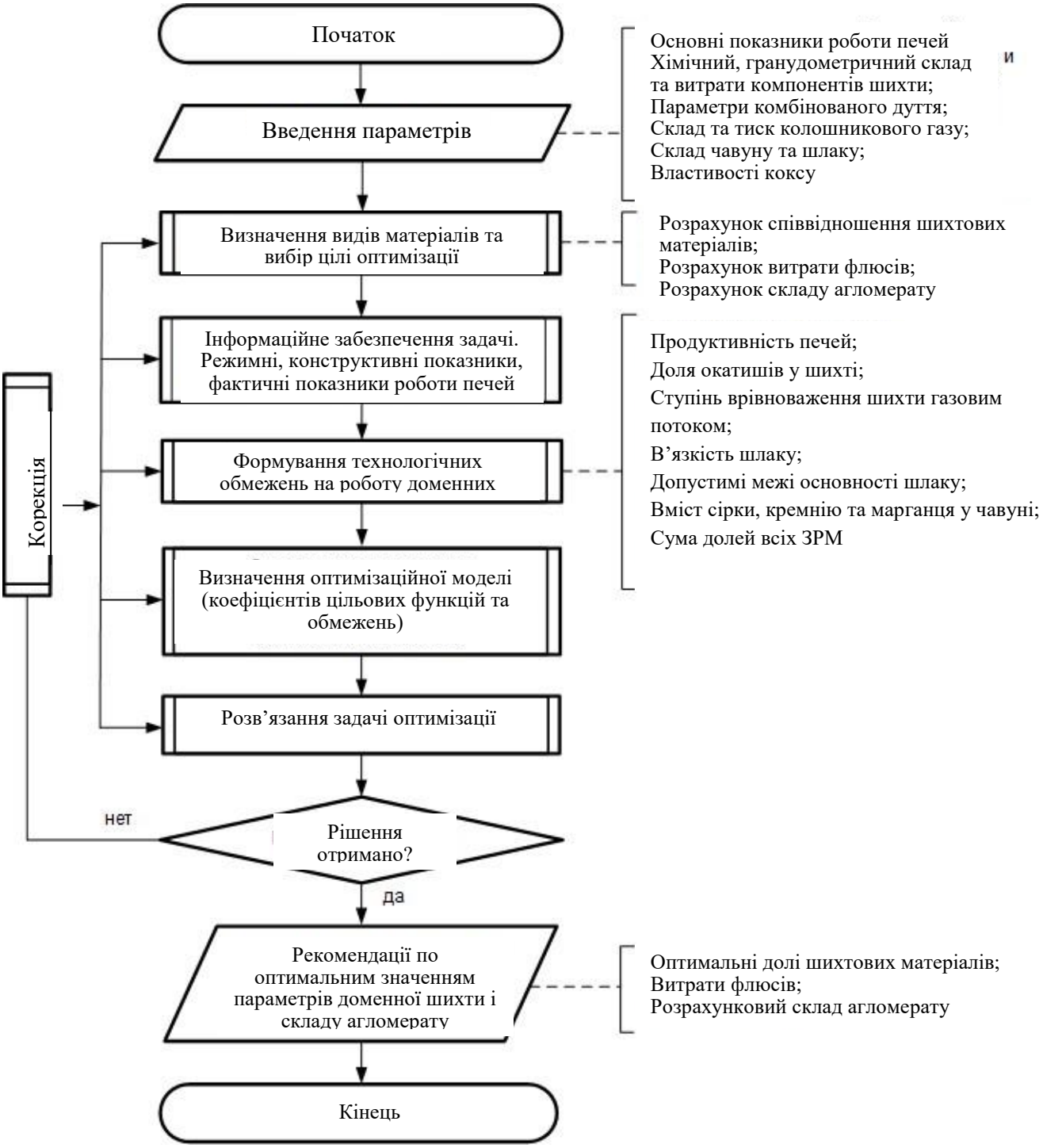


Рисунок 3.3 – Алгоритм розрахунку оптимального розподілу сировинних ресурсів

Розрахунок властивостей шлаку у проєктному періоді проводиться у складі шлаку, який у своє чергу розраховується по балансу шлакообразующих. Для отримання шлаку необхідної основності B_2 = CaO/SiO$_2$ на j-ій печі використовується обмеження:

$$B_{2\,min} \le \frac{\sum_{i=0}^{k} CaO_i X_{ij} + M_{к\,j} \cdot P_j \cdot (1 + K_{пот\,j}) \cdot З_j \cdot CaO_к}{\sum_{i=0}^{k} SiO_{2\,i} X_{ij} + P_j (1 + K_{пот\,j})(M_{к\,j} \cdot З_j \cdot SiO_{2\,к} - 2{,}14 \cdot [Si]_j)} \le B_{2\,max}, \quad (3.67)$$

де CaO_i и $SiO_{2\ i}$ – зміст CaO і SiO2 в і-му компоненті шихти в проєктному періоді, %;

$CaO_к$ и $SiO_{2\,к}$ – вміст CaO и SiO$_2$ у золі коксу, %;

$З_j$ – вміст золи в коксі, од.

2,14 – коефіцієнт із масової частки Si (28 г/моль) у SiO$_2$ (60 г/моль).

Аналогічно здійснюється розрахунок повної основності. За складом кінцевого шлаку виконується перевірка обмежень щодо в'язкості шлаку при температурі випуску, при 1400 і 1500 °С, а також щодо градієнтів в'язкості в діапазоні 25–7 пуаз і в межах температури 1400–1500 °С.

Для формування шлаку потрібного складу та основності не використовуються флюсувальні добавки (кварцит, вапняк). Зміна складу і властивостей доменного шлаку здійснюється за рахунок зміни співвідношення часток шихтових матеріалів, частки окатишів у шихті або коригування основності CaO/SiO$_2$ місцевого агломерату в допустимому діапазоні 1,6–2,1.

Зміна основності агломерату в цьому інтервалі забезпечує як отримання кінцевого шлаку необхідного складу, так і потрібні міцнісні характеристики агломерату. При цьому флюси (переважно кварцит) застосовуються як керувальні впливи, а також у випадках, коли отримати необхідний результат без їхнього введення неможливо.

Під час розв'язання задачі розподілу сировинних ресурсів не враховується вплив оптимального розподілу витрат природного газу та технологічного кисню на показники теплового, шлакового і газодинамічного

режимів доменної плавки в проєктному періоді. При цьому значення витрат природного газу та кисню приймаються рівними значенням у базовому періоді. Надалі, при розв'язанні задачі оптимального розподілу паливно-енергетичних ресурсів, ці показники розраховуються з урахуванням впливу витрат природного газу та кисню.

Особливість складних оптимізаційних задач полягає в тому, що в процесі розв'язання можуть виникати випадки, коли накладені обмеження є суперечливими, тобто область допустимих розв'язків відсутня. У зв'язку з цим в алгоритмі передбачено етап аналізу та коригування рішення задачі.

3.4. Математичне забезпечення задачі оптимального розподілу паливно-енергетичних ресурсів

На етапі планування роботи доменних печей та цеху в цілому розв'язується задача оптимального розподілу палива та технологічного кисню між окремими печами з урахуванням технологічних обмежень для кожного агрегату окремо та наявних резервів паливно-енергетичних ресурсів.

При розв'язанні задачі використовуються отримані на попередньому етапі оптимальні витрати компонентів шихти на кожній доменній печі. Пошук оптимальних витрат паливно-енергетичних ресурсів зводиться до задачі лінійного програмування, оскільки аналіз нелінійності доменного процесу показав, що для задач планування роботи доменного цеху, з огляду на відносно невелике відхилення вхідних параметрів від базових значень, достатньо використовувати лінеаризовані залежності.

Алгоритм розрахунку оптимального розподілу ПЕР у комплексі доменних печей представлено на рис. 3.4, де наведено призначення й функції окремих етапів.

Факторами, що впливають на витрату коксу при заданому співвідношенні часток шихти, є характеристики дуття (температура, вологість, вміст кисню, витрата природного газу) та властивості коксу.

Властивості коксу є контрольованими, але некерованими вхідними параметрами, що визначаються технологією виробництва коксу. Температура дуття також є вхідною величиною й залежить від типу та технічного стану повітронагрівачів і їх кількості. Вологість є сезонною величиною, оскільки доменні печі в нормальному режимі працюють без додаткового зволоження дуття.

У цьому випадку керувальними впливами є лише витрата природного газу та вміст кисню в гарячому дутті. Метою перерозподілу є отримання максимального економічного ефекту з урахуванням цін природного газу, кисню та економії коксу.

Витрата природного газу й технологічного кисню зазвичай змінюються спільно в заданому співвідношенні для підтримання теоретичної температури горіння на фурмах. Але для забезпечення максимального економічного ефекту у цільову функцію вводяться обидві змінні, а підтримання температури горіння описується обмеженням-подвійною нерівністю.

Цільова функція задачі оптимального розподілу природного газу та технологічного кисню у комплексі доменних печей має вигляд:

$$Z = \sum_{j=1}^{n} \left[\left(k_j^{\text{пг}} \cdot \text{С}_{\text{к}j} - \text{С}_{\text{пг}} \right) V_j^{\text{пг}} + \left(k_j^{\text{O2}} \cdot \text{С}_{\text{к}j} - \text{С}_{\text{O2}} \right) V_j^{\text{O2}} \right] \rightarrow \max_{V_j^{\text{пг}}, V_j^{\text{O2}}}, \qquad (3.68)$$

де $\text{С}_{\text{ПГ}}$ – ціна природного газу, грн./м^3;

$k_{\text{j}}^{\text{пг}}$ – коефіцієнт зміни витрати коксу на j-ій печі зі збільшенням витрати природного газу на 1 м^3/т (еквівалент заміни коксу на природний газ), кг коксу/м^3 природного газу;

$V_{\text{j}}^{\text{пг}}$ – витрата природного газу на j-ій печі, м^3/год;

k_{j}^{O2} – коефіцієнт зміни витрати коксу на 1 м^3 кисню, кг коксу/м^3 кисню;

С_{O2} – ціна технологічного кисню, грн./м^3;

V_{j}^{O2} – витрата кисню на j-ій печі, м^3/ч.

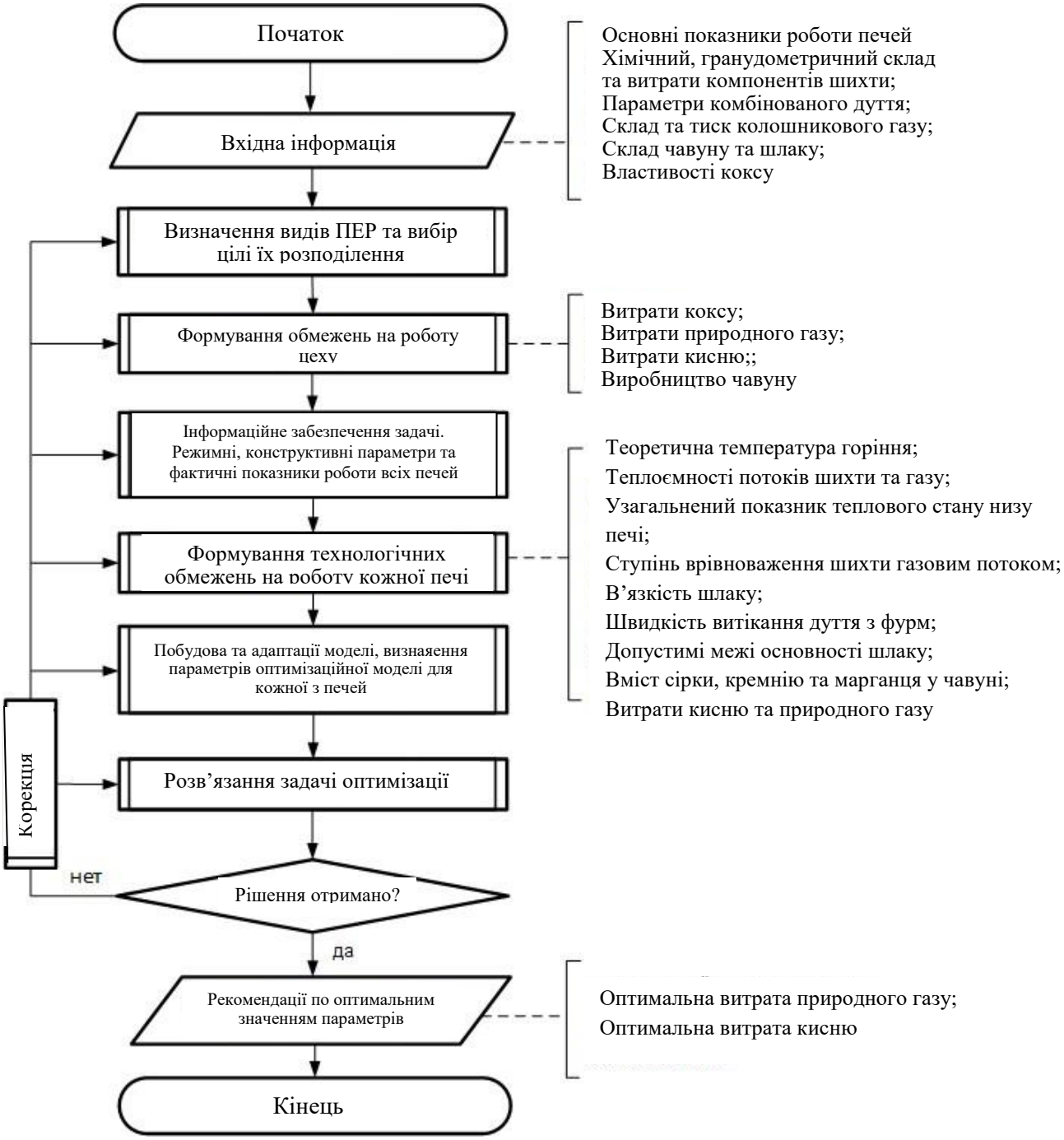


Рисунок 3.4 – Алгоритм розрахунку оптимального розподілу паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей

При вирішенні завдання накладаються обмеження щодо витрати технологічного кисню та природного газу на окремих доменних печах:

$$V_{j\,min}^{ПГ} \le V_j^{ПГ} \le V_{j\,max}^{ПГ}, \quad (3.69)$$

$$V_{j\,min}^{O2} \le V_j^{O2} \le V_{j\,max}^{O2}, \quad (3.70)$$

де $V_{jmin}^{ПГ}$ і $V_{jmax}^{ПГ}$ – мінімальне та максимальне значення витрати природного газу на j-ій печі, м^3/год;

V_{jmin}^{O2} і V_{jmax}^{O2} – мінімальне та максимальне значення витрати технологічного кисню на j-ій печі, м^3/год;

При вирішенні завдання враховуються представлені раніше обмеження на ресурси природного газу, технологічного кисню і коксу, що є в цеху. Для отримання заданого добового виробництва чавуну на j-ій печі з урахуванням зміни умов плавки використовується обмеження-рівність:

$$P_j = P_j^{б} + \sum_{i=1}^{k} k_{ji}\left(x_j - x_j^{б}\right), \quad (3.71)$$

де k – кількість факторів, що впливають на продуктивність печі, од.;

$P_j^{б}$ – продуктивність j-ої печі в базовому періоді, т/добу;

k_{ji} – коефіцієнт зміни продуктивності за зміни і-го чинника на j-ой печі, т/(доба · од. виміру чинника);

x_j и $x_j^{б}$ – величина і-го фактора відповідно в проєктному та базовому періодах на j-ій печі, од. вимірювання фактора.

Враховуються представлені раніше технологічні обмеження на тепловий, шлаковий та газодинамічний режими доменної плавки, а також якість чавуну, що виплавляється, на кожній доменній печі окремо. При виборі основних обмежень на роботу доменної печі використовувалися фізичне обґрунтування та класифікація факторів, що лімітують при інжекції палив у доменні печі, представлені в роботах Б.І. Китаєва та його учнів [43, 44].

При вирішенні задачі оптимального розподілу природного газу виникає необхідність оцінки та коригування шлакового режиму доменних печей, що обумовлено коригуванням витрати коксу і, відповідно, зміною надходження в піч золи коксу. У зв'язку з цим передбачено ітераційну процедуру коригування оптимального складу доменної шихти в проєктному періоді, яка передбачає перевірку на значення основності та в'язкості кінцевого шлаку в заданих межах. За порушення обмежень здійснюється повторна процедура визначення оптимального складу доменної шихти, або виняток із розрахунків певних обмежень.

Таким чином, визначаються оптимальні значення витрат сировинних та паливно-енергетичних ресурсів на кожній із печей цеху в проєктному періоді з урахуванням технологічних, економічних та організаційних вимог.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Розроблено математичну модель та створено сукупність алгоритмів для вирішення завдань оптимального розподілу сировини та палива між печами доменного цеху в умовах зміни характеристик дуття, складу та властивостей проплавлюваної залізорудної сировини та палива. Модель враховує обмеження на тепловий, шлаковий, дуттєвий та газодинамічний режими доменних печей та їх взаємозв'язок один з одним.

2. Виконано декомпозицію завдання оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів між печами доменного цеху та виділено основні підсистеми моделювання доменного процесу.

3. Розроблено математичне забезпечення розрахунку показників, що характеризують тепловий, шлаковий, газодинамічний та дуттєвий режими доменної плавки для проєктних періодів.

4 РОЗРОБКА ТА ОПИС ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ СИРОВИНИМИ І ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИМИ РЕСУРСАМИ КОМПЛЕКСУ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

4.1 Методи проєктування та реалізації програмного забезпечення з управління паливно-енергетичними ресурсами у доменному виробництві

Інформаційні системи для роботи інженерно-технологічного персоналу на металургійних підприємствах призначені для обробки та подання інформації про технологічний процес, вирішення технологічних завдань, модельної підтримки технології обробки матеріалів, що зрештою спрямоване на підвищення техніко-економічних показників та ефективності металургійного виробництва. Програмне забезпечення таких систем включає автоматизовані робочі місця, системи підтримки прийняття рішень, інформаційно-моделюючі системи, експертні системи та ін.

У доменному виробництві інформаційно-моделюючі системи дозволяють вирішувати комплекс взаємопов'язаних технологічних завдань, зокрема: розрахунок матеріальних і теплових балансів доменної плавки; моделювання теплового, шлакового та газодинамічного режимів роботи доменних печей; розрахунок зони в'язкопластичного стану залізорудних матеріалів; вибір оптимального складу доменної шихти; прогнозування технологічних ситуацій; оптимізацію розподілу паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей [46, 47].

З одного боку, програмне забезпечення інформаційно-моделюючих систем багато в чому схоже на інші програми для корпоративного чи масового споживача. Воно являє собою віконні або веб-додатки, написані на високорівневих та надвисокрівневих мовах програмування C++, Java, JavaScript, Python, Ruby, мовами програмування .NET (Visual C#, Visual Basic) та ін. Часто такі програми мають дворівневу або трирівневу клієнт-серверну архітектуру. При дворівневій архітектурі як сервер виступає система управління базами даних (СУБД) підприємства, що зберігає в базі даних (БД)

первинну технологічну інформацію. Клієнтський додаток запитує дані з БД, обробляє їх і виводить розрахункові показники на форму користувача. При трирівневій архітектурі процес обробки даних перекладається проміжне ланка – сервер додатків, але в клієнт виноситься лише найпростіша бізнес-логіка та її основним завданням є представлення інформації у зручній для користувача формі.

З іншого боку, процес обробки даних у такому ПЗ, як правило, включає необхідність чисельного розв'язання задач математичного програмування, систем алгебраїчних і диференціальних рівнянь, задач математичної фізики. Такі завдання неможливо вирішити за допомогою стандартного набору математичних засобів мов програмування загального призначення, а сторонні математичні бібліотеки, зокрема Extreme Optimization та IMSL Numerical Library мають високу ліцензійну вартість. Мова програмування Fortran, математичні пакети прикладних програм, таких як MathCAD, MATLAB, Mathematica та Microsoft Excel використовуються для наукових та інженерних обчислень. У них вбудована велика кількість математичних бібліотек і підпрограм, але вони не мають засобів для створення зручного інтерфейсу користувача і не дозволяють розробляти функціональні додатки. Тому розробки інформаційно- моделюючих систем використовується підхід інтеграції із зовнішнім ПЗ.

Математичний пакет MathCAD використовує при інтеграції із засобами розробки програмного забезпечення технологію COM (Component Object Model). Робота з COM-компонентами вимагає встановлення дорогої копії MathCAD на кожному кінцевому комп'ютері програми, має проблему програмної сумісності між версіями бібліотеки та низькою швидкістю взаємодії з COM-об'єктами.

Особливості інтеграції з математичним пакетом MATLAB та програмою для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel визначаються вибраними засобами розробки програмного забезпечення, тому будуть розглянуті надалі.

Серед вимог до програмного забезпечення для роботи інженерно-технологічного персоналу можна виділити такі:

- функціональність - властивість, що зумовлює його здатність виконувати певний перелік функцій, які задовольняють встановлені чи передбачувані потреби відповідно до його призначення;

- надійність функціонування - властивість, що зумовлюють здатність ПЗ зберігати працездатність і перетворювати вихідні дані на результат у заданих умовах за встановлений період;

- зручність використання та доступність - властивість, що забезпечує користувачам необхідні умови та доступність для використання із заданого місця;

- ефективність - властивість, що характеризуються ступенем відповідності використовуваних ресурсів середовища функціонування рівнем якості функціонування за умов застосування;

- переносимість - властивість, що зумовлюють його пристосованість для перенесення з одного середовища функціонування до іншого.

Такі вимоги забезпечують оперативний доступ до інформації за збереження функціональних можливостей та надійності ПЗ.

Всі програми можна розділити на дві великі категорії: робочий стіл і веб. Десктоп-додатки відповідають вимогам щодо функціональності, надійності функціонування та ефективності. Однак, найчастіше вони розробляються під конкретну апаратно-програмну платформу, тому не відповідають вимогам доступності та кросплатформної переносимості. Сучасні вимоги мають на увазі оперативний доступ до інформації, що неможливо забезпечити за такого підходу.

Десктоп-додатки при використовуваній клієнт-серверній архітектурі поділяються на «товстий» та «тонкий» клієнти залежно від функціоналу, що виконується на машині клієнта. Архітектура «тонкого» клієнта дозволяє лише збільшити швидкість розробки кроссплатформенного програмного

забезпечення, але не знімає завдання розробки окремих продуктів під кожну платформу.

Сучасні десктоп-програми розробляються як універсальні програми, які компілюються одночасно під кілька платформ. Однак і вони не вирішують повною мірою проблему переносимості на будь-яку платформу, смартфон, планшет або ноутбук.

До іншої категорії належать веб-програми. Веб-технології дозволяють створювати програми з різною переносимістю. Наприклад, Rich Internet Application (RIA), що використовують технології ActiveX, Adobe Flash, Java, Silverlight, не дозволяють створювати кросплатформні та кросбраузерні. Традиційні веб-застосунки доступні з будь-якого пристрою, що має браузер, дозволяють створювати адаптивні сервіси, що забезпечують правильне відображення даних на різних пристроях.

Серед недоліків веб-додатків можна відзначити такі властивості як їхня загальнодоступність, необхідність наявності з'єднання з мережею та неможливість запуску складних (ваговитих) проєктів. Програмне забезпечення, що розробляється, є клієнт-серверним, тому проблема з'єднання з мережею не є актуальною. Програми не є великоваговими, а проблема загальнодоступності вирішується налаштуванням правил безпеки в мережі.

Програмну інфраструктуру доменного цеху побудовано на базі продуктів Microsoft. Як СУБД використовується SQL Server. Існуючі системи підтримки прийняття рішень та експертні системи є віконними програмами Windows Forms або веб-додатками. Цільовою програмною платформою для обох типів програм є .NET Framework. Інтерфейс та бібліотеки класів написані в основному об'єктно-орієнтованою мовою програмування C#.

Враховуючи вищевикладене, для розробки системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві обрано фреймворк ASP.NET MVC на базі .NET Framework. Цей фреймворк призначений для розробки веб-застосунків мовою програмування C# з використанням концепції MVC (Model-View-Controller). MVC – це шаблон

проєктування програмного забезпечення, згідно з яким додаток можна розділити на три окремі компоненти - дані програми, інтерфейс користувача та логіка, що управляє. За рахунок цього підвищується гнучкість розробки ПЗ, що зрештою виявляється у зменшенні часу написання програмного коду, його тестування і налагодження [48-50].

Як зазначалося, на вирішення складних математичних завдань розробки інформаційно-моделюючих систем використовується підхід інтеграції із зовнішнім ПЗ, а процес взаємодії визначається обраними засобами розробки. Розглянемо особливості процесу інтеграції програм, що розробляються мовою програмування C# з Microsoft Excel і MATLAB.

Інтеграція C# та Microsoft Excel. В основу взаємодії з Microsoft Excel покладено технологію COM Interop, що дозволяє об'єктам COM взаємодіяти з об'єктами програмної платформи .NET Framework. Підтримка технології COM Interop забезпечується підключенням бібліотеки Microsoft.Office.Interop.Excel. Бібліотека дозволяє виконувати практично будь-які операції, які можна виконати вручну через інтерфейс користувача. Вона включає можливості читання та зміни осередків на аркушах книги, створення діаграм та виклик макросів.

Розглянемо алгоритм розв'язання математичної задачі мовою програмування C# із підключенням до Microsoft Excel. Для вирішення задачі використовується заздалегідь підготовлений файл електронної таблиці, в якому записано структуру математичної моделі (алгоритм розв'язання технологічного завдання) та нормативно-довідкові дані для розрахунку. Даний файл вбудовується у створюване програмне забезпечення і відкривається в прихованому режимі при запуску користувачем алгоритму розрахунку. Після відкриття здійснюється оновлення заздалегідь певного діапазону осередків, викликається процес розрахунку, та був відбувається зчитування його результатів. Виклик процесу розрахунку реалізується макросом. Кроки даного алгоритму представлені на рис. 4.1.

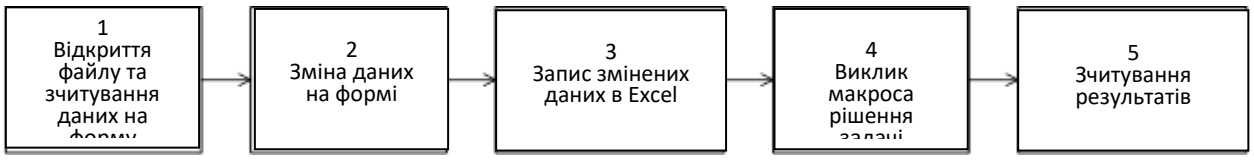


Рисунок 4.1 – Алгоритм розв'язання математичного завдання під час інтеграції C# та Microsoft Excel

У ході використання цього підходу виділено низку недоліків:

1. Максимальна кількість обмежень у надбудові «Пошук рішення» при знаходженні цільової функції становить 100. Такий ліміт не дозволяє гнучко вирішувати складні завдання з великою кількістю обмежень.

2. Низька швидкість розв'язання задачі. Дії з файлом електронної таблиці здійснюються через відкриття програми Microsoft Excel у фоновому режимі. Відкриття займає великий проміжок часу, а виконання операцій читання та запису здійснюється із затримкою.

3. Зависання процесу Excel на комп'ютері користувача. Навіть коректне програмне завершення роботи з Microsoft Excel і звільнення ресурсів на стороні програми не завжди призводить до реального звільнення ресурсів на обчислювальній станції.

4. Необхідність зберігання відносин між даними програми та відповідними осередками файлу електронної таблиці. Іншими словами, логіка роботи клієнтської програми пов'язана з реалізацією моделі в Excel-файлі, тому будь-яка зміна моделі вимагає найчастіше переналаштування діапазонів осередків та перекомпіляції програми.

Стандартна система адресації Microsoft Excel за адресою комірки не дуже виразна, що ускладнює процес розробки. Використання механізму іменованих осередків, коли звернення до осередку чи діапазону здійснюється за його адресою, а, по символьному імені, вирішує проблему лише частково.

5. Проблема програмної сумісності версій. Бібліотека об'єктів постачається разом із програмою Microsoft Excel і може бути несумісною з версією, яка використовується при розробці програмного забезпечення. Слід

дотримуватися правил, що версія бібліотеки, що використовується при розробці програмного забезпечення, не повинна бути вищою за встановлену на комп'ютері користувача версію програми Microsoft Excel.

Однак, спочатку математичні моделі та алгоритми найчастіше перевіряються та налагоджуються у файлах електронних таблиць на наборі тестових даних, тому підхід інтеграції C# і Microsoft Excel може підвищити швидкість розробки програмного забезпечення за рахунок виключення часу на розробку та налагодження математичної бібліотеки мовою програмування.

Інтеграція C# та MATLAB. Відмінною особливістю MATLAB від інших математичних пакетів є наявність вбудованих у нього різноманітних засобів вирішення більшості відомих математичних завдань, які можна використовувати (вбудовувати) під час створення автономних застосунків.

Створювані в MATLAB m-функції можуть бути використані розробником програми двома способами:

- бібліотека, що компілюється за допомогою MATLAB Compiler SDK для мов програмування C/C++, Java, Python і платформи .NET. Необхідною умовою роботи створюваних бібліотек є встановлення вільно розповсюджуваного ядра, що виконується MATLAB Runtime (MCR). Він дозволяє запускати програми, які використовують m-функції, без необхідності встановлення дорогої копії MATLAB.

Що стосується об'єктно-орієнтованих мов програмування, назва проєкту MATLAB Compiler визначає простір імен. Проєкт складається із класів, які у свою чергу включають m-файли. Кожен m-файл включає одну функцію, яка викликається методом відповідного класу.

- розповсюдження програм на MATLAB Production Server. Цей спосіб доступний починаючи з версії MATLAB R2012b, він пропонує найбільш ефективний спосіб розробляти масштабовані програми на рівні підприємства. Виклик функцій MATLAB здійснюється через звернення до Web-сервера засобами RESPful API або через звернення до методів динамічної бібліотеки (розширення), доступної в C/C++, Java, Python та .NET Framework.

MATLAB Production Server може бути встановлений або на одній машині з додатком або на будь-якій машині в локальній мережі або мережі Інтернет. При цьому на одній машині може бути встановлене кілька екземплярів MATLAB Production Server, кожен з яких розміщується на окремому порту і прив'язаний до певної версії MATLAB Runtime.

Функції, що виконуються на MATLAB Production Server, поширюються через CTF-архіви. Ці архіви містять зашифровані m-функції, що становлять додаток та всі інші m-функції MATLAB, від яких залежать основні m-функції. Архіви розміщуються в папці auto_deploy сервера та при заміні автоматично оновлюються без перезавантаження сервера. На рисунку 4.2 представлено схему створення та роботи додатків MATLAB Production Server.

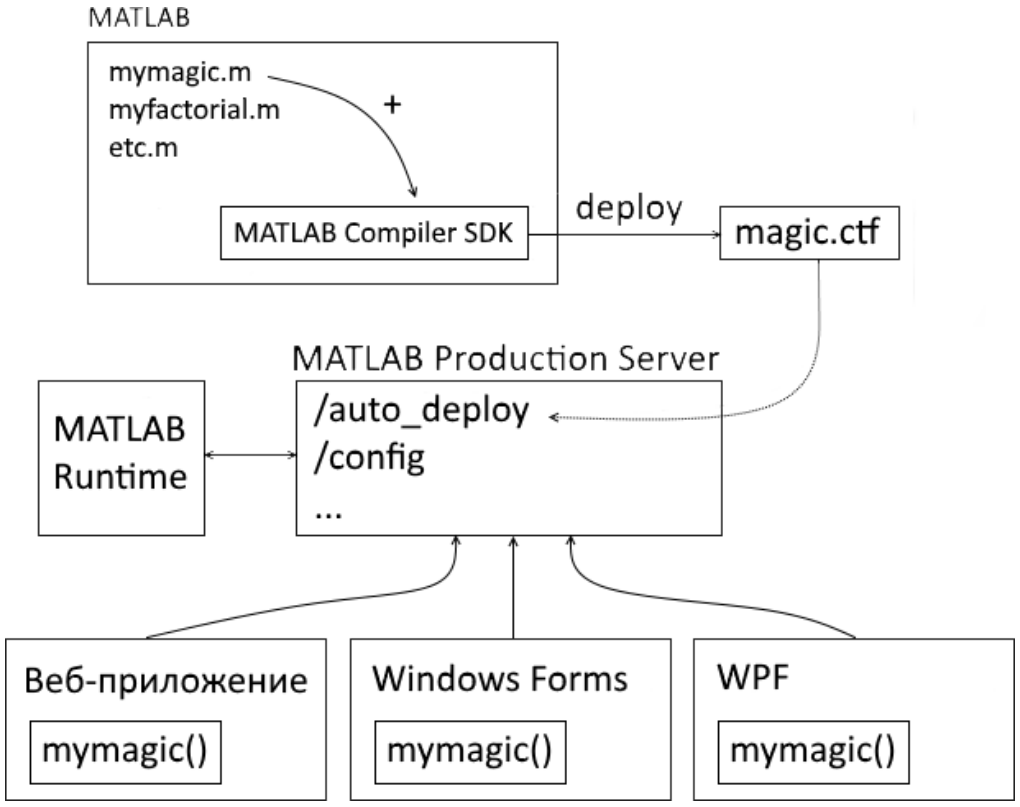


Рисунок 4.2 – Схема створення та роботи застосунків MATLAB Production Server

MATLAB Production Server має такі переваги в порівнянні з компіляцією за допомогою бібліотек MATLAB Compiler SDK:

- керування безліччю програм та версій MATLAB Runtime;

- використання зовнішніх пакетів дозволяє істотно скоротити час розробки ПЗ за рахунок використання реалізованих в них алгоритмів та методів вирішення математичних завдань.

Тому звичайною практикою є, коли моделювання процесів ПЗ здійснюється як з використанням Microsoft Excel, так і MATLAB. Розглянемо можливу інфраструктуру автоматизованої інформаційно-моделюючої системи, яка побудована на базі обраної програмної платформи .NET Framework та інших продуктах компанії Microsoft (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 - Інфраструктура інформаційно-моделюючої системи, побудованої на продуктах компанії Microsoft

У такій системі як клієнт виступає будь-яки й пристрій, що має браузер. На клієнті не потрібне встановлення спеціалізованого програмного забезпечення. Програмна платформа .NET Framework та пакет Microsoft Office встановлені на сервері програм. Звернення клієнтів обслуговує веб-сервер IIS. Рідше, якщо необхідно балансувати великі навантаження, між клієнтом і IIS встановлюється зворотний проксі-сервер (реверс проксі). Як реверс проксі може бути простий, швидкий і надійний веб-сервер Nginx [51].

Вихідні дані виходять з бази даних Microsoft SQL Server за допомогою SQL-запитів або процедур, що зберігаються. Крім SQL Server, програми на платформі .NET Framework підтримують роботу з різними СУБД через

бібліотеки, що підключаються, які називаються постачальниками даних. Постачальники даних доступні багатьом реляційних і нереляційних СУБД: Oracle, PostgreSQL, MySQL, SQLite, Firebird, MongoDB, Redis та інших [48].

Microsoft Excel використовується при вирішенні нових завдань або вдосконаленні алгоритмів, які потребують тестування та налагодження. Тестування здійснюється перевіркою коректності результатів вибірці вихідних даних за різні періоди роботи.

Для вирішення складних математичних завдань використовується екземпляр MATLAB Production Server, який фізично може перебувати як на одній машині із сервером додатків, так і на різних. Оскільки MATLAB Production Server є продуктом, що ліцензується, то замість нього найчастіше використовуються MATLAB Runtime, що встановлюється на сервері додатків, і скомпільована в MATLAB Compiler бібліотека.

Варто зазначити, що розв'язання задач у Microsoft Excel займає значно більше часу, ніж при використанні MATLAB, що пов'язано з відкриттям офісного пакету під час програмної роботи з електронними листами. У той же час, перший виклик функції MATLAB вносить суттєву затримку, пов'язану з ініціалізацією MATLAB Runtime.

4.2 Програмне забезпечення системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів

Автоматизована система оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей відноситься до класу систем рівня MES піраміди автоматизації. Системи класу MES покликані налагодити, пов'язати виробничий облік і технологічне стеження продукції в темпі з подіями [52]. На рівні MES здійснюється управління виробництвом загалом та забезпечується координація всіх систем управління технологічними процесами (АСУ ТП) та інформаційна взаємодія з рівнем ERP. До інших систем рівня MES у доменному цеху належать АРМ технолога, АРМ диспетчера. На рис. 4.4

показано схему інформаційної взаємодії різних систем доменного цеху, місце розробленого ПЗ в інформаційній системі та його модульна архітектура.

На схемі АСУ ТП забезпечують якісний рівень локального управління окремими доменними печами, цьому рівні працюють системи моніторингу показників печі, моніторингу параметрів завантаження, АРМ газовика, АРМ майстра. Системи рівня ERP вирішують завдання планування завантаження виробництва та бухгалтерсько-фінансові завдання, до них належать АРМ керівника вищої ланки, автоматизована інформаційна система центральної диспетчерської (АІС ЦДК) та корпоративна інформаційна система управління підприємством (АІС КІС).

Модульна архітектура ПЗ системи побудована на основі відповідної функціональної моделі та складається з наступних модулів:

- модуль налаштування базового періоду. У ньому здійснюється вибір базового періоду, підготовка фактичних та розрахункових показників роботи печей та цеху, коефіцієнтів впливу;

- модуль налаштування обмежень на роботу печей та на цех загалом щодо надходження сировини та палива.

- модуль налаштування проєктного періоду. Задаються умови роботи у проєктному періоді для цеху загалом і кожної печі окремо (план виробництва чавуну, характеристики гарячого дуття та інших.);

- модуль налаштування моделі оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів. Виконується налаштування економічних параметрів моделі оптимізації;

- модуль оптимізації. Виконується підготовка даних для вирішення задач лінійного програмування та визначаються оптимальні витрати сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у проєктному періоді;

- модуль розрахунку показників теплового, шлакового, газодинамічного та дуттєвого режимів доменної плавки та коефіцієнтів впливу;

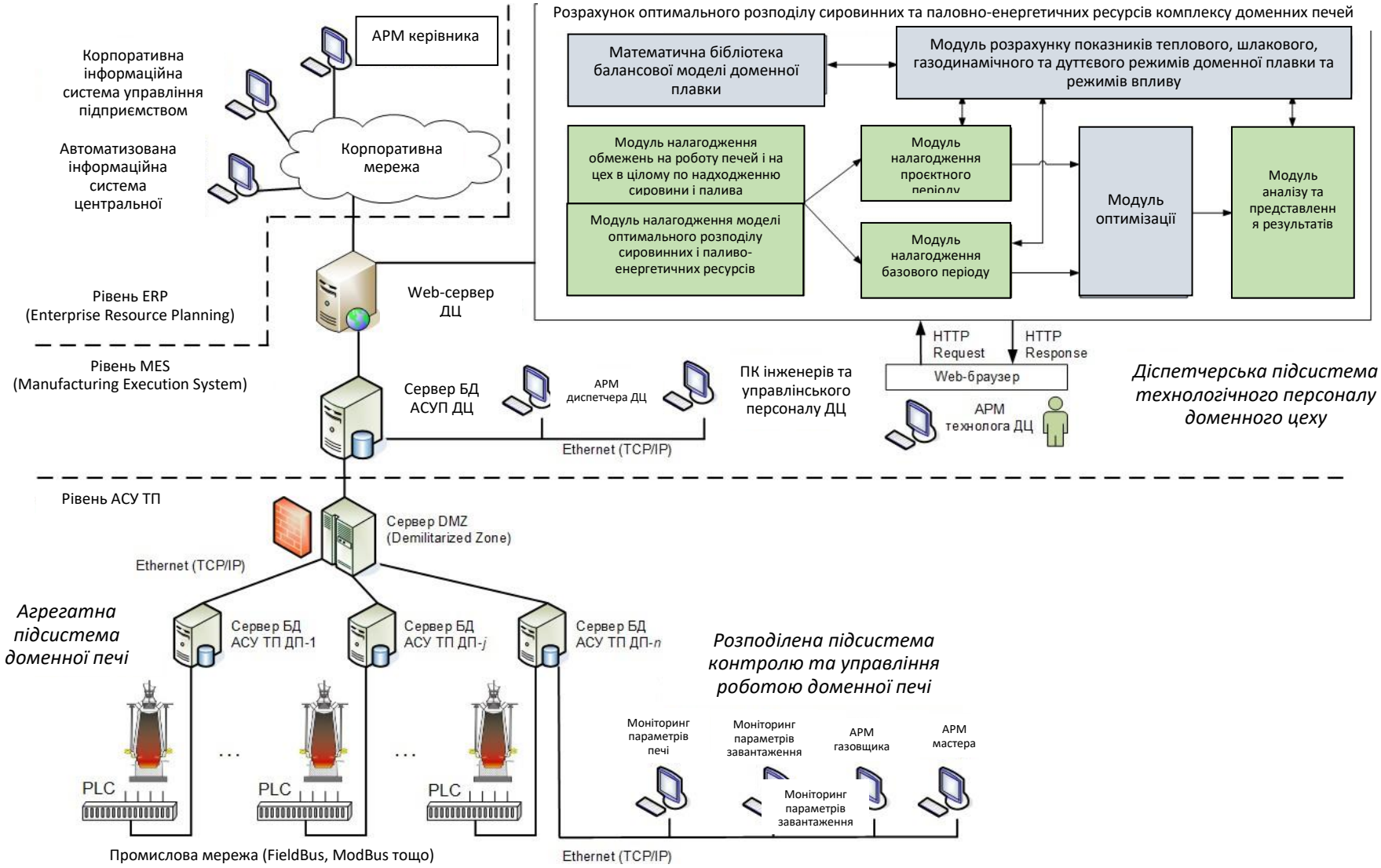


Рисунок 4.4 – Схема інформаційної взаємодії різних систем доменного цеху, місце розробленого програмного забезпечення в інформаційній системі та його модульна архітектура

- модуль аналізу та подання результатів. Виконується аналіз отриманих від модуля оптимізації результатів розв'язання задачі, розраховуються показники плавки за оптимального розподілу ресурсів. Результати відображаються в табличному та графічному вигляді, є можливість порівняння різних варіантів розрахунку, друк та експорт звіту у файл формату Microsoft Excel;

- математична бібліотека вдосконаленої балансової моделі доменної плавки УрФУ-ММК є єдиною для комплексу інформаційних систем доменного цеху ММК і підключається як бібліотека, що динамічно підключається.

Розроблена система включає модулі двох типів:

- розрахункові модулі призначені для перетворення даних і виконання розрахунків, реалізовані у вигляді бібліотек (DLL) і бібліотек класів, що динамічно підключаються;

- модулі редагування вихідних даних та відображення результатів є користувальницьким веб-інтерфейсом і реалізовані у вигляді динамічно формованих HTML-сторінок.

Використання модульного підходу дозволило створити ефективний, гнучкий, масштабований, тестований та супроводжуваний програмний продукт.

Кожен модуль має набір функціональності, що забезпечує вирішення деякої задачі. Кожен модуль приймає на вхід набір вихідних даних, виконує їхню обробку і повертає набір результатів. При цьому результат роботи залежить тільки від вихідних даних, але не від інших модулів.

Вихідними даними системи оптимального розподілу сировинних і паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві є технологічні показники роботи з кожної печі, що зберігаються в БД доменного цеху; витрата, надходження та залишки сировини та палива; характеристики дуття; показники якості сировини та палива та ін. Збір та обробка цих даних здійснюється різними службами:

- центральна лабораторія комбінату (ЦЛК) проводить хімічний аналіз проб чавуну та шлаку, колошникового газу, технічний та гранулометричний аналізи коксу та ін.;

- центр АСУ комбінату безперервно збирає з різних видів датчиків дані про показники процесу та зберігає їх на серверах АСУ ТП доменного цеху. Загалом у базі даних зберігається інформація про понад 400 показників процесу з кожної доменної печі. Так як обсяг інформації дуже великий, дані попередньо обробляються і усереднюються за різні інтервали часу;

- технологічні служби цеху займаються розрахунком комплексних показників ходу плавка, більшість із яких розраховується з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

Всі ці дані зберігаються централізовано та щомісяця формуються фахівцями інженерно-технологічної групи доменного цеху за допомогою програмного продукту. У зв'язку з вищевикладеним, для розробки програмного забезпечення обрано архітектуру «клієнт-сервер». Архітектура клієнт-серверної інформаційної системи, яка побудована з використанням веб-технології, представлена на рис. 4.5.

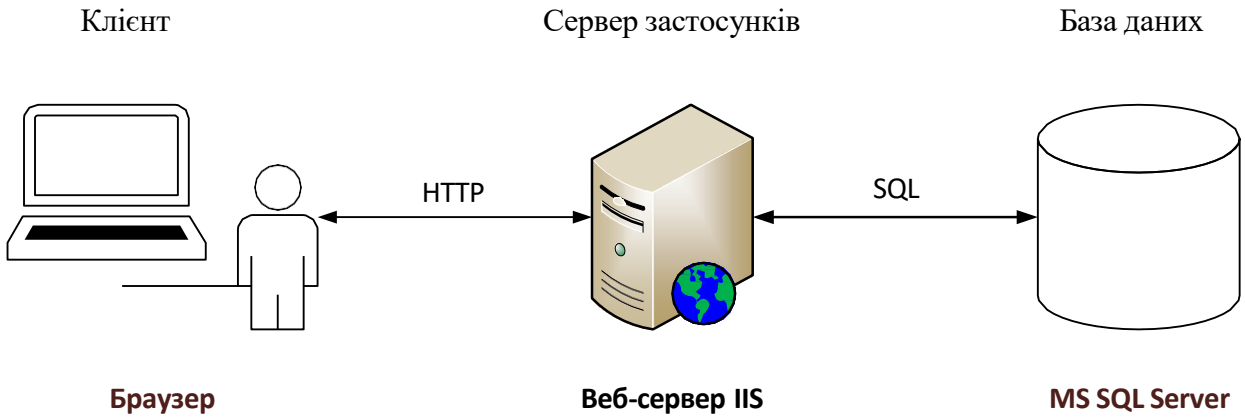


Рисунок 4.5 – Архітектура інформаційної системи

Розгортання розробленого програмного забезпечення здійснюється на веб-сервері IIS, який виконує обробку HTTP-запитів та передає їх цільової веб-застосунку, виконуючи таким чином роль координатора.

В рамках роботи не здійснюється вибір та обґрунтування технічного забезпечення, оскільки автоматизована система побудована на базі існуючої апаратної платформи. Компоненти автоматизованої системи використовують ресурси серверного кластеру доменного цеху. Кластер побудований на базі

спеціалізованого обладнання, що підтримує резервування живлення та гарячу заміну жорстких дисків. На програмному рівні використовується дзеркальний масив RAID 1.

Для забезпечення безпечної спільної роботи різних інформаційних систем та простоти відновлення працездатності при аварійних ситуаціях застосовується механізм віртуалізації. База даних розміщена на існуючому віртуальному сервері СУБД SQL Server 2014, для керування використовуються SQL Server Management Studio або SQL Operations Studio. Веб-сервер та розроблене програмне забезпечення розміщено на віртуальній машині, яка працює під керуванням операційної системи (ОС) Windows Server 2008 R2.

Як зазначалося, написані мовою програмування C# програми використовують як цільової середовища виконання .NET Framework. Платформа .NET Framework містить набір класів, які реалізують різні базові функціональні можливості додатків, будь то робота з файловою системою, базою даних, можливість роботи з потоками та ін.

Крім .NET Framework існує інша нова платформа .NET Core, до складу якої входить фреймворк для веб-розробки ASP.NET Core. Платформа також підтримується компанією Microsoft, при цьому є відкритою та кросплатформною. Для сумісності з математичними бібліотеками, що використовуються в ПЗ, і для більш швидкого переходу на сучасну платформу в майбутньому при виконанні дослідження використовувався підхід, коли програмний код пишеться з використанням функціоналу .NET Core, але виконується на платформі .NET Framework. Це досягається підключенням динамічних бібліотек .NET Core до проєкту .NET Framework.

Для взаємодії з базою даних використовується кроссплатформенна бібліотека Entity Framework Core. Вона є об'єктно-орієнтованою технологією доступу до даних (Object-Relational Mapping, ORM) і дозволяє істотно підвищити швидкість розробки додатків, які використовують бази даних.

Програмування серверної частини програмного забезпечення виконано з використанням фреймворку ASP.NET Core MVC. Для обробки запитів користувачів використовується механізм конвеєра обробки запитів HTTP (рис. 4.6).

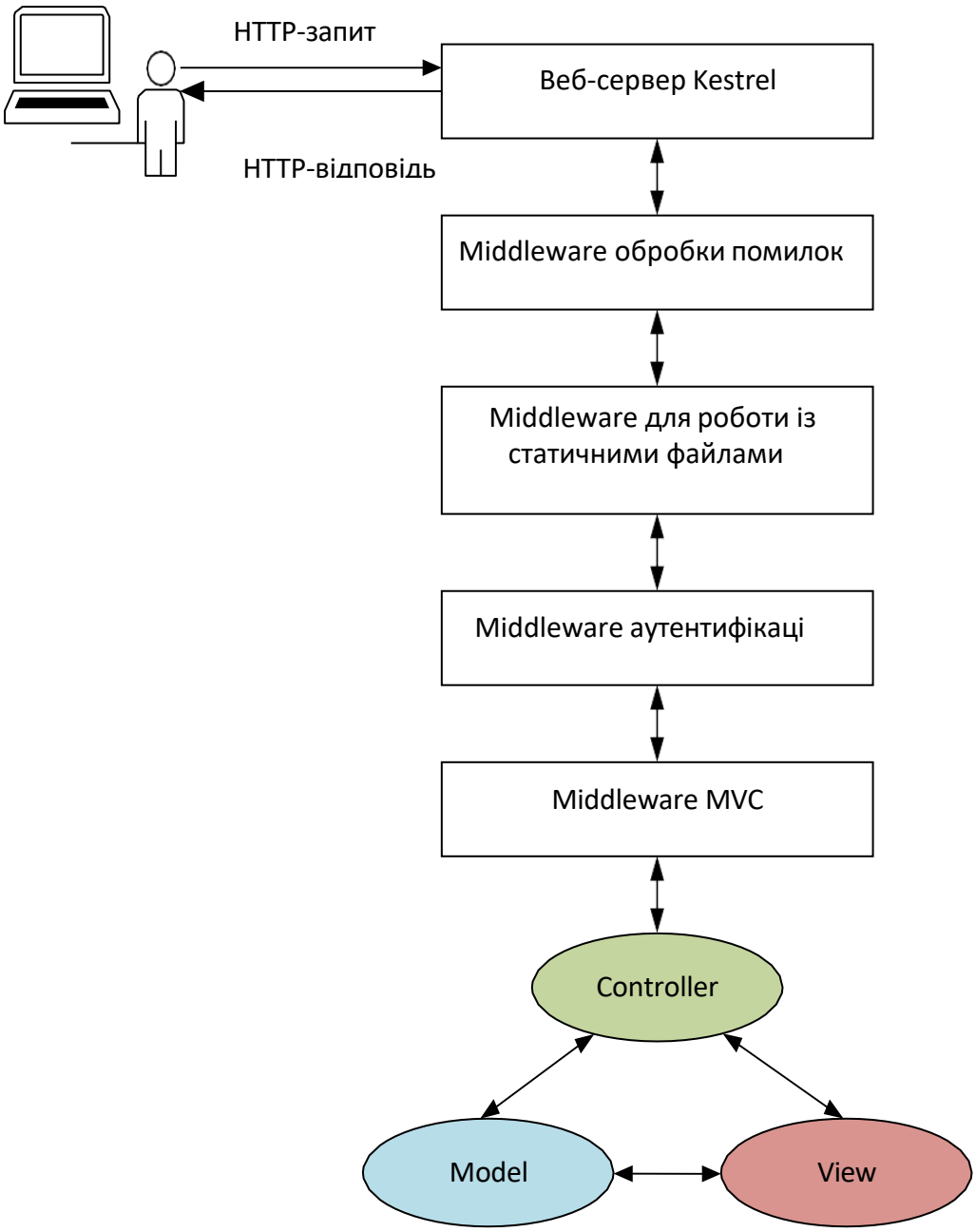


Рисунок 4.6 - Схема роботы конвеєра обробки запросів інформаційно-моделюючої системи

Конвеєр складається з компонентів, що послідовно виконуються, які називаються компонентами Middleware. Компоненти виконуються два рази: до передачі запиту на обробку наступного компонента в конвеєрі та після отримання від нього результату обробки. При цьому компонент може передати

запит далі наступному в конвеєрі компоненту або виконати обробку і закінчити роботу конвеєра.

Клієнтська частина написана на базі фреймворку Bootstrap, який включає набір каскадних таблиць стилів CSS і плагінів, що найчастіше використовуються на мові програмування JavaScript. На клієнтській стороні також використовуються JavaScript-бібліотеки, що вільно розповсюджуються: jQuery для маніпуляцій з елементами DOM (Document Object Model) та Chart.js для побудови графіків та діаграм.

Конвеєр обробки запитів інформаційно-моделюючої системи складається з наступних компонентів Middleware:

- Middleware обробки помилок призначений для коректного відображення веб-сторінок у разі виникнення виняткових ситуацій усередині програми, помилок під час підключення та отримання даних від СУБД;

- Middleware для роботи статичними файлами призначений для коректного завантаження статичних файлів із файлової системи;

- Middleware аутентифікації виконує підключення стандартних механізмів аутентифікації та авторизації ASP.NET Core;

- Middleware MVC призначений для підключення до проєкту можливостей ASP.NET MVC, у тому числі маршрутизація, прив'язка моделі, використання залежностей, механізм візуалізації Razor та ін.

Після входу до системи користувач повинен вибрати базовий період роботи. Для кожної з печей цеху можна переглянути інформацію про основні техніко-економічні показники, склад чавуну та показники теплового, шлакового, дуттєвого та газодинамічного режимів доменної плавки в базовому періоді.

За замовчуванням відображаються лише показники, що використовуються у моделі оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей.

На основі існуючих періодів можна створювати нові періоди роботи, при цьому користувач може змінити як звітні, так і розрахункові показники роботи.

Для базового періоду можна розрахувати оптимальні витрати природного газу та технологічного кисню. Для розрахунку задаються резерви з природного газу, кисню та коксу в цеху, а також необхідне середньодобове виробництво чавуну. Результати відображаються у чисельному та графічному вигляді.

Прогнозування роботи комплексу доменних печей та оптимальне розподілення ресурсів у проєктному періоді здійснюється на вкладці «Налаштування проєктного періоду», де послідовно вводиться інформація про плановані умови роботи печей та цеху в цілому. При цьому за умовчанням у редагованих осередках умов роботи в проєктному періоді підставляються відповідні значення базового періоду.

На першому етапі здійснюється завдання виробництва чавуну на кожній доменній печі, при цьому тут же розраховується загальний обсяг виробництва цеху.

На наступному етапі здійснюється завдання характеристик гарячого дуття на кожній печі. Вологість дуття визначається за таблицею значень сезонної вологості повітря в районі міста Магнітогорська, при цьому можливе коригування вологості дуття на будь-якій печі.

Далі здійснюється встановлення допустимого діапазону частки котунів у шихті на кожній печі, а також хімічного складу та властивостей компонентів шихти, при цьому вводяться:

- гранулометричний склад залізорудних матеріалів (25-50 мм, 15-25 мм, 5-15 мм, менше 5 мм) і коксу (більше 80 мм, 60-80 мм, 40-60 мм, 25-40 мм, менше 25 мм);

- хімічний склад залізорудних матеріалів та флюсів;

- технічний склад коксу та хімічний склад золи коксу.

Потім здійснюється завдання обмежень на цех в цілому за надходженням (витратою) залізорудних матеріалів, флюсів та коксу, введення резервів технологічного кисню та природного газу. Для кожного компонента можливі два варіанти введення: надходження за період або середня питома витрата загалом по цеху. У разі введення середньої питомої витрати необхідні резерви

компонента розраховуються за введеною на попередньому етапі продуктивністю цеху.

На наступному етапі задаються обмеження працювати кожної з печей цеху, тобто. на тепловий, дуттєвий, газодинамічний і шлаковий режими, а також на якість чавуну, що виплавляється. У системі передбачена можливість вибору обмежень, які враховуватимуться під час вирішення завдання лінійного програмування.

Після завдання умов роботи у проєктному періоді попередньо можна оцінити техніко-економічні показники, показники ходу теплообмінних, відновлювальних та газодинамічних процесів, процесів шлакоутворення доменної плавки окремих печей при зміні властивостей та складу шихтових матеріалів, температури та вологості дуття. Для їхнього розрахунку використовується розрахований за математичною моделлю доменного процесу в базовому періоді набір коефіцієнтів впливу. Передбачено ручне коригування коефіцієнтів впливу.

На наступному етапі відповідно до заданих умов вирішується завдання лінійного програмування та визначаються оптимальні витрати сировини та палива на кожній із печей.

4.3 Висновки за розділом 4

1. Аналіз програмних засобів для створення автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві показав, що програмна інфраструктура доменного цеху побудована на базі продуктів Microsoft. У цьому випадку економічно доцільне використання програмної платформи .NET Framework, а як СУБД SQL Server. Для ефективної розробки під час написання програмного коду обрано об'єктно-орієнтовану мову програмування C#.

2. Аналіз різних підходів до розв'язання задач математичного програмування мовою програмування C# стосовно оптимального розподілу

сировинних і паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві показав, що розв'язання складних математичних завдань раціонально вести з використанням сторонніх математичних пакетів. Зокрема, у програмному продукті, що створюється, використані обчислювальні можливості Microsoft Excel і MATLAB за рахунок їх інтеграції.

3. Розроблено модульну архітектуру автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей.

4. З використанням гнучкої методології розробки виконано кодування та налагодження програмного забезпечення системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві. Програмний продукт є веб-додатком, інтегрованим у існуючу інформаційну систему металургійного підприємства.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено метод оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів у комплексі доменних печей в умовах зміни кон'юнктури ринку сировини та палива, нестабільності складу та властивостей проплавлюваної залізорудної сировини, що використовується для аналізу та прогнозування роботи доменного цеху з метою зниження витрат на доменний переділ та підвищення його енергоефективності.

2. Розроблено математичну модель та створено сукупність алгоритмів для оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів між печами доменного цеху в умовах зміни характеристик дуття, складу та властивостей залізорудної сировини та палива. Модель враховує обмеження на тепловий, шлаковий, дуттєвий та газодинамічний режими доменних печей, а також їх взаємозв'язок один з одним.

3. Розроблено функціональну модель автоматизованої інформаційно-моделюючої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів доменного цеху з використанням системного підходу, методології IDEF0 та з урахуванням вимог інженерно-технологічного та управлінського персоналу металургійного підприємства.

4. Розроблено ПЗ автоматизованої системи оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей на основі синтезу із зовнішніми математичними пакетами та спеціалізованим ПЗ. Це забезпечило використання наявних у них алгоритмів розв'язання математичних завдань та моделювання процесів в окремих технологічних агрегатах. Виконано кодування та налагодження програмного продукту з використанням гнучкої методології розробки програмного забезпечення. Програмний продукт є веб-застосунком, який можна інтегрувати до існуючої інформаційної системи металургійного підприємства.

5. Досліджено метод управління розподілом сировинних і паливно-енергетичних ресурсів у доменному виробництві у нестабільними сировинними умовами.

6. Розроблена система оптимального розподілу сировинних та паливно-енергетичних ресурсів комплексу доменних печей призначена для управління доменним виробництвом. Результати магістерської роботи можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування складних енергонасичених комплексів у промисловості та для створення сучасних автоматизованих систем управління технологічними процесами, впровадження яких має важливе господарське значення та робить значний внесок у розвиток економіки країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Тубольцев Л. Г., Меркулов О. Є., Пригунова А. Г., Нарівський А. В. Концепція сталого розвитку чорної металургії України до 2050 року. *Метал та лиття України*. 2023. Том. 30. №. 4. С. 8 – 19.

2. Ярошенко Ю. Г., Спірін Н. О., Лавров В. В. Основні напрями ресурсо- та енергозбереження у доменном виробництві. *Чорна металургія. Бюлетень науково-технічної та економічної інформації*. 2016. № 5. С. 76-81.

3. Лісін В. С. Стратегічні орієнтири економічного розвитку чорної металургії у сучасних умовах. Економіка, 2005. 404 с.

4. Юсфін Ю. С. Основні напрями ресурсозбереження в доменному виробництві та його вплив на довкілля. *Сталь*. 2010. № 4. С. 12-13.

5. Геєрдес М., Ченьо Р., Курунов І. Сучасний доменний процес. Металургіздат, 2016. 280 с.

6. Большаков В. І. Технологія високоефективної енергозберігаючої доменної плавки. Київ : Наукова думка, 2007. 411 с.

7. Lida O., Taniyochi S., Hetani T. Application of a technique to blast furnace operation. *Kawasaki Steel Techn Dept.* 1992. № 26. С. 30-37.

8. Power D. J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. Americas Conference on Information Systems, Long Beach, California, 2000.

9. Edwards J. S. Expert Systems in Management and Administration – Are they really different from Decision Support Systems? *European Journal of Operational Research.* 1992. Vol. 61. Pp. 114-121.

10. Вегман Е. Ф., Жеребін Б. М., Похвиснев О. М. Металургія чавуну : підручник. Металлургия, 1989. 512 с.

11. Warren P., Harvey S. Development and implementation of a generic blast-furnace expert system. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2001. Pp. 43-49. DOI: 10.1179/mpm.2001.110.1.43.

12. Saarela A., Leiviska K., Ruuska J. Expert System for Taphole Plugging

in a Blast Furnace. *IFAC Proceedings Volumes*. 2003. Vol. 36, I. 24. Pp. 65-70.

13. Изюмский М. М., Васильєв О. П. Сучасні промислові системи автоматизації доменних печей світу. Теорія та практика виробництва чавуну: збірка праць міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг : КГГМК «Криворіжсталь». 2004. С. 48-68.

14. Соловьйов В. І., Краснобаєв В. О., Сарапулов Ю. О. Експертна система для діагностики та регулювання ходу доменної печі. Теорія та практика виробництва чавуну: збірка праць міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг : КГГМК «Криворіжсталь». 2004. С. 484-487.

15. Френкель М. М., Федулов Ю. В., Бєлова О. А. Експертна система управління ходом доменної плавки. *Сталь.* 1992. № 7. С. 15-18.

16. Лисієнко В. Г., Суханов Є. Л., Морозова В. О. Розвиток трирівневих АСУ ТП у металургії (коксові та безкоксові процеси) : навчальний посібник. Теплотехнік, 2006. 328 с.

17. Товаровський І. Г. Доменна плавка.Дніпропетровськ : Пороги, 2009. 765 с.

18. Рамм А. М. Сучасний доменний процес. Металургія, 1980. 304 с.

19. Рист А., Міссон М. Поєднана графічна інтерпретація матеріального та теплового балансів доменної печі. Чорна металургія: експрес-інформація ВІНІТІ. 1968. № 13, реф. 79. С.14-41.

20. Курунов І.Ф., Ященко С. Б. Методика розрахунку техніко-економічних показників доменної плавки. Наукові праці інституту сталі та сплавів. 1983. № 152. С.57-64.

21. Пісі Дж.Г., Давенпорт В.Г. Доменний процес. Теорія і практика : пер. с англ. Металлургия, 1984. 142 с.

22. Ченцов О. В., Чесноков Ю. О., Шаврін С. В. Балансова логіко-статистична модель доменного процесу. Наука, 1991. 92 с.

23. Мойкін В. І., Бабушкин М. М., Бобовіков Б. О. Динамічні характеристики доменних печей за наслідками математичного моделювання. *Підвищення продуктивності та економічності роботи теплових*

металургійних агрегатів : збірник наукових праць. 1984. С. 46-52.

23. Мойкін В. І., Бабушкин М. М., Бобовіков Б. О. Визначення динамічних характеристик доменного процесу за допомогою математичної моделі. *Підвищення продуктивності та економічності роботи теплових металургійних агрегатів* : збірник наукових праць. 1984. С. 42-46.

25. Мойкін В. І., Бабушкин М. М., Бобовіков Б. О. Аналіз роботи доменної печі на комбінованому дутті із застосуванням методу математичного моделювання. *Сталь.* 1984. № 4. С. 9-14.

26. Мойкін В. І., Бабушкин М. М., Бобовіков Б. О. Теплотехнічний аналіз роботи доменної печі на металізованій шихті методом математичного моделювання. *Сталь*. 1978. № 11. С. 982-986.

27. Ярошенко Ю. Г., Спірін М. О., Лавров В. В., Дмитрієв О. М., Гордон Я. М. Основні напрямки ресурсо- та енергозбереження в доменному виробництві Чорний металургії. Бюлетень науково-технічної та економічної інформації. 2016. – № 5. С. 76-81.

28 Лисін В. С. Стратегічні орієнтири економічного розвитку чорної металургії у сучасних умовах. Економіка, 2005. 404 с.

29. Юсфін Ю. С. Основні напрямки ресурсозбереження у доменном виробництві та його вплив на довкілля. *Сталь*. 2010. № 4. С. 12-13.

30. Лисієнко В. Г., Волков В. В., Гончаров О. Л. Математичне моделювання теплообміну в печах та агрегатах. Київ : Наукова думка, 1984. 232 с.

31. Лисієнко В. Г., Волков В. В., Маліков Ю. К. Поліпшення паливного використання та управління теплообміном у металургійних печах. Металургія, 1988. 231 с.

32. Цирлін А. М. Оптимальне управління технологічними процесами: навч. посібник для вузів. 1986. 400 с.

33. Рей У. Методи керування технологічними процесами: пров. з англ. Мир, 1983. 368 с.

34. Таха Х. А. Введення у дослідження операцій : в 2 т. Мир, 1985. 479 с.

35. Цимбал В. П. Математичне моделювання металургійних процесів. Металургія, 1986. 240 с.

36. Рейклейтис, Г. Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимізації в техниці. Мир, 1986. 350 с.

37. Андронов, В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс / В.Н. Андронов. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 377 с.

38. Салихов З.Г. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами: монография / З.Г. Салихов, Г.Г. Арунянц, Л.А. Рутковский. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 496 с.

39. Ведение доменной плавки. Технологическая инструкция

40. Douglas T. Ross. Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1977. SE-3(1), pp. 16-34.

41. Douglas T. Ross, Kenneth E. Schoman Jr. Structured Analysis for Requirements Definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 1977. SE-3(1), pp. 6-15.

42. Douglas T. Ross. Applications and Extensions of SADT (Structured Analysis and Design Technique). 1984.

43. Китаєв Б. І., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Д. Теплообмін у доменній печі. Металургія, 1966. 355 с.

44. Китаєв Б. І., Ярошенко Ю. Г., Суханов О. Л. Теплотехніка доменного процесу. Металургія, 1978. 248 с.

45. Загайнов С. О., Онорин О. П., Гілева Л. Ю. Розробка та впровадження математичного та програмного забезпечення для гнучких технологічних режимів роботи доменних печей. *Сталь*. 2000. № 9. С. 12-15.

46. Spirin N. O., Lavrov V. V., Kosachenko I. E. Software for the raw-materials management system in blast- furnace smelting. *Metallurgist.* 2015. Vol. 59, I. 1. Pp. 104-112.

47. Lavrov V. V., Spirin N. O., Burykin A. A. Automatic control software

for the blast-furnace shop. *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45, I. 9. Pp. 669-673.

48. Фримен А. ASP.NET Core MVC з прикладами на C# для професіоналів. 2017. 992 с.

49. Фримен А. ASP.NET MVC 5 з прикладами на C# 5.0 для професіоналів. 2018. 736 с.

50. Чамберс Д., Пекетт Д., Тиммс С. ASP.NET Core. Розробка застосунків. 2018. 464 с.

51. Айвалиотис, Д. Адміністрування сервера. 2013. 288 с.

52. Ішметьєв Є. М., Романенко О. В., Волщуков Ю. М. Інтеграція як каталізатор розвитку класових систем. *Автоматизація у промисловості*. 2013. № 8. С. 47-50.

ДОДАТОК А

Пофакторний аналіз показників доменної плавки

Таблиця А.1 – Таблиця пофакторного рахунку за технологічною інструкцією

Заходи	Зміни, %	
	Витрати коксу	Продуктивність
Збільшення масової частки заліза в рудній маси на 1 %	– 1,0	+ 1,7
Зниження частки сирої руди у шихті на 1 %	– 0,2	+ 0,2
Підвищення температури дуття на 100º у межах: 800 – 900 ºС 901 – 1000 ºС 1001 – 1100 ºС 1101 – 1200 ºС	 – 3,3 – 3,0 – 2,3 – 2,0	 + 2,0 + 1,5 + 1,2 + 1,0
Підвищення тиску газу під колошником на 0,1 кг/см^2 (0,01 Мпа)	– 0,2	+ 1,0
Зниження масової частки кремнію в чавуні на 0,1 %	– 1,2	+ 1,2
Зниження масової частки сірки у чавуні на 0,01 %	+ 1,0	– 1,0
Збільшення масової частки фосфору в чавуні на 0,1 %	+ 1,2	– 1,2
Збільшення масової частки марганцю в чавуні на 0,1 %	+ 0,2	– 0,2
Збільшення масової частки титану в чавуні на 0,1 %	+ 1,3	– 1,3
Збільшення вологості дуття на 1 г/м^3 (без збільшення температури дуття)	+ 0,15	– 0,07
Збільшення витрати природного газу на 1 м^3/т	– 0,7	
Виведення з шихти 10 кг/т вапняку	– 0,5	+ 0,5
Збільшення об'ємної частки кисню у дутті на 1 %	+ 0,3	+ 2,1
Зниження масової частки дрібниці (фракції 0-5 мм) у рудній масі на 1 %	– 0,5	+ 1,0
Зменшення масової частки золи в коксі в межах: 11 – 12 % 12 – 13 %	 – 1,5 – 2,0	 + 1,5 + 1,8
Зменшення масової частки сірки в коксі на 0,1 %	– 0,3	+ 0,3
Зниження часу простоїв на 1 %	– 0,5	+ 1,5
Зниження часу тихого ходу на 1 %	– 0,5	+ 1,0
Зниження часу низького тиску на 1 %	– 0,5	+ 0,8
Підвищення міцності коксу по фракції 25 на 1 %	– 0,6	+ 0,6
Зменшення стирання коксу по фракції 10 на 1 %	– 2,8	+ 2,8