МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз ефективності використання електроенергії в умовах сталеплавильного цеху

Виконав: студент 4 курсу,
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Бриль О. Ю.
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Саблін О.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент С.В. Башлій _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Потебні Ю.М._____
Кафедра____електричної інженерії та кіберфізичних систем_____
Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський) рівень_____
Спеціальність __141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка_
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
к.т.н., доц._____Д.М. Морозов
«_____»_____2026__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____Брилю Олександру Юрійовичу_____
(прізвище, ім`я, по батькові)
Тема роботи Аналіз ефективності використання електроенергії в умовах сталеплавильного цеху_____
керівник роботи ___Саблін Олег Юрійович, д.т.н., проф_____
(прізвище, ім`я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_»_грудня__2025__року №_1833 - с_____
1 Строк подання студентом роботи _____11 червня 2026 р._____
2 Вихідні дані до роботи: Номінальна потужність пічного трансформатору, максимальній струм на електроді, діаметр електроду, питомі витрати електроенергії на розплавлення 1т шихти.
3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Огляд технологічного циклу виробництва 2) Аналіз існуючої організації обліку, споживання та втрат енергетичних ресурсів 3) Розробка автоматизованої системи контролю та обліку енергетичних ресурсів для технологічного циклу виробництва.
4 Перелік графічного матеріалу _1) Дугова сталеплавильна піч типу ДСП-50 2) Річне споживання електроенергії цехом 3) Підігрівач скрапу 4) зовнішній вигляд перетворювача частоти fdu "Emotron" 5) Схема підключення перетворювача частоти 6) Техніко-економічні показники підвищення ефективності електроспоживання цеху.
5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Саблін О.І. д.т.н. проф.		
Розділ 2	Саблін О.І. д.т.н. проф.		
Розділ 3	Саблін О.І. д.т.н. проф.		

6 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд технологічного циклу виробництва	01.03.2026	
2	Аналіз існуючої організації обліку, споживання та втрат енергетичних ресурсів	01.04.2026	
3	Розробка автоматизованої системи контролю та обліку енергетичних ресурсів для технологічного циклу виробництва	10.05.2026	

Студент _____ (підпис) _____ О. Ю. Бриль (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ (підпис) _____ О.І. Саблін (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ (підпис) _____ С.В. Башлій (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 86 с., 12 рисунків, 12 таблиць, 23 джерел.

У дипломній роботі комплексно розглянуто особливості виробничої діяльності та структуру енергоспоживання ПрАТ «Дніпроспецсталь». Проведено енергетичний аудит основних технологічних процесів підприємства, досліджено фактичні обсяги й режими споживання паливно-енергетичних ресурсів, визначено найбільш енергоємні ділянки та основні джерела енергетичних втрат. За результатами виконаного аналізу сформульовано висновки щодо можливих напрямів підвищення енергоефективності виробництва та запропоновано відповідні енергозберігаючі заходи.

На підставі оцінювання втрат енергоресурсів у сталеплавильному цеху № 2 обґрунтовано доцільність утилізації теплоти відхідних газів електросталеплавильного виробництва. Запропоновано застосування теплообмінного обладнання для використання вторинної теплової енергії з метою попереднього підігрівання металевого скрапу, шихтових матеріалів, що завантажуються до печі, а також води для виробничих і господарських потреб. Окремо проаналізовано можливість упровадження регульованого електропривода двигуна димососа витяжної системи електропечі, що дає змогу узгоджувати його продуктивність із фактичним технологічним навантаженням та скорочувати непродуктивне споживання електроенергії.

У розділі техніко-економічного обґрунтування виконано розрахунок ефективності реалізації запропонованих заходів. Наведено очікувані показники економії енергоресурсів і фінансових витрат, визначено величину річного економічного ефекту та розраховано орієнтовні строки окупності відповідних технічних рішень.

ЕЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНА ПІЧ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ЕНЕРГОРЕСУРСИ, ТЕПЛООБМІННИК, УТИЛІЗАЦІЯ, ЕЛЕКТРОДВИГУН, ВАННА ПЕЧІ, ДАТЧИКИ СТРУМУ І НАПРУГИ

ЗМІСТ

Вступ 7
1 Огляд технологічного циклу виробництва.....12
2 Аналіз існуючої організації обліку, споживання та втрат енергетичних ресурсів.....31
2.1 Аналіз енергоспоживання цехом СПЦ №2 31
2.2 Оцінка основних напрямів діяльності по зменшенню енерговитрат в цеху СПЦ №2…….39
3 Розробка рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання цеху 50
3.1 Використання установки попереднього підігріву скрапу та шихти...50
3.2 Аналіз доцільності застосування регульованого приводу в двигуні витяжної системи печі ДСП-50.....62
3.2.1 Огляд та аналіз недоліків існуючої схеми роботи витяжної системи печі……...62
3.2.2 Основні шляхи підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів…….……67
3.2.3. Вибір частотного перетворювача швидкості обертання вентилятора……67
Висновки.....80
Список використаних джерел.....84

ВСТУП

Електросталеплавильний спосіб посідає провідне місце у виробництві якісних, високолегованих і спеціальних сталей. Завдяки своїм технологічним особливостям він дає можливість одержувати метал практично будь-якого заданого хімічного складу та забезпечувати високі показники його якості. Використання електричних печей дозволяє виплавляти сталь із низьким вмістом сірки, фосфору, кисню, газів, неметалевих включень та інших небажаних домішок, які негативно впливають на механічні, фізичні й експлуатаційні властивості готової продукції.

Особливе значення електросталеплавильне виробництво має під час виготовлення легованих сталей, до складу яких вводять значну кількість спеціальних елементів. До таких елементів належать хром, нікель, марганець, кремній, молібден, вольфрам, ванадій, титан, цирконій та інші компоненти. Їх використання дає змогу підвищувати міцність, твердість, зносостійкість, жаростійкість, корозійну стійкість та інші важливі властивості металу. Саме тому електроплавлення широко застосовується для виробництва інструментальних, конструкційних, нержавіючих, жароміцних та інших спеціальних сталей, які використовуються в машинобудуванні, енергетиці, авіаційній, хімічній та металургійній промисловості.

Основні переваги електроплавлення порівняно з іншими способами сталеплавильного виробництва безпосередньо пов’язані з використанням електричної енергії як основного джерела нагрівання металу. Виділення теплоти в електричних печах відбувається безпосередньо в металевій ванні або поблизу поверхні матеріалу, що нагрівається. Такий принцип перетворення електричної енергії на теплову забезпечує високу концентрацію потужності в порівняно невеликому робочому об’ємі печі.

Завдяки цьому метал можна нагрівати з високою швидкістю до температур, необхідних для його повного розплавлення та проведення

рафінувальних процесів. Висока інтенсивність нагрівання скорочує тривалість плавки, підвищує продуктивність агрегату та створює сприятливі умови для керування технологічним режимом. Крім того, електрична піч дозволяє вводити значні обсяги легуючих матеріалів і точно підтримувати необхідну температуру металу на різних етапах технологічного циклу.

Важливою перевагою електросталеплавильного процесу є можливість створення в робочому просторі печі відновної або нейтральної атмосфери, а також застосування безокиснювальних шлаків. Такі умови сприяють зменшенню окиснення металу та втрат цінних легуючих компонентів. Унаслідок цього знижується угар хрому, марганцю, кремнію, ванадію та інших елементів, а їх засвоєння металом відбувається ефективніше. Це має особливе економічне значення під час виробництва високолегованих сталей, оскільки легувальні матеріали характеризуються високою вартістю.

Електроплавлення також забезпечує сприятливі умови для глибокого розкислення металу. У процесі плавки зменшується вміст розчиненого кисню та кількість неметалевих включень, що сприяє підвищенню чистоти й однорідності сталі. Застосування відповідних шлакових режимів дозволяє ефективно здійснювати десульфурацію, тобто видалення сірки з металевої ванни. У результаті одержують сталь із високими показниками пластичності, ударної в’язкості, міцності та надійності.

Електричні печі краще, ніж більшість інших сталеплавильних агрегатів, пристосовані для перероблення металевого брухту. Практично весь робочий об’єм печі може бути заповнений твердою металевою шихтою, що не створює суттєвих перешкод для процесу її подальшого розплавлення. Це дає змогу ефективно використовувати вторинну металеву сировину, зменшувати потребу в первинному чавуні та сприяти раціональному використанню природних ресурсів.

Окрім металевого брухту, до складу шихти можуть входити металізовані окатиші, губчасте залізо та інші залізовмісні матеріали. Металізовані окатиші, які частково або повністю замінюють металевий лом, можуть безперервно

подаватися в електропіч за допомогою автоматизованих дозувальних і транспортних пристроїв. Безперервне завантаження матеріалів сприяє стабілізації теплового режиму печі, скороченню тривалості плавки, зменшенню втрат теплоти та підвищенню продуктивності сталеплавильного агрегату.

До переваг електросталеплавильного виробництва слід також віднести можливість досить точного контролю та регулювання теплового стану металевої ванни. Витрати електричної енергії, потужність електричних дуг, тривалість окремих технологічних операцій і температура металу можуть контролюватися за допомогою сучасних вимірювальних приладів та автоматизованих систем керування. Це дозволяє оперативно коригувати режим плавки залежно від складу шихти, необхідної марки сталі та фактичного стану металу.

Можливість автоматичного регулювання електричних і технологічних параметрів є важливою передумовою підвищення стабільності виробничого процесу. Застосування автоматизованих систем керування дозволяє зменшити вплив людського чинника, забезпечити повторюваність плавок, скоротити непродуктивні витрати енергії та підвищити якість готового металу. Сучасні системи можуть здійснювати контроль струмів і напруг електричних дуг, положення електродів, витрат кисню, природного газу, вуглецевмісних матеріалів, температури металу та складу відхідних газів.

Водночас електросталеплавильне виробництво належить до найбільш енергоємних технологічних процесів металургійної промисловості. Робочі температури в електричних сталеплавильних печах можуть досягати 1700 °C і більше. Для розплавлення шихти, перегрівання металу, утворення шлаку та проведення металургійних реакцій необхідні значні обсяги електричної й теплової енергії. Частина цієї енергії використовується безпосередньо в технологічному процесі, а інша частина втрачається через футерування печі, водоохолоджувальні елементи, відкриті отвори, випромінювання та винесення теплоти з відхідними газами.

Відхідні гази електросталеплавильних печей мають високу температуру та містять значний тепловий потенціал. За відсутності спеціального

теплоутилізаційного обладнання значна частина цієї теплоти безповоротно втрачається в навколишньому середовищі. Одночасно виникає необхідність охолодження газів перед їх очищенням і викидом в атмосферу, що потребує додаткових витрат електроенергії, води та інших ресурсів.

Тому одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності електросталеплавильного виробництва є утилізація теплоти відхідних газів. Отриману теплову енергію можна використовувати для попереднього нагрівання металевого брухту та інших компонентів шихти, підігрівання повітря, води, технологічних середовищ або виробництва пари. Попереднє нагрівання шихтових матеріалів дозволяє скоротити витрати електроенергії безпосередньо в печі, зменшити тривалість плавки, підвищити продуктивність обладнання та знизити собівартість сталі.

Використання теплоти відхідних газів може здійснюватися за допомогою рекуператорів, котлів-утилізаторів, теплообмінників та систем попереднього підігрівання металобрухту. Вибір конкретного технічного рішення залежить від конструкції печі, температури й складу газів, режиму роботи агрегату, наявності споживачів теплової енергії та економічної доцільності впровадження відповідного обладнання.

Актуальність упровадження енергозберігаючих технологій в Україні визначається високою енергоємністю промислового виробництва, значною вартістю енергетичних ресурсів і необхідністю зменшення залежності підприємств від зовнішнього енергопостачання. Підвищення ефективності використання енергії дає змогу не лише зменшити виробничі витрати, а й скоротити викиди шкідливих речовин і парникових газів, поліпшити екологічні показники підприємства та підвищити його конкурентоспроможність.

Таким чином, електросталеплавильний спосіб має значні технологічні переваги, забезпечує одержання високоякісних і високолегованих сталей та дозволяє гнучко керувати процесами нагрівання, плавлення і рафінування металу. Водночас високий рівень енергоспоживання та значні втрати теплоти з

відхідними газами обумовлюють необхідність комплексного вдосконалення енергетичного господарства електросталеплавильних цехів.

Особливу увагу доцільно приділяти впровадженню систем утилізації вторинної теплоти, модернізації електропічного обладнання, автоматизації регулювання режимів плавки, оптимізації роботи димососів і газоочисних установок, застосуванню частотно-регульованих електроприводів та постійному контролю питомих витрат енергоресурсів. Реалізація таких заходів сприятиме зниженню енергетичних витрат, підвищенню продуктивності обладнання, скороченню тривалості плавки та загальному зростанню енергоефективності електросталеплавильного виробництва.

1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЦИКЛУ ВИРОБНИЦТВА СТАЛІ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПІЧАХ

Технологія електричної плавки сталі формувалася та вдосконалювалася протягом кількох послідовних етапів. Її розвиток був безпосередньо пов’язаний із накопиченням теоретичних знань у галузі електрометалургії, удосконаленням конструкцій дугових сталеплавильних печей, підвищенням потужності пічних трансформаторів, механізацією допоміжних операцій і впровадженням автоматизованих систем керування. Кожний наступний етап розвитку електроплавки характеризувався скороченням тривалості технологічного циклу, зниженням питомих витрат електроенергії, підвищенням продуктивності агрегатів та поліпшенням якості готового металу.

На початковому етапі розвитку електросталеплавильного виробництва на підприємствах якісної металургії переважно застосовувалася так звана класична технологія виплавки сталі. Вона значною мірою ґрунтувалася на теоретичних положеннях і практичному досвіді німецької металургійної школи. Ця технологія передбачала чітке послідовне виконання окремих періодів плавки: завантаження та розплавлення шихти, окислення домішок, видалення окиснювального шлаку, формування відновного шлаку, розкислення, легування, доведення металу за температурою та хімічним складом, а також випуск готової сталі з печі.

Характерною особливістю класичної технології був тривалий окиснювальний період, під час якого швидкість окислення вуглецю підтримувалася на відносно низькому рівні. Одночасно значна увага приділялася збереженню певної концентрації марганцю в металевій ванні. Вважалося, що надмірне окислення марганцю або занадто інтенсивне видалення вуглецю може негативно впливати на подальший перебіг плавки та спричиняти повторне окислення металу.

Після завершення окиснювального періоду здійснювалося тривале розкислення металу під відновним шлаком. Передбачалося, що тривала взаємодія металевої ванни з відновним шлаком повинна забезпечувати глибоке видалення кисню, сірки та неметалевих включень. Однак на практиці така технологічна схема мала низку істотних недоліків. Через значну тривалість окиснювального і відновного періодів загальний час плавки був великим, що обмежувало продуктивність електродугових печей і підвищувало питомі витрати електричної енергії.

Крім того, тривале перебування металу в печі призводило до додаткових теплових втрат через футерування, водоохолоджувальні елементи, електродні отвори, робоче вікно та газовідвідний тракт. Збільшувалася також витрата електродів, вогнетривких матеріалів, шлакоутворювальних компонентів і легувальних добавок. Незважаючи на значну тривалість оброблення металу, необхідна якість сталі забезпечувалася не завжди. У готовому металі могли залишатися підвищені концентрації газів, неметалевих включень або небажаних домішок, а хімічний склад окремих плавок не завжди відповідав установленим вимогам.

Подальші теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу переглянути низку положень класичної технології. Було встановлено, що в окиснювальний період немає обґрунтованої необхідності штучно підтримувати вміст марганцю в металевій ванні на певному рівні. Також було доведено, що обмеження швидкості окислення вуглецю до низьких значень не завжди є технологічно доцільним. За умови правильного проведення процесу інтенсивне окислення вуглецю не спричиняє небезпечного повторного окислення рідкої сталі.

Прискорене окислення вуглецю супроводжується інтенсивним утворенням бульбашок оксиду вуглецю, які проходять крізь металеву ванну та спричиняють її кипіння. Таке кипіння забезпечує перемішування металу, вирівнювання температури й хімічного складу в усьому об’ємі ванни. Одночасно поліпшуються умови видалення розчинених газів і неметалевих включень, які

захоплюються висхідними газовими потоками та переходять у шлак або видаляються з печі разом із відхідними газами.

Інтенсивне кипіння металу сприяє також прискоренню тепло- і масообмінних процесів. Унаслідок цього скорочується тривалість окиснювального періоду, підвищується ефективність рафінування сталі та створюються сприятливі умови для подальшого розкислення і легування. Водночас для запобігання надмірному винесенню металу, утворенню викидів і пошкодженню футерування необхідно точно регулювати подавання кисню, висоту спіненого шлаку, електричну потужність дуг і температурний стан ванни.

Важливим етапом удосконалення технології стало обґрунтування переваг комбінованого розкислення сталі. На відміну від тривалого витримування металу під відновним шлаком, нова технологія передбачала поєднання кількох механізмів видалення кисню та неметалевих включень. Частина продуктів розкислення видалялася внаслідок їх укрупнення, спливання та осадження, тобто завдяки процесам седиментації. Інша частина переходила з металевої ванни в шлак у результаті міжфазної взаємодії металу зі шлаком.

Комбіноване розкислення дало можливість ефективніше використовувати феросплави та інші розкислювальні матеріали, скоротити тривалість відновного періоду і зменшити витрати електроенергії. Частину розкислювачів і легувальних компонентів почали вводити не лише безпосередньо в піч, а й у ківш під час випуску металу. Це забезпечило інтенсивне перемішування сталі падаючим струменем, поліпшило засвоєння легувальних елементів і знизило їх угар.

Застосування нового комплексу технологічних заходів дало змогу суттєво скоротити тривалість плавки, підвищити продуктивність електропечей і поліпшити якість сталі. Одночасно зменшилася тривалість перебування рідкого металу в агрегаті, що позитивно вплинуло на стійкість футерування та знизило непродуктивні втрати теплоти. Таким чином, відбувся поступовий перехід від повільної багатостадійної плавки до інтенсивного, форсованого та більш керованого процесу.

Одним із важливих досягнень вітчизняної електрометалургії стало успішне освоєння виплавки легованих і високолегованих сталей у великовантажних дугових електропечах місткістю близько 200 т. Раніше вважалося, що виробництво спеціальних марок сталі доцільно здійснювати переважно в печах малої або середньої місткості, оскільки в них легше забезпечити точне регулювання температури та хімічного складу металу. Однак розвиток пічного обладнання, засобів контролю й автоматизації продемонстрував можливість одержання високоякісної сталі і в агрегатах значної місткості.

Перехід до великовантажних печей дав змогу збільшити одиничну продуктивність сталеплавильних агрегатів, скоротити кількість плавок і підвищити ефективність використання виробничих площ. Водночас збільшення місткості печей потребувало застосування потужніших пічних трансформаторів, удосконалених систем електропостачання, ефективних механізмів переміщення електродів, сучасних газоочисних установок і більш надійних систем водяного охолодження.

Важливу роль у підвищенні техніко-економічних показників електроплавки відіграло широке впровадження передових енергозберігаючих технологій. Зменшення тривалості плавки, підвищення електричної потужності, скорочення простоїв, використання теплоти відхідних газів, попереднє підігрівання шихти та оптимізація режимів роботи електричних дуг дали змогу знизити питомі витрати енергії. У результаті зменшилася собівартість готової продукції та підвищилася конкурентоспроможність електросталеплавильного виробництва.

Значному вдосконаленню експлуатаційних характеристик дугових печей сприяло застосування продування металевої ванни киснем. Кисень почали подавати не лише в окиснювальний період, а й частково під час плавлення шихти. Його використання прискорює окислення вуглецю, кремнію, марганцю та інших домішок, супроводжується виділенням значної кількості теплоти й сприяє швидшому розплавленню твердих шматків металу.

Застосування кисню дозволяє частково замінити електричну енергію теплотою екзотермічних хімічних реакцій. Унаслідок цього скорочується час роботи печі під струмом, зменшуються витрати електроенергії та підвищується продуктивність агрегату. Крім того, кисневе продування забезпечує інтенсивне перемішування ванни, прискорює рафінувальні процеси та сприяє вирівнюванню температури металу.

Особливо ефективним використання кисню виявилося під час виплавки високолегованих сталей із застосуванням власних відходів виробництва. До таких відходів належать обрізь, стружка, браковані заготовки, зливки та інші матеріали, які містять значну кількість цінних легувальних елементів. Їх повторне використання дає змогу зменшити витрати дорогих феросплавів і підвищити коефіцієнт використання вторинної сировини.

Водночас перероблення високолегованих відходів потребує суворого контролю окиснювального режиму, оскільки надмірне продування може призвести до значного угару хрому, марганцю, ванадію та інших цінних елементів. Тому подавання кисню здійснюється з урахуванням складу шихти, температури ванни, необхідної інтенсивності зневуглецювання та заданого хімічного складу готової сталі.

Для сучасної технології виробництва електросталі характерною є форсована плавка, що базується на комплексному використанні електричної, хімічної та теплової енергії. Основним завданням такої технології є максимально швидке розплавлення шихти та доведення металу до заданих параметрів за мінімальних витрат енергетичних і матеріальних ресурсів.

Для прискорення плавлення в багатьох печах застосовуються газокисневі пальники. Вони встановлюються в стінах або на інших елементах корпусу печі та спрямовують високотемпературне полум’я на ділянки шихти, які повільніше прогріваються електричними дугами. Використання пальників дає змогу вирівняти нагрівання металобрухту, скоротити тривалість початкового періоду плавлення та зменшити витрати електричної енергії.

Сучасна технологія також передбачає раннє утворення шлаку. Шлакоутворювальні матеріали вводять уже на початку або в процесі плавлення шихти. У результаті періоди плавлення та окислення частково поєднуються, що скорочує загальну тривалість технологічного циклу. Формування спіненого шлаку сприяє зануренню електричних дуг, зменшенню теплового випромінювання на стіни та склепіння печі, підвищенню засвоєння електричної енергії металевою ванною і зниженню рівня шуму.

Важливою характеристикою сучасної електроплавки є інтенсивне кипіння ванни. Воно забезпечує активний масообмін між металом, шлаком і газовою фазою, прискорює зневуглецювання, видалення газів та неметалевих включень. Кипіння також забезпечує перемішування металу і зменшує температурну нерівномірність у різних зонах печі.

Відновний період у сучасних технологічних схемах значно скорочений. Частина операцій з розкислення, десульфурації, легування та коригування температури переноситься з дугової печі в сталерозливний ківш або спеціальні агрегати позапічної обробки. До таких агрегатів належать установки «ківш-піч», вакууматори, установки продування інертними газами та інше обладнання вторинної металургії.

Перенесення частини металургійних операцій за межі дугової печі дозволяє використовувати її переважно як високопродуктивний агрегат для розплавлення шихти та первинного рафінування металу. У результаті скорочується тривалість плавки, підвищується річна продуктивність печі, зменшується витрата електродів і вогнетривких матеріалів. Водночас позапічна обробка забезпечує точніше доведення сталі за температурою, хімічним складом і вмістом неметалевих включень.

У процесі розвитку електросталеплавильного виробництва постійно збільшувалися місткість і потужність дугових печей. Значна частина електросталі та феросплавів виплавляється в агрегатах, електрична потужність яких становить десятки тисяч кіловат. Підвищення потужності пічних

трансформаторів дозволяє збільшувати активну потужність електричних дуг і скорочувати тривалість плавлення шихти.

У технічній літературі також наводяться відомості про створення особливо великих електропічних агрегатів і комплексів значної продуктивності. Проте ефективність печі визначається не лише її місткістю або встановленою потужністю. Важливими показниками є питомі витрати електроенергії, тривалість плавки, стійкість футерування, витрата електродів, вихід придатного металу, ефективність газоочищення та рівень автоматизації технологічного процесу.

Нові й модернізовані електродугові печі характеризуються високим ступенем механізації основних і допоміжних операцій. Механізація дає змогу скоротити тривалість завантаження матеріалів, відбору проб, очищення робочого вікна, видалення шлаку, ремонту укосів і заправлення футерування. Одночасно поліпшуються умови праці персоналу, оскільки зменшується необхідність перебування працівників поблизу високотемпературного агрегату.

Впровадження автоматизованих систем керування створює передумови для комплексного контролю плавки. Сучасні системи отримують інформацію про електричні параметри печі, положення електродів, температуру металу, склад відхідних газів, витрати кисню, природного газу, вуглецевмісних і шлакоутворювальних матеріалів. На основі цих даних автоматично коригуються потужність дуг, подавання кисню, положення електродів і тривалість окремих операцій.

Застосування комп’ютеризованих систем автоматизованого керування та виробничого планування дає можливість значною мірою автоматизувати весь технологічний цикл. Такі системи забезпечують формування шихти, розрахунок матеріального й теплового балансів, вибір оптимального електричного режиму, контроль виконання технологічних операцій і збереження інформації про кожну плавку. Це полегшує роботу обслуговуючого персоналу, підвищує відтворюваність результатів і зменшує вплив людського чинника.

До основних конструктивних і технологічних особливостей сучасних електродугових печей належать механізоване завантаження шихти через верхню частину агрегату, наявність механізованих приводів для виконання робочих операцій, живлення від спеціальних понижувальних пічних трансформаторів, автоматичне регулювання переміщення електродів та застосування систем перемішування металевої ванни.

Механізоване завантаження шихти через верхню частину печі виконується за допомогою спеціального завантажувального кошика або бадді. Для здійснення цієї операції склепіння печі разом з електродами відводиться вбік, після чого кошик установлюється над робочим простором і його днище відкривається. Такий спосіб дозволяє швидко завантажувати значний обсяг металобрухту та скорочувати період простою печі між плавками.

Після завершення завантаження склепіння повертається в робоче положення, електроди опускаються до шихти й починається процес запалювання електричних дуг. Механізація цієї операції підвищує точність установлення обладнання, зменшує тривалість завантаження та підвищує безпеку персоналу.

Механізовані приводи використовуються для нахилу корпусу печі, повороту склепіння, переміщення електродів, відкривання та закривання робочого вікна, випуску металу й виконання інших операцій. Залежно від конструкції агрегату застосовуються гідравлічні, електромеханічні або пневматичні системи. Найбільшого поширення набули гідравлічні приводи, які забезпечують значні зусилля, плавність руху та високу швидкодію.

Живлення дугових печей здійснюється від спеціальних понижувальних трансформаторів, що мають широкий діапазон регулювання вторинної напруги. Зміна ступеня напруги дозволяє вибирати оптимальне співвідношення струму та довжини дуги для різних періодів плавки. На початку розплавлення шихти використовують режими, які забезпечують стійке горіння дуг і зменшують ризик їх обриву, а після утворення рідкої ванни переходять до режимів максимальної активної потужності.

Автоматичне керування переміщенням електродів є необхідною умовою стабільної роботи дугової печі. Під час плавлення положення шихти безперервно змінюється, шматки металу обвалюються, а довжина дуг коливається. Система регулювання повинна швидко переміщувати електроди, підтримуючи задані значення струму, напруги або повного опору дугового кола.

Ефективна робота регуляторів електродів зменшує кількість коротких замикань і обривів дуг, знижує електродинамічні навантаження на обладнання та поліпшує використання потужності пічного трансформатора. Одночасно скорочуються коливання напруги в системі електропостачання і зменшується негативний вплив печі на якість електроенергії підприємства.

У печах середньої та великої місткості може застосовуватися електромагнітне перемішування металу. Під дією змінного магнітного поля в рідкому металі виникають електромагнітні сили, які приводять ванну в рух. Перемішування забезпечує вирівнювання температури та хімічного складу, прискорює розчинення легувальних добавок і поліпшує умови взаємодії металу зі шлаком.

Для перемішування ванни також використовують продування інертними газами через пористі пробки, установлені в днищі печі або ковша. Найчастіше для цього застосовують аргон. Газове перемішування сприяє видаленню неметалевих включень, вирівнюванню складу металу та підвищенню ефективності розкислення і десульфурації.

Практично всі електродугові печі, крім агрегатів малої місткості, оснащуються механізованими системами завантаження шихти. Для відкривання робочого простору склепіння печі повертається навколо вертикальної осі або переміщується разом із порталом електродів. Конкретна конструкція механізму залежить від місткості печі, компонування цеху та прийнятої схеми завантаження.

Печі місткістю 25 т і більше можуть оснащуватися механізмами повороту або нахилу корпусу та окремих елементів робочого простору. Такі механізми сприяють прискоренню плавлення, забезпечують рівномірніше теплове

навантаження на футерування та зменшують локальне руйнування подини. Нахил печі використовується також для випуску металу і видалення шлаку.

Переміщення електродів у печах різної місткості здійснюється гідравлічними або електромеханічними приводами. Вони повинні забезпечувати високу швидкість опускання і піднімання електродів, точність позиціонування та надійну роботу в умовах пилу, високої температури й значних електромагнітних навантажень.

Печі місткістю від 25 до 200 т та більше оснащуються механізованими системами подавання шлакоутворювальних і легувальних матеріалів. Матеріали можуть подаватися через склепіння, робоче вікно, спеціальні бункери, жолоби або інжекційні пристрої. Дозоване введення вапна, доломіту, вуглецевмісних матеріалів і феросплавів підвищує точність ведення плавки та зменшує витрати сировини.

Механізації підлягають також операції заправлення укосів і подини печі. Пошкоджені ділянки футерування відновлюються за допомогою спеціальних заправних машин, які подають вогнетривку масу у визначені зони робочого простору. Це скорочує тривалість ремонту між плавками, підвищує стійкість футерування та зменшує потребу в ручній праці.

Видалення шлаку з печі здійснюється через робоче вікно, шлаковий отвір або спеціальний жолоб. У сучасних агрегатах для цього використовують механізовані шлаковидалювальні машини, шлакові чаші та транспортні системи. Своєчасне видалення окиснювального шлаку є важливою умовою запобігання поверненню небажаних домішок із шлаку в метал і забезпечення стабільного перебігу відновних процесів.

Таким чином, сучасна електроплавка є складним високомеханізованим і автоматизованим технологічним процесом, у якому поєднуються електричне нагрівання, кисневе продування, використання газокисневих пальників, раннє шлакоутворення, перемішування металу та позапічна обробка. Комплексне застосування цих заходів забезпечує скорочення тривалості плавки, зменшення

питомих витрат енергоресурсів, підвищення продуктивності обладнання та стабільне отримання сталі заданої якості.

Основні технічні характеристики електродугових печей, що застосовуються у вітчизняній електрометалургії, зокрема їх місткість, потужність пічних трансформаторів, діапазони вторинної напруги, витрати електроенергії та інші експлуатаційні показники, наведено в таблиці 1.1.

Основні властивості печей, що застосовуються у вітчизняній електрометалургії, наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні характеристики електросталеплавильних пічей

Характерний параметр	3 т	6 т	12 т	25 т	50 т	100 т	200 т
Номінальна місткість печі, т	3	6	12	25	50	100	200
Номінальна потужність пічного трансформатора, МВА	2,0	4,0	8,0	12,5	20,0	32,0	50–80
Питома потужність пічного трансформатора, кВА/т	667	667	667	500	400	320	250–400
Межі вторинної напруги трансформатора, В	242–116	280–115	320–120	390–132	430–116	480–150	560–140
Середнє значення вторинної напруги, В	179,0	197,5	220,0	261,0	273,0	315,0	350,0
Кратність регулювання вторинної напруги	2,09	2,43	2,67	2,95	3,71	3,20	4,00
Максимальний струм одного електрода, кА	4,7	8,2	14,4	18,6	26,9	38,5	43,3
Кількість електродів для трифазної печі, шт.	3	3	3	3	3	3	3
Діаметр електрода, мм	200	300	350	400	500	550	610
Площа поперечного перерізу електрода, см²	314,2	706,9	962,1	1256,6	1963,5	2375,8	2922,5
Максимальна густина струму в електроді, А/см²	15,0	11,6	15,0	14,8	13,7	16,2	14,8
Питомі витрати електроенергії на розплавлення 1 т шихти, кВт·год/т	525	500	470	460	440	415	400
Розрахункові витрати електроенергії на одну плавку, МВт·год	1,575	3,000	5,640	11,500	22,000	41,500	80,000

Аналіз наведених характеристик показує, що зі збільшенням місткості електросталеплавильної печі зростають номінальна потужність пічного трансформатора, вторинна напруга, струм електродів та їхній діаметр. Водночас

питома потужність трансформатора, віднесена до однієї тонни місткості печі, загалом зменшується. Для печей місткістю 3–12 т цей показник становить близько 667 кВА/т, тоді як для печі місткістю 100 т він знижується до 320 кВА/т.

Зі збільшенням місткості печі також знижуються питомі витрати електроенергії на розплавлення шихти. Для печі місткістю 3 т вони становлять приблизно 525 кВт·год/т, а для печі місткістю 200 т — близько 400 кВт·год/т. Зниження питомого електроспоживання пояснюється відносним зменшенням теплових втрат через футерівку та поверхню печі, більш повним використанням потужності трансформатора, стабільнішим горінням електричних дуг і підвищенням загальної продуктивності плавильного агрегату.

Розрахункові витрати електроенергії на одну плавку, навпаки, збільшуються пропорційно місткості агрегату. Так, для печі місткістю 3 т необхідно приблизно 1,575 МВт·год електричної енергії, а для печі місткістю 200 т — близько 80 МВт·год. Наведені значення характеризують переважно електроенергію, необхідну для розплавлення шихти, і не враховують додаткового споживання допоміжними механізмами, системами газоочищення, охолодження, нахилу печі, переміщення електродів та іншими установками.

Збільшення діаметра електродів від 200 до 610 мм забезпечує можливість пропускання значних струмів без надмірного нагрівання та руйнування графітового матеріалу. Незважаючи на суттєве збільшення абсолютного струму, розрахункова густина струму для більшості розглянутих печей залишається в межах приблизно 12–16 А/см². Це свідчить про узгоджене збільшення діаметра електродів відповідно до потужності та місткості електропічного агрегату.

Розширення діапазону регулювання вторинної напруги трансформатора необхідне для забезпечення різних технологічних режимів плавки. На початковій стадії, коли електроди занурюються в металеву шихту, застосовують нижчі ступені напруги для обмеження струмових поштовхів і підвищення стійкості дуги. Після утворення колодязів у шихті та формування рідкої ванни напругу підвищують, збільшуючи довжину дуги та активну потужність, що передається металу.

Застосування сучасних високовогнетривких матеріалів дало змогу підвищити стійкість футеровки печей із водоохолоджуваними елементами у 2–3 рази. Вогнетривку кладку подини виконують із магнезитової або кремнеземної цегли, вибір якої залежить від прийнятого типу футеровки печі.

Товщина футеровки склепіння становить 200–300 мм для печей невеликої місткості та 380–460 мм для великих печей. Загальна товщина стін у зоні укосів дорівнює приблизно 330 мм для малих печей і до 600 мм для великих. При цьому частка вогнетривкого шару становить близько 60–70 % загальної товщини стінки. Поперечний переріз печі наведено на рисунку 1.1.

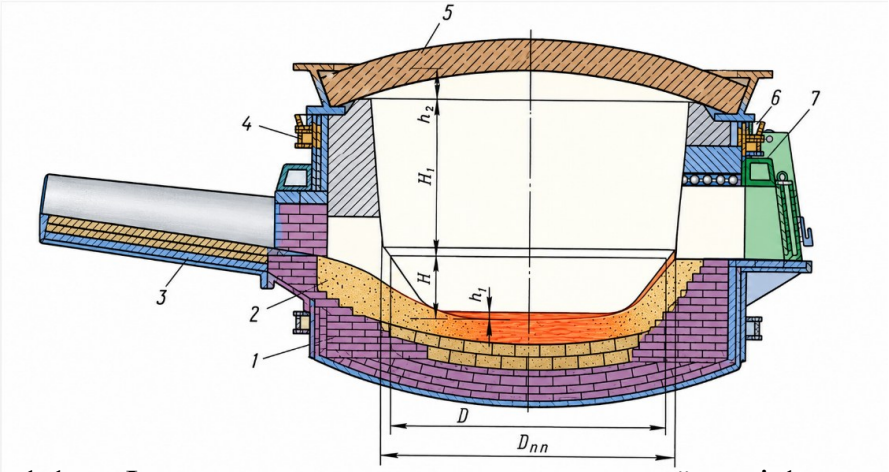


Рисунок 1.1 – Футеровка електросталеплавильної печі:1 — магнезитова кладка пода; 2 — магнезитова набойка поду; 3 — шамотна футеровка желобу; 4 — магнезитовий блок; 5 — дінасовий свод; 6 — пісчаний затвор; 7 — арка робочого вікна.

За умов простою плавильного агрегату при температурі 1500–1600 °С вогнетривка футеровка печі зберігає значну кількість акумульованої теплової енергії. Це свідчить про наявність суттєвого потенціалу використання накопиченої теплоти для підвищення загальної енергоефективності сталеплавильного виробництва.

ПрАТ «Дніпроспецсталь» належить до металургійних підприємств із неповним виробничим циклом. Основним напрямом його діяльності є виплавка конструкційних, нержавіючих, шарикопідшипникових, інструментальних, швидкорізальних і жароміцних марок сталі.

Орієнтовний середньорічний обсяг виробництва підприємства становить 371 517 т, зокрема:

- конструкційна легована сталь — 82 487 т;
- конструкційна вуглецева сталь — 49 199 т;
- нержавіюча сталь із вмістом нікелю — 76 292 т;
- нержавіюча сталь без вмісту нікелю — 29 878 т;
- шарикопідшипникова сталь — 84 790 т;
- швидкорізальна сталь — 2 410 т;
- інструментальна сталь — 30 954 т;
- жароміцна сталь — 991 т.

До виробничої структури підприємства входять сталеплавильні цехи № 1, 2, 3 і 5, цех порошкової металургії, прокатний цех, цех ремонту металургійного обладнання, копровий, ковальсько-пресовий, термічний, калібрувальний і ковальський цехи. Крім того, на території підприємства розташовані ад'юстажний цех обробки металу, цех випробувань, дільниця підготовки сировинних матеріалів, склад готової продукції та інші допоміжні підрозділи.

Сталеплавильний цех № 2 спеціалізується переважно на виплавці нержавіючих сталей із вмістом нікелю, а також конструкційних легованих і вуглецевих марок сталі. Частка зазначених марок у загальному обсязі продукції, що виплавляється в СПЦ № 2, становить приблизно 80–85 %.

Середньорічний випуск продукції цеху дорівнює 88 104 т, у тому числі:

- нержавіюча сталь — 42 017 т;
- конструкційні леговані та вуглецеві сталі — 22 913 т;
- шарикопідшипникова сталь — 3 331 т;
- інструментальна сталь — 2 048 т;
- швидкорізальна сталь — 29 т.

До основних технологічних дільниць СПЦ № 2 належать пічний і шихтовий прольоти, проліт розливання сталі, а також відділення гарячого кондиціювання металу.

Виплавка сталі у СПЦ № 2 здійснюється в дугових сталеплавильних печах ДСП-50, загальний вигляд яких наведено на рисунку 1.2. Номінальна місткість цих агрегатів становить 60 т. Для інтенсифікації технологічного процесу застосовується продування розплавленої металевої ванни киснем.

Технологічний цикл плавки включає такі основні періоди:

- розплавлення шихтових матеріалів — близько 2,5 години;
- відновлювальний період плавки — приблизно 30 хвилин;
- продування металевої ванни киснем — 5–10 хвилин.

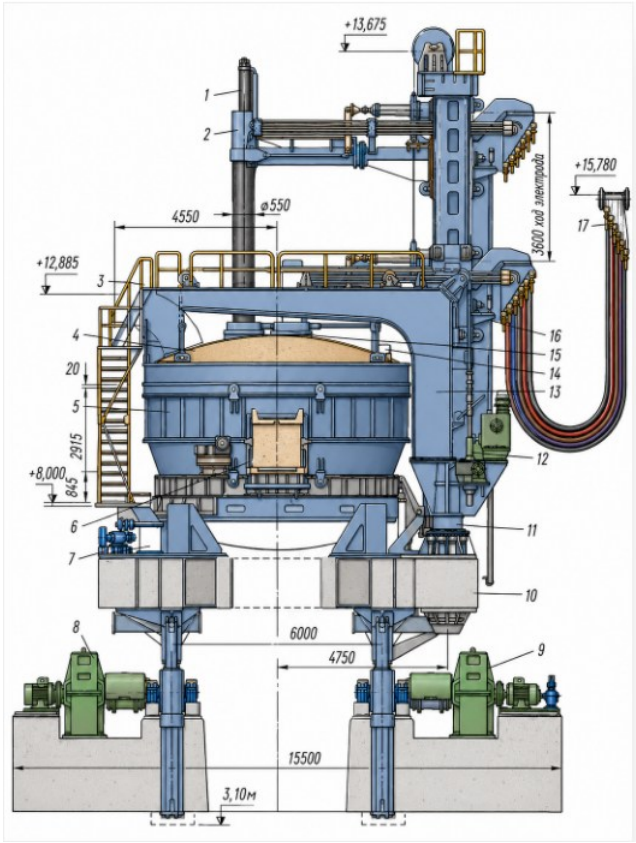


Рисунок 1.2 – Дугова сталеплавильна піч типу ДСП-50: 1- фурма для вводу кисня в піч; 2 – електроди; 3 – патрубок газовідсосу; 4 – свод печі; 5 – кожух печі; 6 – робоче вікно; 7 – механізми обертання кожуха печі; 8, 9 – приводи механізму нахилу печі; 10 – опорна люлька печі; 11 – механізм повороту своду; 12 – механізм підйому своду; 13 – поворотний портал; 14 – вентилятор для газоущільнення місць вводу електродів у піч; 15 – електродні охолоджуючі та ущільнюючі кільця; 16 – механізм переміщення електродів; 17 – струмовідвід гнучкими кабелями.

Відповідно до вимог технологічної інструкції з виплавки сталі, у період розплавлення металевої шихти допускається використання газоподібного кисню для її підрізування та прискорення процесу плавлення. Подача кисню здійснюється через арку робочого вікна дугової електропечі. Рекомендована витрата кисню під час виконання цієї технологічної операції становить 600–700 м³/год.

Застосування кисню в період розплавлення сприяє інтенсивнішому нагріванню та руйнуванню великих шматків металобрухту, які можуть утворювати містки або зависати у верхній частині робочого простору печі. Кисневий струмінь забезпечує локальне підвищення температури, прискорює окислення окремих компонентів шихти та створює додатковий тепловий ефект за рахунок перебігу екзотермічних реакцій.

Унаслідок цього скорочується тривалість періоду розплавлення, покращуються умови осідання шихти та зменшується ймовірність утворення нерозплавлених ділянок металу. Крім того, раціональне використання кисню дає змогу частково знизити витрати електричної енергії, оскільки певна кількість теплоти надходить до робочого простору печі в результаті окиснювальних реакцій.

Подача кисню повинна здійснюватися із суворим дотриманням установленого технологічного режиму. Надмірна витрата кисню може спричинити підвищений угар металу та легувальних елементів, інтенсивне окислення футерування, збільшення кількості пилу у відхідних газах і погіршення техніко-економічних показників плавки. Тому витрати кисню, тривалість продування та положення кисневої фурми визначаються залежно від складу шихти, ступеня її розплавлення, температурного режиму й поточного стану металевої ванни.

Основними шихтовими матеріалами, що використовуються в електросталеплавильному цеху, є відходи вуглецевих сталей. До них можуть належати обрізь прокату, стружка, металевий лом, браковані заготовки, залишки лиття та інші види вторинної металевої сировини. Використання таких

матеріалів дозволяє забезпечити раціональне перероблення металевих відходів і зменшити потребу підприємства в первинній сировині.

Перед завантаженням у піч шихтові матеріали повинні пройти сортування та підготовку. Особливу увагу приділяють їх хімічному складу, габаритним розмірам, насипній густині, ступеню забруднення мастилами, вологою, ґрунтом і неметалевими включеннями. Якість підготовки шихти істотно впливає на тривалість плавлення, витрати електроенергії, стійкість електричних дуг, вихід придатного металу та хімічний склад готової сталі.

Раціональне компонування шихти передбачає правильне розміщення важких, середніх і легких фракцій у завантажувальному кошику. Великогабаритні та масивні шматки металу зазвичай розташовують таким чином, щоб забезпечити їх ефективне нагрівання електричними дугами та кисневим струменем. Легковаговий лом використовується для заповнення вільного простору між великими елементами шихти, що підвищує коефіцієнт використання об’єму печі.

На теперішній час в електросталеплавильному цеху експлуатуються дугові електропечі № 2, № 4 і № 6. Зазначені агрегати забезпечують виконання основних технологічних операцій, пов’язаних із завантаженням і розплавленням шихти, окисленням домішок, формуванням шлаку, нагріванням металу до необхідної температури та його випуском у сталерозливний ківш.

Для подальшого доведення металу до заданих показників хімічного складу й температури в цеху також використовується установка «піч-ківш». Вона є важливим елементом комплексу позапічної обробки сталі та дає змогу перенести частину технологічних операцій із дугової печі в окремий спеціалізований агрегат.

На установці «піч-ківш» здійснюють нагрівання металу, коригування його хімічного складу, розкислення, десульфурацію, легування та перемішування інертним газом. Завдяки цьому забезпечується вирівнювання температури й концентрації легувальних елементів у всьому об’ємі металу, підвищується чистота сталі та зменшується вміст неметалевих включень.

Використання установки «піч-ківш» дозволяє скоротити тривалість перебування металу в дуговій електропечі. У цьому випадку електропіч переважно виконує функції швидкого розплавлення шихти та первинного рафінування, а остаточне доведення сталі здійснюється під час позапічної обробки. Така організація виробництва сприяє підвищенню продуктивності електропечей, зменшенню витрат електродів і вогнетривких матеріалів, а також покращенню якості готового металу.

За дуговими електропечами встановлені системи газоочищення, призначені для уловлювання пилу, аерозолів та інших забруднювальних компонентів, що утворюються під час плавлення шихти, кисневого продування, шлакоутворення та випуску металу. Необхідність застосування таких систем обумовлена значною запиленістю відхідних газів електросталеплавильного виробництва.

У цеху використовуються газоочисні апарати мокрого типу. Принцип їх дії ґрунтується на контакті забрудненого газового потоку з рідиною, переважно водою. Під час такого контакту частинки пилу змочуються, збільшуються в розмірах і відокремлюються від газу. Після очищення газовий потік відводиться в атмосферу, а забруднена вода спрямовується на подальше очищення, відстоювання або повторне використання.

Мокрі газоочисні установки здатні ефективно вловлювати дрібнодисперсний пил і одночасно знижувати температуру відхідних газів. До складу таких систем можуть входити скрубери, труби Вентурі, краплевловлювачі, відстійники, циркуляційні насоси та димососи. Спільна робота цих елементів забезпечує транспортування, охолодження й очищення газів перед їх викидом.

Водночас експлуатація мокрих газоочисних апаратів пов’язана зі значним споживанням води та електричної енергії. Електроенергія витрачається на приводи димососів, насосів і допоміжного обладнання, а також на подолання аеродинамічного опору газоочисного тракту. Крім того, у процесі очищення

утворюються забруднені стічні води та шлам, які потребують спеціального оброблення й утилізації.

Одним із важливих напрямів підвищення енергоефективності таких систем є регулювання продуктивності димососів відповідно до фактичного обсягу відхідних газів. Застосування частотно-регульованих електроприводів дозволяє змінювати частоту обертання робочого колеса димососа, підтримувати необхідне розрідження в печі та скорочувати непродуктивні витрати електроенергії.

Отже, технологічний комплекс електросталеплавильного цеху включає дугові електропечі № 2, № 4 і № 6, установку «піч-ківш», системи подавання кисню та апарати мокрого газоочищення. Узгоджена робота зазначеного обладнання забезпечує розплавлення металевої шихти, виплавку сталі заданого складу, її позапічне оброблення та очищення відхідних газів.

Подальше вдосконалення технологічного процесу повинно бути спрямоване на оптимізацію витрат кисню, підвищення якості підготовки шихти, скорочення тривалості плавки, автоматизацію керування пічними агрегатами та зниження енергоспоживання газоочисного обладнання. Реалізація цих заходів дозволить підвищити продуктивність цеху, зменшити собівартість сталі та покращити екологічні показники електросталеплавильного виробництва.

2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ОБЛІКУ, СПОЖИВАННЯ ТА ВТРАТ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

2.1 Аналіз енергоспоживання цехом СПЦ №2

Для забезпечення електроенергією підприємств використовується сукупність пристроїв, призначених для виробництва, передачі та розподілу електроенергії, яка є системою електропостачання (СЕС). У системі електропостачання підприємства можна виділити три складові, три підсистеми, кожну з яких можна розглядати як самостійну систему. Це система зовнішнього електропостачання, внутрішньомайданчикове електропостачання і внутрішньоцехове електропостачання.

- Зовнішня система електропостачання включає електростанції, підстанції та лінії електропередачі, що знаходяться в енергосистемі, аж до основної підстанції.

- У мережах системи зовнішнього електропостачання в основному використовуються напруги 35, 110, (150), 220 кВ.

- Внутрішня система електропостачання підприємства включає в себе ГПП, CFD, DF, власні електростанції підприємства, трансформаторні підстанції споживачів і лінії електропередачі, що з'єднують між собою підстанції і розподільчі станції.

Живлення сталеплавильних печей цеху СПЦ-2 здійснюється від пічних трансформаторів ЕТЦН-32000/35-71УЗ номінальною потужністю 20 МВА.

Дані про споживання електроенергії цехом НВК No2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Споживання електроенергії в 2025 році

Період	Кількість днів	Споживання, МВт·год	Середньодобове споживання, МВт·год/добу	Тариф, грн/кВт·год	Вартість, млн грн	Частка річного споживання, %	Зміна споживання, %
Січень	31	35 640	1 149,7	0,309	11,013	8,38	—
Лютий	28	37 720	1 347,1	0,314	11,844	8,87	+5,84
Березень	31	36 140	1 165,8	0,317	11,456	8,49	–4,19
1-й квартал	90	109 500	1 216,7	0,31336	34,313	25,74	—
Квітень	30	34 110	1 137,0	0,315	10,745	8,02	–5,62
Травень	31	36 260	1 169,7	0,322	11,676	8,52	+6,30
Червень	30	32 670	1 089,0	0,321	10,487	7,68	–9,90
2-й квартал	91	103 040	1 132,3	0,31937	32,907	24,22	–5,90
Липень	31	29 970	966,8	0,329	9,860	7,04	–8,26
Серпень	31	37 890	1 222,3	0,334	12,655	8,91	+26,43
Вересень	30	36 540	1 218,0	0,333	12,168	8,59	–3,56
3-й квартал	92	104 400	1 134,8	0,33221	34,683	24,54	+1,32
Жовтень	31	35 670	1 150,6	0,338	12,056	8,38	–2,38
Листопад	30	36 340	1 211,3	0,342	12,428	8,54	+1,88
Грудень	31	36 510	1 177,7	0,347	12,669	8,58	+0,47
4-й квартал	92	108 520	1 179,6	0,34237	37,154	25,51	+3,95
2025 рік	365	425 460	1 165,6	0,32684	139,058	100,00	—

Річне споживання електроенергії цехом СПЦ №2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» у 2025 році наведено на рисунку 2.1.

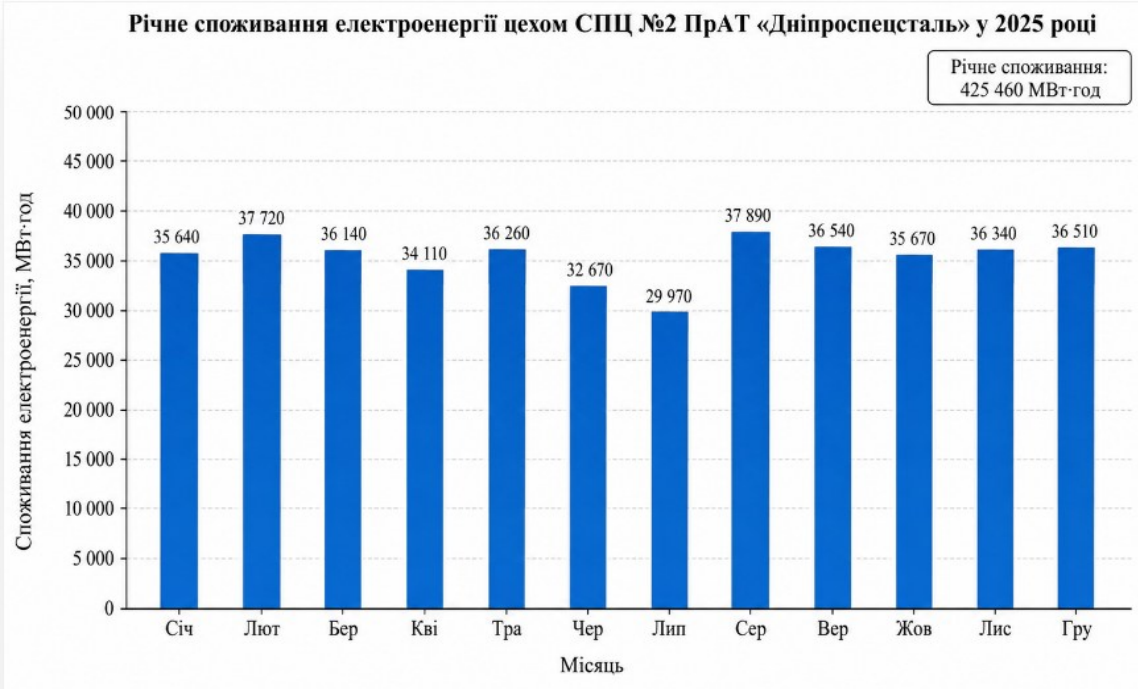


Рисунок 2.1 - Річне споживання електроенергії за 2025 рік.

З даних таблиці 2.1 і графіка 2.1 видно, що виплавка сталі в цеху СПЦ-2 дуже енергоємна, платежі за електроенергію за рік досягають 139 млн грн. Основними споживачами електричної енергії є, перш за все, самі електропечі, а по-друге, постійно працюючі потужні електродвигуни димососів печі. У роботі доцільно продумати заходи щодо зниження енергоспоживання в цеху.

Гаряча вода для опалення сталеплавильного цеху No2 подається від заводської теплоцентралі. Гаряча вода для опалення подається в цех по магістралі. Температура води, що надходить – 80°С; діаметр трубопроводу – 300 мм; спосіб прокладки трубопроводу – під землею.

Інформація про споживання теплової енергії, в тому числі гарячого водопостачання, цехом НВК No2 за опалювальні сезони 2024-2025 та 2024-2025 років представлена в таблицях 2.2, 2, 3 та на рисунках 2.2, 2.3.

Таблиця 2.2 - Споживання теплової енергії в опалювальному сезоні 2024 - 2025 рр.

Період	Споживання теплової енергії, кВт·год	Ціна, грн/кВт·год	Вартість, грн	Частка сезонного споживання, %
Листопад 2024 р.	258 430	0,19840	51 272,51	10,68
Грудень 2024 р.	423 680	0,19840	84 058,11	17,51
IV квартал 2024 р.	682 110	0,19840	135 330,62	28,19
Січень 2025 р.	576 920	0,19840	114 460,93	23,84
Лютий 2025 р.	589 340	0,19840	116 925,06	24,35
Березень 2025 р.	528 760	0,19840	104 905,98	21,85
I квартал 2025 р.	1 695 020	0,19840	336 291,97	70,04
Квітень 2025 р.	42 860	0,19840	8 503,42	1,77
II квартал 2025 р.	42 860	0,19840	8 503,42	1,77
Усього за опалювальний сезон	2 419 990	0,19840	480 126,02	100,00

Аналіз наведених даних свідчить, що найбільше споживання теплової енергії припадає на січень, лютий і березень 2025 року. Це пояснюється зниженням температури зовнішнього повітря та збільшенням теплового

навантаження на систему опалення виробничих і адміністративно-побутових приміщень. Найвищий рівень споживання зафіксовано в лютому — 589 340 кВт·год, що становить 24,35 % від загального сезонного обсягу.

Сумарне споживання теплової енергії протягом опалювального сезону 2024–2025 рр. становило 2 419 990 кВт·год. Загальні витрати підприємства на теплопостачання за прийнятого тарифу дорівнювали 480 126,02 грн. Основна частина витрат, а саме 336 291,97 грн, припадає на перший квартал 2025 року.

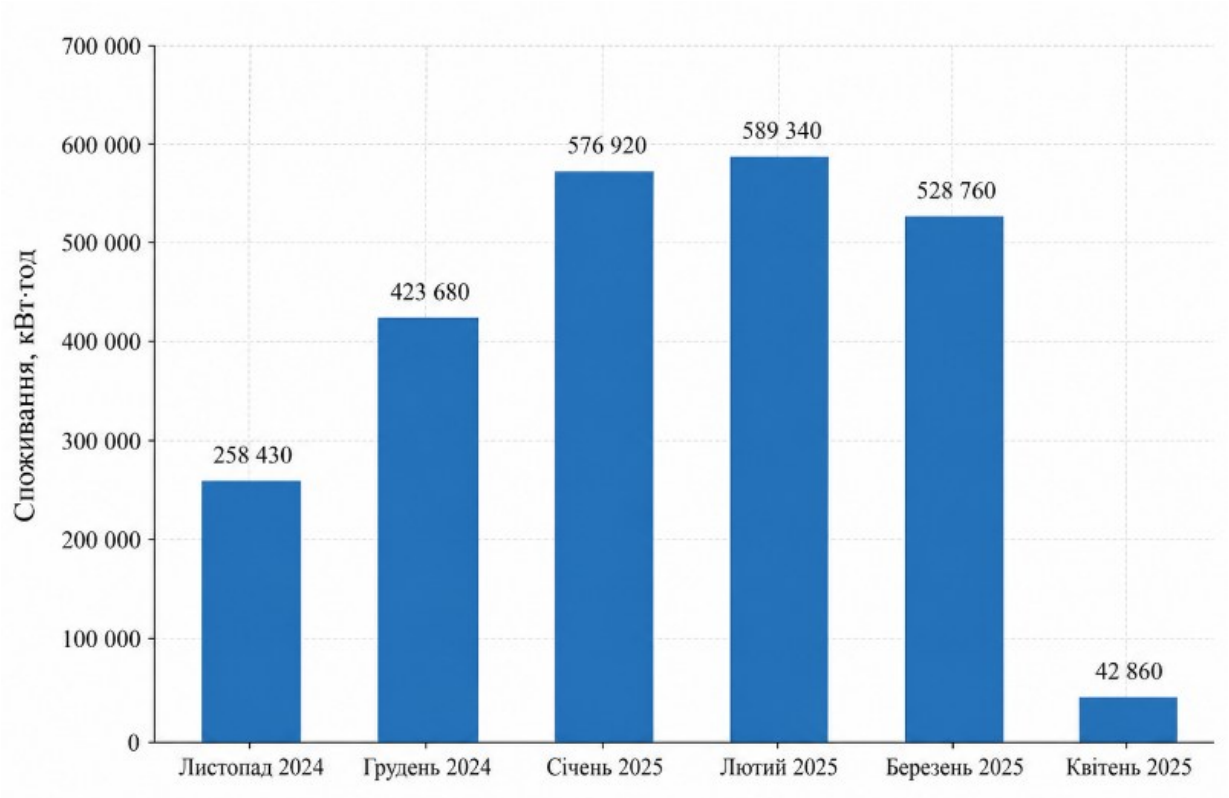


Рисунок 2.2 - Сезонне споживання ГВП для опалення за 2024 – 2025 рік

Таблиця 2.3 - Споживання теплової енергії в опалювальному сезоні 2024 – 2025 року

Місяць / період	Споживання, кВт·год	Ціна, грн/кВт·год	Сума, грн
Листопад 2024 р.	279 120	0,2201	61 434,31
Грудень 2024 р.	337 270	0,2201	74 233,13
IV квартал 2024 р.	616 390	0,2201	135 667,44
Січень 2025 р.	327 966	0,2201	72 185,32
Лютий 2025 р.	308 195	0,2201	67 833,71
Березень 2025 р.	255 860	0,2201	56 314,79
I квартал 2025 р.	892 021	0,2201	196 333,82
Квітень 2025 р.	29 075	0,2201	6 399,41
II квартал 2025 р.	29 075	0,2201	6 399,41
Усього за опалювальний сезон	1 537 486	0,2201	338 400,67

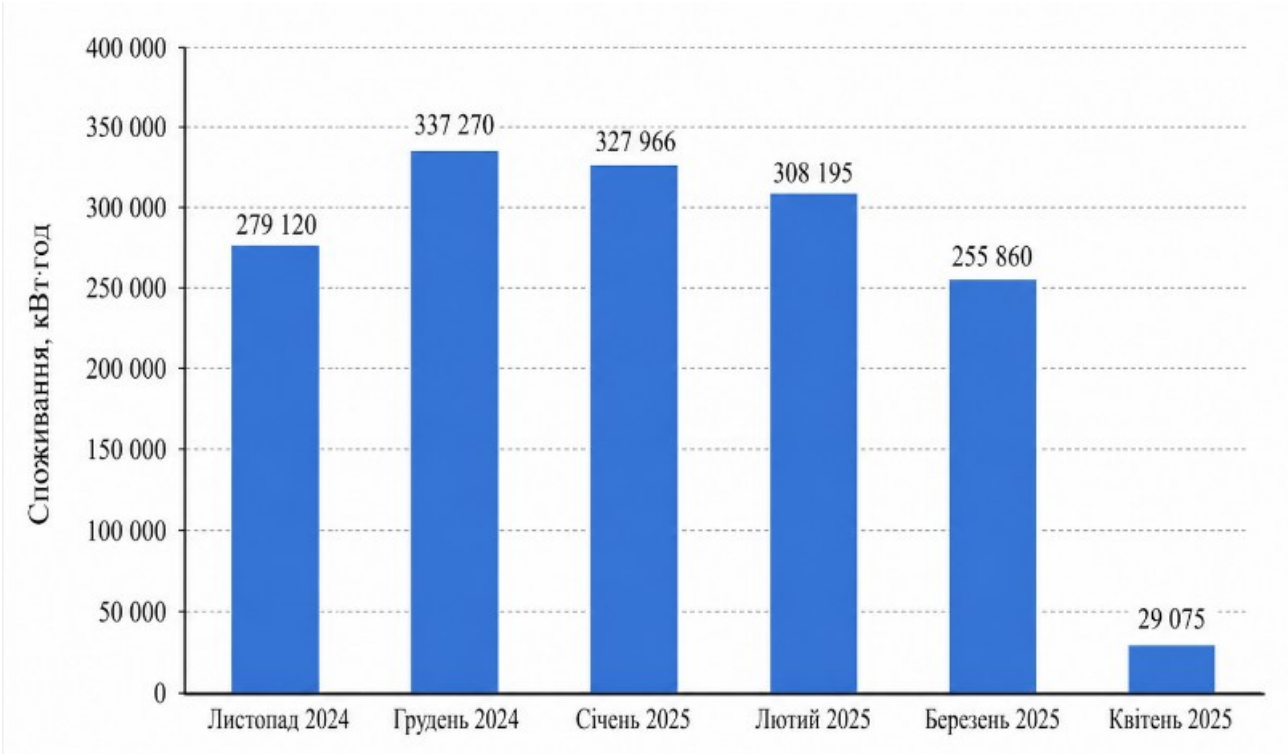


Рисунок 2.3 - Сезонне споживання ГВП для опалення за 2024 – 2025 рік

Витрата теплової енергії на обігрів виробничих приміщень і побутового комплексу цеху безпосередньо залежить від температури навколишнього середовища, чим нижче температура, тим більше витрата, як показано в таблицях 2.2 і 2.3, і графіках 2.2 і 2.3.

Таблиця 2.4 - Споживання газу в 2025 році

Місяць	Споживання газу, м³	Ціна, грн/м³	Вартість, грн
Січень	22 500	8,45665	190 274,6
Лютий	22 500	8,45665	190 274,6
Березень	22 500	8,45665	190 274,6
1-й квартал	67 500	8,45665	570 823,9
Квітень	22 500	8,49581	191 155,7
Травень	22 500	8,49581	191 155,7
Червень	22 500	8,49581	191 155,7
2-й квартал	67 500	8,49581	573 467,2
Липень	22 500	8,56534	192 720,2
Серпень	22 500	8,56534	192 720,2
Вересень	22 500	8,56534	192 720,2
3-й квартал	67 500	8,56534	578 160,5
Жовтень	22 500	8,61689	193 880,0
Листопад	22 500	8,61689	193 880,0
Грудень	22 500	8,61689	193 880,0
4-й квартал	67 500	8,61689	581 640,1
2025 рік	270 000	8,53367	2 304 091,6

Питна вода подається в сталеплавильний цех НВК No2 через один ввід трубою діаметром 100 мм. Стічні води відводяться по двох трубах. Вода використовується в господарських цілях. Цеху виділено ліміт у використанні води в обсязі 9 тисяч кубометрів, які споживаються протягом місяця. Споживання води є постійним і оскільки в цеху немає приладу обліку, розрахунки за спожиту воду здійснюються за середнім споживанням у розмірі 9 тис.500 мм

Таблиця 2.5 – Об'єм споживання питної води цехом СПЦ №2 на 2025 рік

Місяць	Обсяг споживання, м³	Ціна, грн/м³	Вартість, грн
Січень	9 000	0,982	8 838
Лютий	9 000	0,982	8 838
Березень	9 000	0,982	8 838
1-й квартал	27 000	0,982	26 514
Квітень	9 000	1,253	11 277
Травень	9 000	1,253	11 277
Червень	9 000	1,253	11 277
2-й квартал	27 000	1,253	33 831
Липень	9 000	1,526	13 734
Серпень	9 000	1,526	13 734
Вересень	9 000	1,526	13 734
3-й квартал	27 000	1,526	41 202
Жовтень	9 000	1,736	15 624
Листопад	9 000	1,736	15 624
Грудень	9 000	1,736	15 624
4-й квартал	27 000	1,736	46 872
2025 рік	108 000	1,37425	148 419

Упродовж 2025 року обсяг споживання питної води цехом СПЦ №2 залишався стабільним і становив 9 000 м³ на місяць, або 27 000 м³ на квартал. Загальне річне споживання питної води склало 108 000 м³.

Вартість одного кубічного метра води протягом року поступово зростала: від 0,982 грн/м³ у першому кварталі до 1,736 грн/м³ у четвертому кварталі. Загальне підвищення тарифу становило приблизно 76,8 %. Середньозважена ціна води за рік дорівнювала 1,37425 грн/м³.

Найменші витрати на водопостачання зафіксовано у першому кварталі — 26 514 грн, а найбільші у четвертому кварталі — 46 872 грн. Загальна річна вартість спожитої питної води становила 148 419 грн.

Середні витрати теплової енергії на опалення:

Опалювальний сезон 2024-2025 років становить 20 436 кВт·год теплової енергії на добу та 852 кВт·год теплової енергії на годину.

Опалювальний сезон 2024 – 2025 років становить 10580 кВт·год теплової енергії на добу та 441 кВт·год теплової енергії на годину.

Оскільки середня температура повітря взимку 2024-2025 років була майже вдвічі нижчою, ніж температура повітря взимку 2024-2025 років, то споживання теплової енергії на опалення в опалювальний сезон 2024-2025 років на 93% менше, ніж у 2024-2025 роках.

Газопостачання цеху СПЦ № 2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» здійснюється від загальнозаводської газорозподільної мережі через один ввід. Для виробничих потреб цеху встановлено місячний ліміт споживання природного газу в обсязі 22,5 тис. м³. Через відсутність окремого приладу комерційного обліку розрахунки за використаний газ виконуються відповідно до встановленого середньомісячного обсягу споживання. Основними споживачами природного газу є ковальська майстерня та допоміжні виробничі підрозділи цеху.

У 2025 році місячне споживання природного газу становило 22,5 тис. м³, квартальне — 67,5 тис. м³, а загальний річний обсяг — 270 тис. м³. Середньозважена вартість природного газу дорівнювала 8,53367 грн/м³. Загальні річні витрати цеху на газопостачання становили 2 304 091,6 грн.

Стиснене повітря надходить до цеху централізованою заводською мережею та використовується для забезпечення роботи технологічного й допоміжного обладнання. Робочий тиск стисненого повітря становить 6 атм., діаметр повітропроводу — 100 мм. Повітропровід прокладено відкритим способом на естакаді. Споживання стисненого повітря протягом року приймається відносно рівномірним. За розрахунковими даними 2025 року його річне споживання становило 240 тис. м³. За тарифу 37,46 грн за 1 тис. м³ загальна вартість використаного стисненого повітря дорівнювала 8 990,4 грн.

Кисень надходить до СПЦ № 2 централізованим трубопроводом і використовується безпосередньо в технологічному процесі виплавки сталі, зокрема для продування металевого розплаву, інтенсифікації окиснювальних реакцій та скорочення тривалості плавки. У 2025 році обсяг споживання кисню становив 248 тис. м³. За розрахункової вартості 314,83 грн за 1 тис. м³ річні витрати на кисень становили 78 077,8 грн.

Загальні витрати цеху СПЦ № 2 на придбання енергоресурсів у 2025 році становили 141 935 979,4 грн. Структура витрат за окремими видами енергетичних ресурсів мала такий вигляд:

електрична енергія — 139 058 000 грн, або 97,972 %;

природний газ — 2 304 091,6 грн, або 1,623 %;

теплова енергія та гаряча вода для опалення — 338 400,6 грн, або 0,238 %;

питна вода — 148 419 грн, або 0,105 %;

кисень — 78 077,8 грн, або 0,055 %;

стиснене повітря — 8 990,4 грн, або 0,006 %.

Проведений аналіз структури витрат показує, що найбільше фінансове навантаження на цех створює споживання електричної енергії. Її частка становить майже 98 % загальних витрат на енергетичні ресурси. Сукупна частка електроенергії, природного газу та теплової енергії становить близько 99,83 % загальних енергетичних витрат цеху.

Таким чином, першочерговим напрямом підвищення енергетичної ефективності СПЦ № 2 має бути скорочення споживання електричної енергії, оптимізація режимів роботи електросталеплавильного обладнання, зменшення втрат природного газу та теплової енергії, а також удосконалення систем обліку енергоресурсів. В умовах постійного зростання тарифів доцільним є впровадження технічних та організаційних енергозберігаючих заходів, які забезпечать зниження собівартості виробництва і загальних експлуатаційних витрат цеху.

2.2 Оцінка основних напрямів діяльності по зменшенню енерговитрат в цеху СПЦ №2

Основні напрями реалізації політики енергозбереження в металургійному виробництві передбачають модернізацію наявних технологічних процесів і обладнання, удосконалення режимів їх експлуатації, підвищення коефіцієнта завантаження основних технологічних агрегатів, а також використання вторинних енергетичних ресурсів, зокрема утилізацію теплоти відхідних газів.

Для дугових сталеплавильних печей зниження витрат енергії може бути забезпечене завдяки таким заходам:

збільшенню маси завантажуваної шихти та покращенню якості її попередньої підготовки;

зменшенню електричних і теплових втрат у процесі плавки;

скороченню тривалості технологічних і організаційних простоїв печі;

оптимізації електричних параметрів та технологічних режимів роботи плавильного агрегату.

Питома витрата електроенергії дуговою сталеплавильною піччю значною мірою залежить від маси одноразового завантаження. Зі збільшенням кількості шихтових матеріалів зменшується частка постійних теплових втрат, що припадає на одну тонну виплавленої сталі. Тому одним із можливих способів підвищення енергоефективності є збільшення маси шихти в межах допустимого технологічного навантаження печі. Рекомендовані значення оптимальної маси пічної шихти залежно від місткості плавильного агрегату наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Оптимальна маса завалки печі

Номінальна маса печі, т	Оптимальна маса печі, т	
	При виплавці рядових сталей	При виплавці сталей високої якості
1,5	2,3 – 2,5	2 – 2,2
5	7,3 – 8,0	6 – 7
10	14 – 16	12 – 13
20	28 – 31	24 – 28
40	50 – 55	46 – 50

Залежність зміни питомої витрати електроенергії від маси навантаження показана на рисунку 2.4.

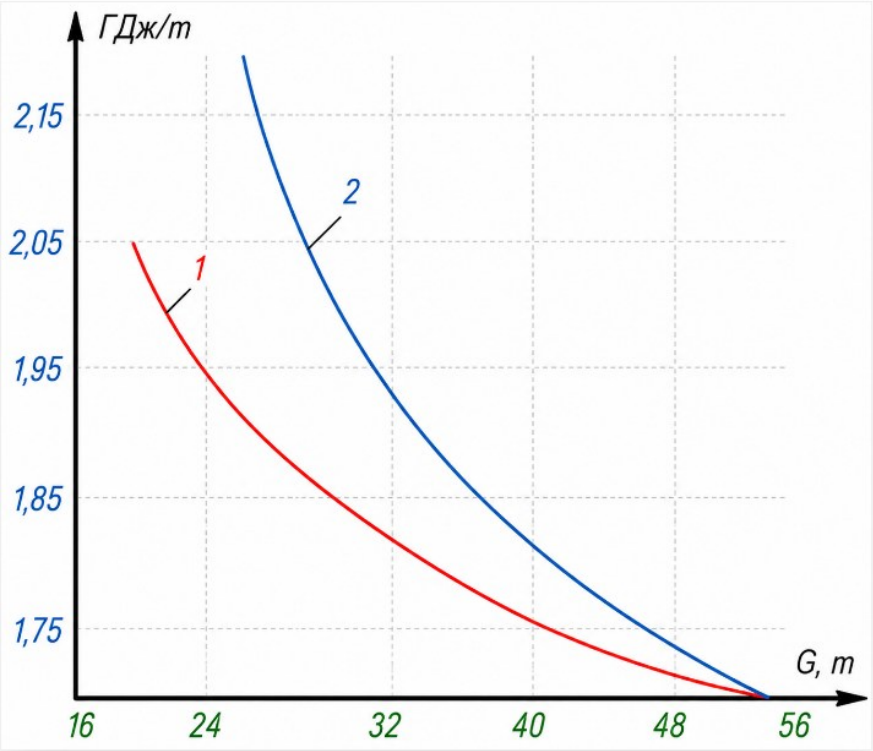


Рисунок 2.4 – Залежність питомих витрат електроенергії в залежності від маси завалки: з кір пічною кладкою стін та полу (1), з стінами та сводом печі (2).

Попередня підготовка шихтових матеріалів є одним із найважливіших заходів підвищення енергетичної ефективності дугових сталеплавильних печей. Її основне завдання полягає у формуванні такого складу та об’єму шихти, за якого вся необхідна кількість металу може бути завантажена в піч без додаткового підвантаження під час плавлення. Відсутність повторних завантажень скорочує тривалість технологічного циклу, зменшує час перебування печі з відкритим склепінням, обмежує втрати теплоти в навколишнє середовище та знижує загальне споживання електричної енергії.

Для дугових печей місткістю від 10 до 40 т рекомендується формувати шихту з урахуванням розмірів окремих фракцій металобрухту. Орієнтовне співвідношення може становити 20 % дрібного, 40 % великого та 40 % середнього брухту. Такий розподіл дає змогу забезпечити достатню щільність укладання матеріалів у завантажувальному кошику та робочому просторі печі.

Дрібна фракція заповнює порожнини між великими шматками, тоді як середній і великий брухт формують основний об’єм шихти. У результаті збільшується маса одноразового завантаження, скорочується кількість підвалок і створюються сприятливіші умови для рівномірного прогрівання та розплавлення металу.

Важливе значення має не лише фракційний склад, а й якість шихтових матеріалів. Металобрухт повинен бути очищений від неметалевих домішок, надлишкової вологи, мастильних матеріалів та інших забруднень, які можуть погіршувати перебіг плавки. Наявність сторонніх включень призводить до додаткового утворення шлаку, збільшення витрат енергії, підвищення тривалості окиснювального періоду та ускладнення процесу доведення металу до заданого хімічного складу. Особливо ефективним є використання відходів легованих сталей, хімічний склад яких наближений до складу металу, що виплавляється. Це дає можливість скоротити витрати дорогих легувальних компонентів, зменшити тривалість окиснювальних і відновлювальних операцій, а також знизити питомі витрати електроенергії.

Не менш важливим є правильне розміщення шихти в робочому просторі електропечі. Великі та щільні шматки металобрухту доцільно розташовувати таким чином, щоб вони не створювали перешкод для опускання електродів і не спричиняли механічного пошкодження футеровки. Легкі та дрібні матеріали слід розміщувати в зонах, де забезпечується їх швидке прогрівання та розплавлення. Раціональне укладання шихти сприяє стабілізації електричного режиму, зменшенню кількості обвалів металобрухту, скороченню періодів нестійкого горіння дуги та рівномірному розподілу теплової енергії. Сукупний ефект від оптимізації розмірів, складу, якості й способу укладання шихтових матеріалів може забезпечити зниження енергоспоживання приблизно на 15–20 %.

Наступним перспективним напрямом скорочення питомих енерговитрат є попереднє підігрівання шихти перед її завантаженням у піч. Нагрівання і плавлення твердого металу належать до найбільш енергоємних операцій електросталеплавильного процесу. Період розплавлення займає близько половини загальної тривалості плавки, при цьому на нього може припадати

приблизно 60–70 % усієї електричної енергії, спожитої за технологічний цикл. Питома витрата електроенергії на цьому етапі може досягати близько 400 кВт·год на одну тонну сталі. Тому навіть часткова заміна електричної енергії вторинною теплотою дає помітний енергетичний та економічний ефект.

Попереднє нагрівання шихтових матеріалів до температури 600–700 °С скорочує кількість електроенергії, необхідної для доведення металу до температури плавлення. Крім безпосереднього зниження енергоспоживання, попередній підігрів дає змогу скоротити тривалість плавки, підвищити продуктивність печі, зменшити час роботи трансформатора під максимальним навантаженням і знизити зношування електродів. Водночас технологія підігрівання повинна передбачати контроль температури та рівномірності нагрівання, а також заходи щодо запобігання потраплянню в піч вологого або забрудненого металобрухту.

Найбільш раціональним джерелом теплоти для попереднього підігрівання є відхідні гази електросталеплавильної печі, температура яких на окремих ділянках газовідвідного тракту може наближатися до 1000 °С. У традиційній схемі значна частина цієї теплоти відводиться в атмосферу або втрачається в системах охолодження. Використання спеціальних камер, шахтних підігрівачів або теплообмінних пристроїв дає змогу повернути частину енергії відхідних газів у технологічний процес. При цьому одночасно може знижуватися температура газів перед системою очищення, що зменшує теплове навантаження на газоочисне обладнання.

За відсутності можливості безпосередньо використовувати відхідні гази економічно доцільним може бути встановлення окремих нагрівальних агрегатів. Їх застосування потребує додаткових капітальних витрат, однак вони можуть компенсуватися завдяки зменшенню тривалості плавки, скороченню витрат електроенергії та підвищенню продуктивності обладнання. За умови підігрівання шихти до 600–700 °С загальне зниження енергоспоживання може становити близько 15–20 %. Фактичний ефект залежить від початкової

температури металобрухту, конструкції підігрівача, режиму роботи печі та повноти використання теплоти відхідних газів.

Окремим напрямом енергозбереження є скорочення теплових втрат через футеровку печі. Вогнетривка кладка акумулює значний обсяг теплової енергії, тому кожна повна або часткова заміна футеровки супроводжується втратою теплоти, накопиченої в її масиві. Крім того, після ремонту необхідно витрачати додаткову енергію на сушіння, прогрівання та виведення печі на нормальний температурний режим. Отже, збільшення міжремонтного періоду та строку служби вогнетривкої кладки безпосередньо сприяє зменшенню питомих витрат енергії.

Тривалість експлуатації футеровки може бути збільшена завдяки комплексу організаційно-технічних заходів:

- використанню високоякісних вогнетривких і теплоізоляційних матеріалів, характеристики яких відповідають температурним та хімічним умовам роботи печі;
- підтриманню раціонального електричного режиму, оптимальної довжини дуги та допустимого теплового навантаження на стіни і склепіння;
- скороченню тривалості рафінування та загального часу перебування металу в печі;
- дотриманню оптимального шлакового режиму, який забезпечує захист футеровки від інтенсивного теплового й хімічного руйнування;
- своєчасному локальному ремонту найбільш зношених ділянок без проведення повної заміни кладки;
- застосуванню швидкісних методів відновлення футеровки, зокрема набризкування вогнетривких мас і використання великоблочних конструкцій;

- контролю стану стін, подини, укосів і склепіння за допомогою температурних вимірювань та регулярних оглядів.

Застосування великоблочної футеровки дає змогу скоротити тривалість ремонтних робіт, зменшити час простою плавильного агрегату та забезпечити більш рівномірні теплоізоляційні властивості конструкції. Своєчасне усунення локальних пошкоджень також запобігає надмірному зростанню теплового потоку через окремі ділянки корпусу печі. Потужність теплових втрат залежно від місткості плавильного агрегату, його продуктивності та фактичного стану футеровки наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Потужність теплових втрат залежно від ємкості печі і стану футерування.

Ємність печі, т	Потужність теплових втрат, кВт	
	Нова підкладка	Зношена підкладка
2	250	350
3	350	400
5	375	500
10	425	625

При цьому втрати від зовнішніх поверхонь печі можна приймати рівними, у % від загальних тепловтрат: печі до 5 т – 40%, печі понад 5 т – 49%.

Втрати тепла з охолоджуючою водою можна визначити за формулою:

$$\Delta Э_{О.В.} = \frac{Q(T_2 - T_1)}{860};$$

де Q - кількість води в літрах (от 1000 до 1800 л на 1т сталі, що виплавляється);

T_1, T_2 - температура води, що подається та відводиться з печі відповідно.

Для зменшення витрат охолоджувальної води та підтримання її температури в оптимальних межах доцільно оснащувати окремі контури системи охолодження автоматичними регуляторами. Такі пристрої забезпечують зміну витрати води залежно від фактичного теплового навантаження на елементи печі та запобігають її надлишковій циркуляції. Автоматичне регулювання дає змогу стабілізувати температурний режим водоохолоджуваних панелей, склепіння, електродотримачів та інших конструктивних елементів, а також знизити

навантаження на насосне обладнання. Для електродугових печей малої та середньої місткості впровадження такого заходу може забезпечити економію електроенергії на перекачування води до 50 тис. кВт·год на рік.

Оптимізація роботи системи охолодження має не лише економічне, а й технологічне значення. Надмірна подача води призводить до збільшення споживання електроенергії насосами, тоді як недостатня витрата може спричинити перегрівання окремих елементів печі та скорочення строку їх експлуатації. Тому використання датчиків температури, витрати й тиску води дає можливість підтримувати стабільні параметри охолодження та своєчасно виявляти відхилення. У сукупності вдосконалення системи охолодження може забезпечити зниження загального енергоспоживання процесу плавки приблизно на 3–5 %.

Значна частина теплової енергії втрачається також через технологічні отвори та робочі вікна печі. У період розплавлення шихти потужність теплових втрат через відкриті ділянки може становити близько 450 кВт/м³, а під час рафінування металу — до 700 кВт/м³. Зростання втрат у рафінувальний період пояснюється вищою температурою металу та шлаку, а також тривалістю операцій, пов’язаних із відбором проб, введенням легувальних матеріалів і контролем технологічного процесу.

Для обмеження таких втрат необхідно скорочувати тривалість перебування робочих вікон і дверей печі у відкритому стані, забезпечувати їх належну герметизацію та контролювати технічний стан ущільнень. Важливе значення має також механізація операцій завантаження добавок, вимірювання температури та відбору проб. Чим менше часу піч залишається відкритою, тим нижчими є втрати теплоти випромінюванням і тим менше електроенергії потрібно для повторного відновлення заданої температури металу.

Наступним важливим напрямом підвищення енергоефективності електросталеплавильного виробництва є скорочення тривалості простоїв печі. За нормальних умов міжплавковий простій включає час, необхідний для випуску металу, очищення робочого простору, дрібного ремонту подини й стін,

підготовки та завантаження нової порції шихти. Тривалість цих операцій значною мірою залежить від рівня механізації процесів випуску сталі, транспортування ковшів, підготовки завалочних кошиків і завантаження металобрухту.

У період простою електрична енергія до печі не подається, проте футеровка, кожух і склепіння продовжують віддавати накопичену теплоту в навколишнє середовище. Унаслідок охолодження внутрішніх поверхонь після повторного вмикання печі частина електроенергії витрачається не на нагрівання і плавлення металу, а на відновлення температури вогнетривкої кладки. Після звичайної технологічної перерви додаткові витрати енергії на повторне прогрівання футеровки можуть досягати 15–20 %.

Для зменшення міжплавкових інтервалів доцільно заздалегідь готувати шихту, синхронізувати роботу суміжних дільниць, використовувати механізовані засоби очищення і ремонту, а також забезпечувати своєчасну подачу ковшів та допоміжних матеріалів. Суттєвий ефект може бути отриманий завдяки підготовці наступного завалочного кошика ще до завершення поточної плавки. Це дає змогу скоротити тривалість завантаження, зменшити охолодження футеровки та підвищити кількість плавок за зміну.

Важливим резервом енергозбереження є також застосування раціональних електричних і технологічних режимів виплавки. Ефективність роботи електродугової печі залежить від правильного вибору ступенів напруги трансформатора, величини струму, довжини електричної дуги, послідовності введення кисню, вуглецевмісних і шлакоутворювальних матеріалів. Нестабільне горіння дуги, несвоєчасне перемикання ступенів трансформатора та відхилення від установленої технології збільшують тривалість плавки й підвищують питомі витрати електроенергії.

Дотримання чіткої послідовності технологічних операцій, автоматизований контроль параметрів плавки та своєчасне коригування електричного режиму сприяють стабілізації дуги, рівномірному прогріванню металу й скороченню непродуктивних витрат енергії. Застосування

оптимізованих режимів виплавки дає змогу знизити споживання електроенергії приблизно на 8–15 %, одночасно підвищуючи продуктивність печі, якість готової сталі та надійність роботи обладнання.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу отримаємо діаграму, представлену на рисунку 2.5.

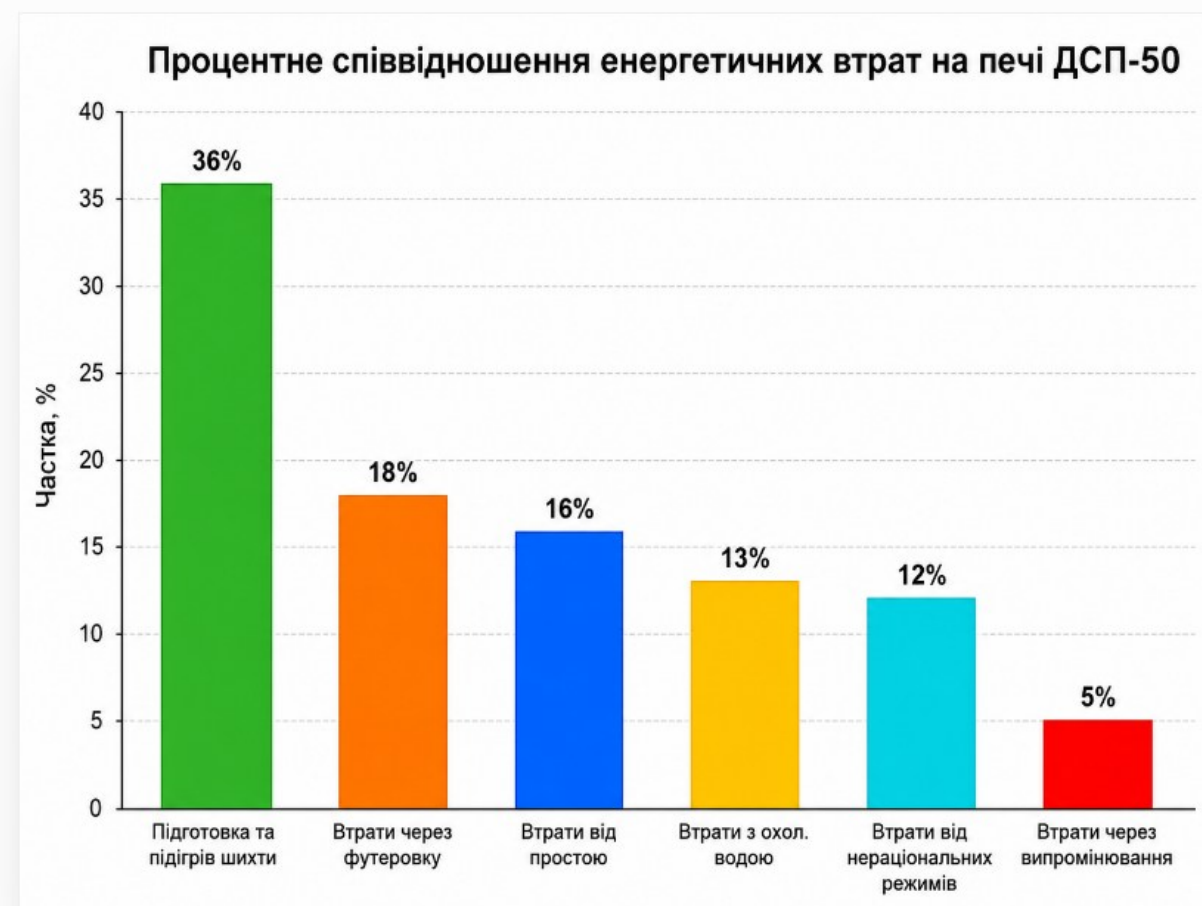


Рисунок 2.5 – Процентне співвідношення енергетичних втрат в електросталеплавильній печі ДСП-50

На підставі аналізу даних, наведених на графіку, можна зробити висновок про наявність значного потенціалу використання теплових втрат електродугової печі як вторинного енергетичного ресурсу. Найбільш раціональним напрямом утилізації цієї теплоти є попереднє підігрівання шихтових матеріалів, які надходять до робочого простору печі. Зменшення різниці між початковою температурою шихти та температурою її плавлення дає змогу скоротити тривалість технологічного циклу, знизити питомі витрати електричної енергії та підвищити продуктивність плавильного агрегату.

У зв’язку з цим у дипломній роботі доцільно передбачити впровадження спеціального пристрою для підігрівання шихти, адаптованого до чинної технологічної схеми сталеплавильного цеху № 2. Необхідно обґрунтувати місце його встановлення, визначити джерело відбірної теплоти, спосіб транспортування гарячих газів, температурний режим роботи та порядок подавання нагрітої шихти до електропечі. Розроблена технологічна схема повинна забезпечувати ефективне використання теплоти відхідних газів без порушення основного виробничого процесу та з урахуванням вимог промислової й пожежної безпеки.

Окрім підігрівання шихтових матеріалів, доцільно розглянути можливість подальшого використання залишкової теплоти газового потоку для нагрівання води. Для цього необхідно проаналізувати наявні типи теплообмінних апаратів, оцінити їхню теплову ефективність, конструктивні особливості та придатність до роботи в умовах запиленого високотемпературного середовища. Встановлення теплообмінника після пристрою підігрівання шихти дасть змогу організувати послідовне використання теплового потенціалу відхідних газів: спочатку для нагрівання металевої шихти, а потім — для підготовки гарячої води на технологічні, опалювальні або господарські потреби підприємства.

Додатковим напрямом підвищення енергоефективності СПЦ № 2 є модернізація електропривода димососа системи газовидалення. У разі застосування нерегульованого привода електродвигун часто працює з надлишковою продуктивністю, а необхідна витрата газу регулюється дроселюванням, що супроводжується непродуктивними втратами електроенергії. Для усунення таких режимів доцільно впровадити частотно-регульований електропривод потужного двигуна димососа. Це забезпечить автоматичну зміну частоти обертання відповідно до фактичної кількості відхідних газів і поточного етапу плавки.

Застосування регульованого електропривода дасть змогу зменшити споживання електроенергії, стабілізувати розрідження в робочому просторі печі, скоротити механічне навантаження на двигун і вентиляційне обладнання, а

також підвищити надійність роботи системи газоочищення. Таким чином, комплексне впровадження підігрівання шихти, утилізації залишкової теплоти для нагрівання води та регулювання продуктивності димососа може забезпечити суттєве зниження енергоємності сталеплавильного виробництва й підвищення загальної ефективності роботи цеху.

3. РОЗРОБКА РІШЕНЬ, СПРЯМОВАНИХ НА ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЦЕХУ

3.1. Використання установки попереднього підігріву скрапу та шихти

Економічний ефект від попереднього підігрівання металобрухту не обмежується лише економією електричної енергії. Скорочення тривалості плавки сприяє зменшенню витрати графітованих електродів, вогнетривких матеріалів, кисню та інших технологічних ресурсів. Крім того, зниження питомих енергетичних витрат безпосередньо впливає на собівартість готової металопродукції та підвищує конкурентоспроможність підприємства.

Існуючі установки для попереднього нагрівання сталевого брухту використовують переважно три основні джерела теплової енергії: спеціально спалюване паливо, високотемпературні відхідні гази електродугових печей, а також теплоту гарячих злитків, слябів або заготовок. Використання окремого палива дає змогу нагрівати металобрухт до температури приблизно 800–1000 °C. Проте такі установки характеризуються підвищеною витратою природного газу або іншого палива, необхідністю спорудження додаткових систем паливопостачання та відведення продуктів згоряння.

У зв’язку зі зростанням вартості енергетичних ресурсів застосування спеціальних паливних установок для нагрівання шихти не завжди є економічно доцільним. Тому в межах цієї роботи основну увагу доцільно зосередити на використанні вторинних енергетичних ресурсів, зокрема теплоти газів, що відводяться з електродугової печі. Таке рішення дає змогу одночасно знизити витрати електроенергії на плавлення та зменшити теплові викиди в навколишнє середовище.

Відхідні гази електродугової печі мають значний енергетичний потенціал, оскільки їх температура на виході з робочого простору агрегату може досягати високих значень. Без застосування утилізаційного обладнання ця теплота

втрачається в системах газовідведення й охолодження. Передача частини теплової енергії металобрухту дає змогу знизити температуру газів перед їх надходженням до системи очищення, зменшити навантаження на газоочисне обладнання та покращити загальний тепловий баланс електросталеплавильного комплексу.

Орієнтовний тепловий баланс вузла попереднього нагрівання шихти відхідними газами електродугової печі наведено в таблиці 3.1. У ньому доцільно враховувати теплоту газів на вході до установки, кількість теплоти, переданої металобрухту, втрати через огороджувальні конструкції, втрати з газами на виході, а також витрати теплоти на нагрівання обладнання та навколишнього повітря. Аналіз складових теплового балансу дає можливість оцінити ефективність запропонованої установки та визначити резерви її подальшого вдосконалення.

Перші промислові установки, призначені для нагрівання металобрухту та інших компонентів шихти, передбачали переміщення матеріалу в обертовому барабані назустріч потоку гарячих газів. Завдяки обертанню барабана відбувалося безперервне перемішування металобрухту, що сприяло збільшенню площі його контакту з теплоносієм і забезпечувало більш рівномірний розподіл температури в об’ємі шихти.

Протитечійна схема руху металобрухту та гарячих газів давала змогу інтенсифікувати теплообмін і підвищити ступінь використання теплоти продуктів згоряння або відхідних газів. Нагрітий матеріал надходив до електродугової печі, завдяки чому зменшувалася кількість електричної енергії, необхідної на початковій стадії плавлення.

Цей метод був розроблений компанією Braun-Boveri в Німеччині та впроваджений на металургійному підприємстві Industriale Pietro Maria Ceretti в Італії. Загальний вигляд і принципову схему відповідної установки наведено на рисунку 3.1.

Разом із перевагами обертові установки мали певні недоліки. До них належали значні габарити, складність герметизації газового тракту, підвищений

знос механічних елементів, утворення пилу та шуму, а також необхідність контролю за переміщенням металобрухту всередині барабана. Незважаючи на це, їх застосування стало важливим етапом розвитку технологій утилізації теплоти відхідних газів електродугових печей і створило передумови для розроблення сучасних шахтних, конвеєрних та комбінованих систем попереднього нагрівання шихти.

Таблиця 3.1 – Тепловий баланс підігріву скрапу та шихти

Прихід теплоти		Відхід теплоти	
Процес	Значення, %	Втрати	Значення , %
Прихід теплоти газів з печі після їх дожигу	100	Втрати з газами, що виходять з підігрівача	50,9
Разом	100	Нагрів шихти	25,5
		Втрати в газоході	19,4
		Втрати на нагрів ємності	4,2
		Разом	100

Матеріал нагрівається в похилій обертовій печі. Рух матеріалу і газів з електропечі протитечійний. Поворотний барабан нахилений на 12,5°, зовнішній діаметр барабана – 2,2 м, внутрішній – 1,8 м, швидкість обертання – 1 об/хв. Недолік методу полягає в тому, що в клітці можна використовувати тільки подрібнений лом від дезінтеграторів.

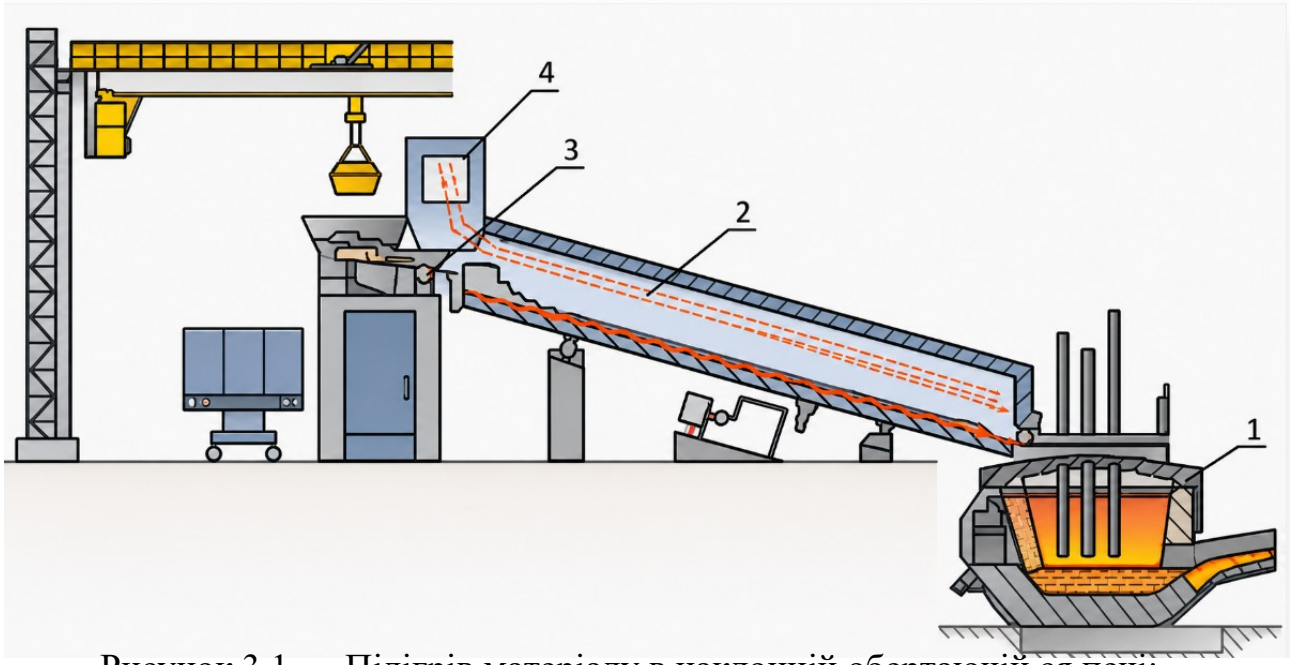


Рисунок 3.1 — Підігрів матеріалу в наклонній обертаючій ся печі: 1 — електропіч: 2 — піч для підігріву лома та шихти; 3 — устройство для завантаження матеріалу; 4 — димохід.

Ідею використання теплоти димових газів для попереднього нагрівання металевого брухту було реалізовано також бразильською компанією Icosa. У запропонованій нею конструкції брухт розміщується у спеціальних бункерах, установлених безпосередньо над електродуговою піччю. Таке компонування обладнання дає змогу максимально наблизити зону нагрівання шихти до джерела утворення високотемпературних газів і зменшити теплові втрати під час їх транспортування газоходами.

Перед завантаженням у робочий простір печі металевий брухт певний час перебуває в бункері та нагрівається потоком газів, що відводяться від плавильного агрегату. У результаті початкова температура шихтових матеріалів підвищується, завдяки чому скорочується кількість електричної енергії, необхідної для їх нагрівання до температури плавлення. Крім того, зменшується тривалість початкового етапу плавки та підвищується продуктивність електродугової печі.

У системах нагрівання брухту пічними газами максимально можлива температура шихтового матеріалу визначається насамперед температурою та ентальпією газового потоку, витратою газів, тривалістю їх контакту з брухтом, а також коефіцієнтом використання теплоти нагрівального пристрою. Значний вплив мають також конструкція установки, щільність укладання брухту, його фракційний склад, площа поверхні теплообміну та рівномірність розподілу газового потоку в об’ємі нагрівальної камери.

Практичний досвід експлуатації таких систем свідчить, що під час використання лише відхідних газів електродугової печі температура попереднього нагрівання металобрухту переважно не перевищує 500 °C. Подальше підвищення температури обмежується зниженням температурного напору між газами та матеріалом, тепловими втратами через огороджувальні конструкції, а також вимогами щодо пожежної й технологічної безпеки. Крім того, надмірне нагрівання забрудненого брухту може супроводжуватися виділенням шкідливих органічних сполук, випаровуванням мастил і утворенням додаткової кількості пилу.

Для реалізації попереднього нагрівання шихти було розроблено значну кількість конструктивних варіантів брухтонагрівачів. Вони відрізняються способом розміщення шихти, напрямом руху газів, конструкцією нагрівальної камери, способом завантаження та вивантаження брухту, а також схемою очищення відхідних газів. Один із варіантів такої установки наведено на рисунку 3.2.

У розглянутій технологічній схемі високотемпературні гази відводяться з електродугової печі через четвертий отвір у її склепінні. Температура газів безпосередньо на виході з печі може досягати приблизно 1200 °C. У складі газової суміші міститься значна кількість чадного газу, який утворюється внаслідок неповного згоряння вуглецю та реакцій окиснення домішок у процесі плавлення.

Для підвищення ступеня використання хімічної енергії газів передбачено допалювання чадного газу. Для цього в спеціальний отвір газоходу підсмоктується атмосферне повітря. Кисень, який міститься в припливному повітрі, взаємодіє з оксидом вуглецю, унаслідок чого відбувається його допалювання з утворенням діоксиду вуглецю та виділенням додаткової кількості теплоти. Процес горіння переважно відбувається в ділянці газоходу, розташованій безпосередньо за місцем підведення повітря.

Витрату та швидкість припливного повітря необхідно регулювати таким чином, щоб забезпечити повне або максимально можливе допалювання чадного газу й одночасно уникнути надмірного охолодження продуктів згоряння. За правильно вибраного режиму температура газового потоку перед надходженням до брухтонагрівача становить приблизно 800 °C. Така температура є достатньою для інтенсивного нагрівання металевої шихти без використання додаткового палива.

Нагрівання брухту здійснюється в спеціальній теплоізольованій камері. Усередині неї розміщується завантажувальна баддя або кошик, заповнений металобрухтом. Гарячі гази проходять крізь проміжки між окремими фрагментами металу, передаючи їм теплоту переважно шляхом конвекції та

частково теплового випромінювання. Ефективність нагрівання значною мірою залежить від проникності шару брухту для газового потоку та рівномірності його розподілу по всьому об’єму камери.

У процесі теплообміну температура димових газів поступово знижується від приблизно 800 °С на вході до 200–300 °С на виході з брухтонагрівача. Водночас температура металевого брухту підвищується в середньому до 350–400 °С. Досягнення такого рівня нагрівання забезпечує помітне скорочення питомої витрати електроенергії в електродуговій печі, оскільки частина теплоти, необхідної для нагрівання шихти, надходить із вторинного енергетичного ресурсу.

Попереднє нагрівання металобрухту також сприяє скороченню тривалості плавлення, зменшенню витрати графітованих електродів і зниженню теплового навантаження на окремі елементи печі. Однак для забезпечення стабільної роботи установки необхідно контролювати температуру газів і брухту, вміст кисню та чадного газу, розрідження в газоходах, а також стан поверхні нагрівальної камери.

Рух димових газів по всьому газовому тракту забезпечується за допомогою димососа. Він створює необхідне розрідження в печі, газоходах і камері нагрівання, а також забезпечує подолання аеродинамічного опору шару брухту, фільтрувального обладнання та інших елементів системи. Потужність і режим роботи димососа повинні відповідати фактичній витраті газів і зміні опору системи протягом технологічного циклу.

Застосування регульованого електропривода димососа дає можливість змінювати його продуктивність залежно від режиму роботи печі. Це дозволяє підтримувати необхідне розрідження, запобігати надлишковому підсмоктуванню холодного повітря та зменшувати витрати електроенергії на транспортування газів. Особливо ефективним є використання частотного перетворювача, який забезпечує плавне регулювання частоти обертання електродвигуна димососа.

Після виходу з камери нагрівання димові гази містять пил, дрібні частинки металу, оксиди та інші забруднювальні речовини. Тому перед викидом в атмосферу вони обов'язково проходять очищення у фільтрувальній установці. Для цього можуть застосовуватися рукавні фільтри, електрофільтри або комбіновані системи газоочищення.

Очищення димових газів дає змогу знизити концентрацію пилу й шкідливих речовин до нормативно допустимого рівня. Одночасно охолодження газів у брухтонагрівачі зменшує температурне навантаження на фільтрувальне обладнання, що позитивно впливає на термін його експлуатації та надійність роботи.

Таким чином, використання відхідних газів електродугової печі для попереднього нагрівання металобрухту є ефективним напрямом утилізації вторинних енергетичних ресурсів. Запропонована схема дає змогу скоротити споживання електричної енергії, зменшити тривалість плавки, підвищити продуктивність печі та знизити температуру газів, що надходять до системи очищення. Разом із тим ефективність роботи брухтонагрівача залежить від узгодженого керування процесами допалювання чадного газу, подавання повітря, переміщення димових газів і регулювання продуктивності димососа.

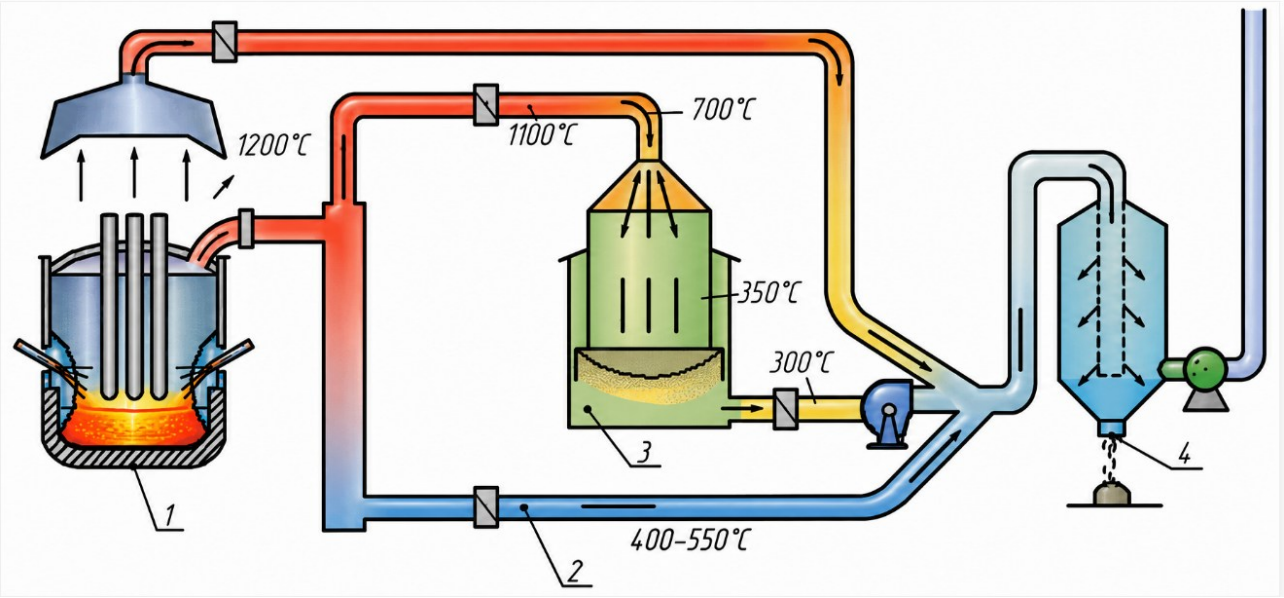


Рисунок 3.2 - Схема підігрівача скрапу: 1 – піч; 2 – газохід з регулюючим клапаном; 3 – камера для нагріву лома; 4 – тканевий фільтр.

Конструкція самої камери нагріву показана на рисунку 3.3.

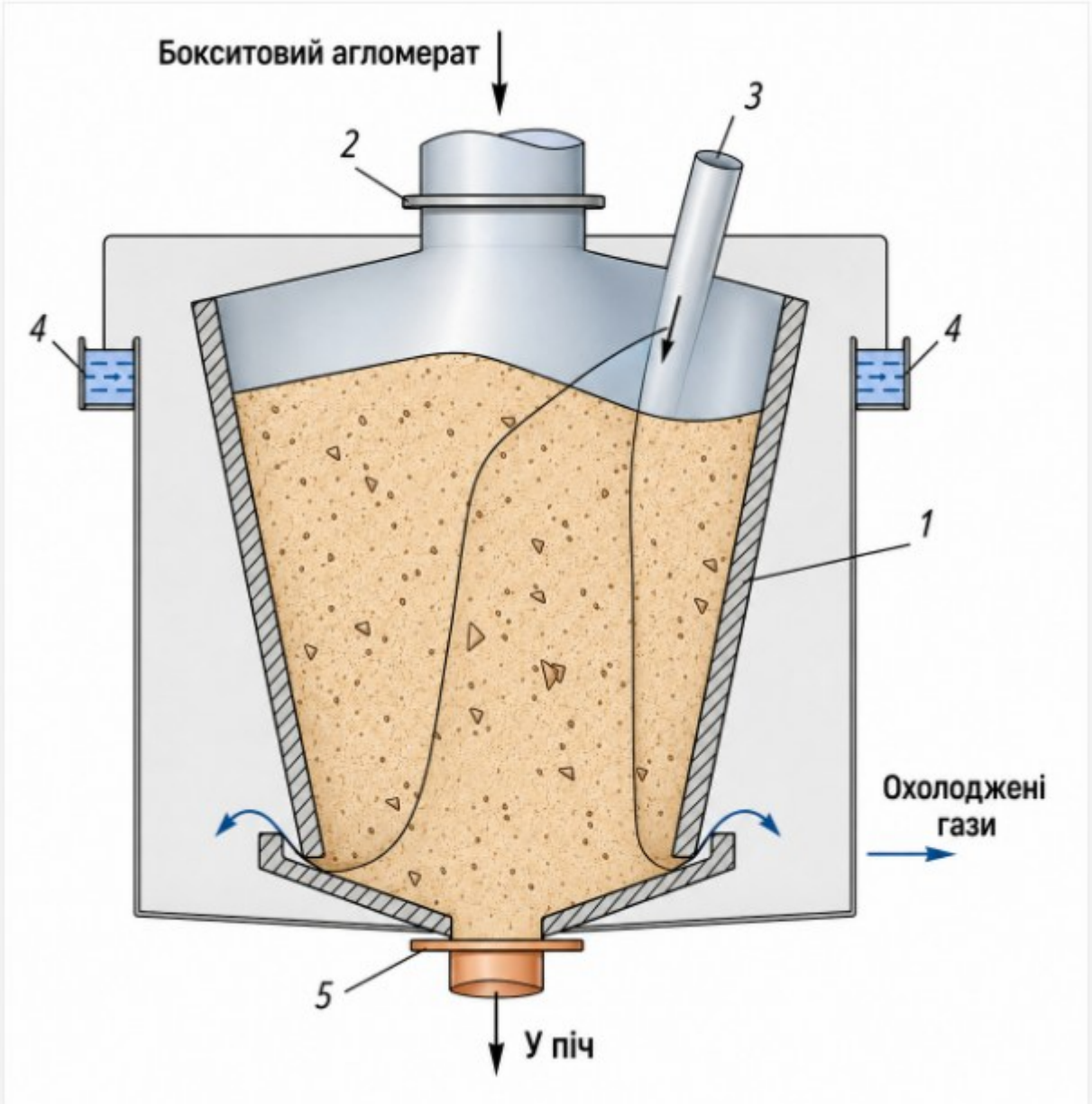


Рисунок 3.3 – Камера для нагріву скрапа: 1 – футерований бункер; 2 – завантажувальний клапан; 3 – газохід для підводу гарячого дутья; 4 – гідрозатвор; 5 – розвантажувальний клапан.

Для підвищення ефективності попереднього нагрівання металобрухту, як зазначено в роботі [14], доцільно забезпечувати його раціональне укладання в завантажувальну баддю. Порядок розміщення окремих фрагментів брухту повинен обиратися з урахуванням їхніх геометричних розмірів, форми, щільності, товщини металу та теплотехнічних характеристик. Швидкість

нагрівання також рекомендується регулювати залежно від виду та сортаменту шихтових матеріалів.

Великогабаритні й масивні фрагменти металу доцільно розміщувати таким чином, щоб вони не перешкоджали проходженню гарячих газів через шар шихти. Дрібний брухт має значно більшу питому поверхню теплообміну та нагрівається швидше, однак його надмірне ущільнення може збільшувати аеродинамічний опір шару. Тому оптимальне формування завантаження повинно забезпечувати достатню газопроникність, рівномірний розподіл теплоносія та мінімальну різницю температур між окремими ділянками бадді.

Істотний вплив на ефективність використання теплоти відхідних газів має теплоізоляція камери допалювання та газоходів. Застосування вогнетривкої футеровки дає змогу зменшити втрати теплоти через огороджувальні конструкції та підвищити температуру газів на вході до установки попереднього нагрівання приблизно з 550–660 до 700–800 °С. Унаслідок збільшення температурного напору між газовим потоком і металобрухтом інтенсифікується теплообмін та підвищується кінцева температура шихти.

За наведеними даними, реалізація такого технічного рішення дозволяє зменшити питоме споживання електричної енергії електродуговою піччю приблизно на 12 кВт·год на одну тонну виплавленої сталі. Енергетичний ефект досягається завдяки тому, що частина теплоти, необхідної для нагрівання брухту до температури плавлення, підводиться не електричною дугою, а високотемпературними відхідними газами.

У розглянутій установці металобрухт масою близько 20 т нагрівається безпосередньо в завантажувальній бадді, обладнаній порожнистим захисним кожухом. Така конструкція забезпечує спрямований рух газів навколо та всередині шару металу, а також зменшує неконтрольований вихід теплоти в навколишнє середовище. Теплоізоляцію камери допалювання та газоходів виконано з вогнетривкого бетону, здатного тривалий час працювати за високих температур і значних теплових навантажень.

Окремий варіант системи попереднього нагрівання металобрухту було впроваджено на заводі в Шибукаві, Японія. Його характерною особливістю є використання однієї нагрівальної камери для обслуговування двох завантажувальних бадей. Таке компонувальне рішення дозволяє скоротити кількість установленого обладнання, ефективніше використовувати теплоту відхідних газів і забезпечувати почергову підготовку шихти для наступних плавок.

Газохід, через який гарячі гази подаються до завантажувальної бадді, виконано знімним і встановлено на спеціальному пересувному візку. Це дає змогу переміщувати його між двома робочими позиціями відповідно до технологічної послідовності нагрівання. Газоходи, шибери, ворота, приводи та транспортні візки обладнані засобами автоматичного контролю й керування.

Система автоматизації забезпечує узгоджену роботу всіх елементів установки, регулює положення газових заслінок, контролює напрямок руху димових газів і підтримує необхідні температурні режими. Автоматичне керування також дозволяє зменшити тривалість перемикання між окремими завантажувальними баддями, запобігти надмірному підсмоктуванню холодного повітря та підвищити безпеку експлуатації обладнання.

Протягом однієї плавки в цій системі реалізуються два послідовні цикли попереднього нагрівання металобрухту. На першому етапі використовується відхідний газ початкового періоду плавлення, який характеризується порівняно невеликою витратою та температурою до 300 °C. Незважаючи на невисокий тепловий потенціал такого газового потоку, його теплота може бути використана для початкового прогрівання частини шихти.

Під час першого циклу попередньо нагрівається близько 10 т металобрухту, що становить орієнтовно третину загальної маси шихти, необхідної для проведення однієї плавки. На цьому етапі відбувається видалення поверхневої вологи, часткове випаровування мастильних матеріалів і початкове підвищення температури металу. Використання навіть низькопотенційної

теплоти дозволяє скоротити витрати енергії на подальших стадіях технологічного процесу.

Решта приблизно 20 т металобрухту нагрівається під час другого циклу. Для цього використовується теплота газів, які відводяться з електродугової печі в період інтенсивного окиснення. Температура газового потоку на цій стадії може становити 620–800 °C, а його витрата й теплова потужність є значно більшими, ніж на початку плавлення.

Саме період окиснення характеризується найбільш сприятливими умовами для утилізації теплоти відхідних газів. Висока температура забезпечує інтенсивний конвективний і променевий теплообмін, завдяки якому металобрухт може бути нагрітий до температури, достатньої для помітного скорочення тривалості наступної плавки. Водночас температура газів після проходження через шар шихти істотно зменшується, що знижує теплове навантаження на подальші елементи газоочисної системи.

Ефективність попереднього нагрівання значною мірою залежить від розмірів і форми окремих фрагментів металобрухту. Дрібний і тонкостінний брухт нагрівається швидше завдяки більшій площі поверхні відносно маси. Масивні деталі та товстостінні елементи потребують тривалішого теплового впливу, оскільки процес вирівнювання температури між поверхнею та внутрішніми шарами металу відбувається повільніше.

Нерівномірність гранулометричного складу шихти може призводити до утворення зон із різним аеродинамічним опором. Гарячі гази в такому випадку рухаються переважно каналами з найменшим опором, унаслідок чого окремі частини завантаження можуть перегріватися, а інші залишатися недостатньо нагрітими. Для запобігання цьому необхідно правильно формувати шар брухту, контролювати його щільність і, за можливості, попередньо сортувати матеріал за розмірами.

Експлуатація описаної системи показала, що фактичне зниження питомої витрати електроенергії може становити близько 5 кВт·год на одну тонну виплавленої сталі. Величина економії залежить від температури відхідних газів,

маси попередньо нагрітої шихти, тривалості нагрівання, рівня теплоізоляції газоходів, конструкції завантажувальної бадді та організації технологічного процесу.

Крім безпосереднього зменшення електроспоживання, попереднє нагрівання брухту сприяє скороченню тривалості роботи печі під струмом, зниженню витрат графітованих електродів, зменшенню зношування футеровки та підвищенню продуктивності плавильного агрегату. Скорочення тривалості плавки також дозволяє збільшити кількість технологічних циклів, що виконуються протягом робочої зміни або доби.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок про доцільність упровадження технології попереднього нагрівання металобрухту в технологічному циклі виробництва сталі цеху НВК № 2 ПрАТ «Дніпроспецсталь». Підприємство має необхідне джерело вторинної теплової енергії у вигляді високотемпературних відхідних газів електродугових печей, значна частина теплоти яких за відсутності утилізаційного обладнання втрачається в навколишнє середовище.

Запропонована система повинна включати камеру попереднього нагрівання, теплоізольовані газоходи, вузол допалювання чадного газу, регульований димосос, систему очищення газів та комплекс автоматичного керування. Для забезпечення стабільного режиму необхідно контролювати температуру газів до і після нагрівача, температуру металобрухту, витрату й розрідження газового потоку, концентрацію кисню та чадного газу, а також положення регулювальних заслінок.

За умови нагрівання шихтових матеріалів щонайменше до 350 °C очікуване скорочення споживання електричної енергії на печі ЕДП-50 може досягати приблизно 8 МВт·год за одну плавку. Остаточне значення економії необхідно визначати на підставі фактичної маси шихти, її теплоємності, початкової вологості, досягнутої температури нагрівання, коефіцієнта корисного використання теплоти та реального режиму роботи печі.

За відповідної кількості плавок протягом року та з урахуванням тарифів на електроенергію станом на січень 2025 року орієнтовний річний економічний ефект може становити близько 3,0–3,5 млн грн. Для точнішого техніко-економічного обґрунтування необхідно врахувати капітальні витрати на виготовлення та монтаж обладнання, витрати на електроенергію для роботи димососа, обслуговування газоходів і фільтрів, а також можливе збільшення продуктивності електродугової печі.

Отже, утилізація теплоти відхідних газів для попереднього нагрівання металобрухту є перспективним енергозберігаючим заходом для цеху НВК № 2. Її впровадження дозволить зменшити питоме електроспоживання, скоротити тривалість плавки, підвищити продуктивність печі ЕДП-50, знизити собівартість сталі та зменшити тепловий вплив виробництва на навколишнє середовище.

3.2 Аналіз доцільності застосування регульованого приводу в двигуні витяжної системи печі ДСП-50

3.2.1 Огляд та аналіз недоліків існуючої схеми роботи витяжної системи печі

На сьогодні в системі газовідведення електродугових печей ДСП-50 сталеплавильного цеху СПЦ № 2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» застосовуються вентилятори типу ВМ-20А. Їхні основні технічні характеристики, зокрема продуктивність, повний тиск, частота обертання робочого колеса та потужність приводного електродвигуна, наведено в таблиці 3.2.

Аналіз представлених технічних параметрів свідчить, що вентилятор ВМ-20А належить до найбільш потужних споживачів електричної енергії в системі димовидалення печі. Номінальна потужність його приводного електродвигуна становить близько 800 кВт. За умови безперервної роботи з номінальним

навантаженням протягом однієї години витрата електроенергії може досягати приблизно 800 кВт·год.

Технологічний процес виплавлення сталі в електродуговій печі має чітко виражений циклічний характер. Протягом однієї плавки послідовно відбуваються завантаження металобрухту, розплавлення шихти, окиснювальний і відновний періоди, доведення металу до заданого хімічного складу та температури, а також випуск сталі. Інтенсивність утворення пилогазових викидів на кожному з цих етапів суттєво відрізняється.

Найбільший обсяг високотемпературних газів утворюється під час інтенсивного розплавлення шихти, продування металу киснем, допалювання чадного газу та проведення окиснювальних реакцій. Водночас у періоди завантаження, технологічних пауз, очікування результатів аналізу металу, підготовки до випуску та між плавками обсяг газовиділення значно зменшується. Отже, потреба системи димовидалення в максимальній продуктивності вентилятора існує лише протягом окремих етапів технологічного циклу.

За наявної схеми керування витяжний вентилятор переважно працює безперервно з номінальною або близькою до номінальної частотою обертання незалежно від фактичної інтенсивності газовиділення. У результаті в періоди зниженого утворення димових газів продуктивність вентилятора перевищує реальну потребу технологічного процесу. Це спричиняє непродуктивне споживання електричної енергії, надмірне розрідження в газовому тракті та додаткове підсмоктування холодного повітря.

Надлишкове надходження зовнішнього повітря призводить до збільшення загального об’єму газів, які необхідно транспортувати й очищувати. Унаслідок цього зростає аеродинамічне навантаження на газоходи, димосос і фільтрувальне обладнання, а також знижуються температура та енергетичний потенціал відхідних газів. Останній фактор особливо важливий у разі використання теплоти димових газів для попереднього нагрівання металобрухту.

Регулювання продуктивності вентилятора за допомогою дросельних заслінок не забезпечує суттєвого скорочення електроспоживання, оскільки

електродвигун продовжує працювати практично з постійною частотою обертання. Більш ефективним технічним рішенням є застосування частотно-регульованого електропривода, який дозволяє змінювати частоту обертання робочого колеса залежно від поточної потреби системи газовідведення.

Установлення перетворювача частоти дає можливість плавно регулювати продуктивність вентилятора та підтримувати задане розрідження в робочому просторі печі й газоходах. Керування може здійснюватися за сигналами датчиків тиску, температури, витрати газів, концентрації чадного газу, положення електродів, потужності пічного трансформатора або відповідно до поточної стадії плавки.

Особливістю вентиляторного навантаження є істотна залежність споживаної потужності від частоти обертання. Відповідно до законів подібності для відцентрових вентиляторів продуктивність приблизно пропорційна частоті обертання, створюваний тиск змінюється пропорційно квадрату частоти обертання, а необхідна потужність — пропорційно її кубу. Тому навіть відносно невелике зниження швидкості обертання може забезпечити значне скорочення електроспоживання.

Наприклад, під час зменшення частоти обертання вентилятора до 80 % від номінального значення споживана потужність теоретично може знизитися приблизно до половини номінальної. Фактичний рівень економії залежатиме від характеристик вентилятора й газової мережі, тривалості окремих технологічних операцій, меж допустимого регулювання та необхідного розрідження в системі.

Застосування частотного перетворювача також забезпечує плавний пуск приводного електродвигуна. Це дозволяє обмежити пускові струми, зменшити електродинамічні й механічні навантаження на двигун, муфту, підшипники та робоче колесо вентилятора. Унаслідок цього підвищується надійність обладнання, зменшується його зношування та скорочуються витрати на технічне обслуговування і ремонт.

Крім енергетичного ефекту, автоматичне регулювання продуктивності вентилятора сприятиме стабілізації тиску в робочому просторі печі. Недостатня

продуктивність системи може призвести до виходу пилу та газів у приміщення цеху, тоді як надмірне розрідження спричиняє підсмоктування холодного повітря та збільшення теплових втрат. Частотно-регульований привод дає змогу підтримувати оптимальний баланс між безпечним видаленням газів та мінімальним споживанням електроенергії.

Таким чином, наявний режим постійної роботи вентилятора ВМ-20А з номінальною частотою обертання не відповідає змінному характеру газовиділення електродугової печі ДСП-50. Встановлення частотного перетворювача є технічно й енергетично обґрунтованим заходом, спрямованим на узгодження продуктивності системи димовидалення з фактичними потребами технологічного процесу.

Упровадження частотно-регульованого електропривода на печах ДСП-50 цеху СПЦ № 2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» дозволить знизити витрати електричної енергії, скоротити пускові навантаження на електрообладнання, підвищити ресурс вентилятора та забезпечити стабільніші параметри роботи газовідвідної системи. Остаточна величина економії повинна визначатися на основі добового графіка роботи печі, тривалості технологічних стадій, фактичної продуктивності вентилятора та діапазону регулювання його частоти обертання.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики вентилятору ВМ-20А

Продуктивність	120 тис. м³/годину
Напір	до 14 кПа
Частота обертання	1480 об/хв
Потужність двигуна	800 кВт
Тип двигуна	ДА30-450У-4У1
Напруга мережі живлення	6000 В

Підвищення вимог до якості технологічних процесів і впровадження сучасних виробничих технологій зумовлюють широке застосування регульованих електроприводів у промисловості та сільському господарстві.

Розвиток теорії машин змінного струму, силової напівпровідникової техніки, перетворювачів частоти та мікропроцесорних систем керування забезпечив створення надійних регульованих асинхронних електроприводів. Завдяки простоті конструкції, високій надійності та масовому виробництву

асинхронні двигуни стали основою сучасного регульованого електропривода. У діапазоні потужностей до 100 кВт їх випускають у десятки разів більше, ніж двигунів постійного струму.

Сучасний електропривод виконує не лише функцію перетворення електричної енергії в механічну, а й є важливим засобом автоматизованого керування технологічними процесами. Зміна частоти обертання двигуна відповідно до фактичного навантаження дає змогу підтримувати необхідні параметри роботи обладнання та зменшувати непродуктивне споживання ресурсів.

З огляду на зростання вартості електроенергії та обмежені можливості збільшення генерувальних потужностей особливого значення набуває енергозбереження у сфері споживання. Оскільки електроприводи є одними з найбільших промислових споживачів електроенергії, значний потенціал економії пов’язаний із застосуванням частотно-регульованих систем у поєднанні із засобами технологічної автоматизації.

Використання нерегульованого електропривода вентилятора системи димовидалення має низку недоліків. Значний момент інерції вентилятора спричиняє тривалий пуск, високі пускові струми та підвищене навантаження на систему електропостачання. Під час розгону виникають значні динамічні моменти, які негативно впливають на електродвигун, муфти, підшипники та інші механічні елементи установки.

Робота вентилятора з постійною номінальною частотою обертання також супроводжується надлишковим споживанням активної та реактивної електроенергії. Особливо значними є втрати в періоди, коли фактична інтенсивність газовиділення є нижчою за розрахункову продуктивність системи. При цьому частина електроенергії витрачається непродуктивно та перетворюється на теплові втрати в двигуні й елементах електропривода. Традиційне механічне регулювання продуктивності за допомогою дросельних заслінок зменшує витрату газу, однак двигун продовжує працювати практично з номінальною частотою обертання. Тому значна частина потужності втрачається

на подолання додаткового аеродинамічного опору. Більш ефективним рішенням є застосування частотно-регульованого електропривода, який дозволяє змінювати продуктивність димососа шляхом регулювання частоти обертання вентилятора. Це забезпечує зниження пускових струмів, механічних навантажень, нагрівання двигуна та загального споживання електроенергії. Порівняльну характеристику споживання електроенергії вентилятором за умови дросельного регулювання та частотного керування при продуктивності димососа 60 % наведено на рисунку 3.4.

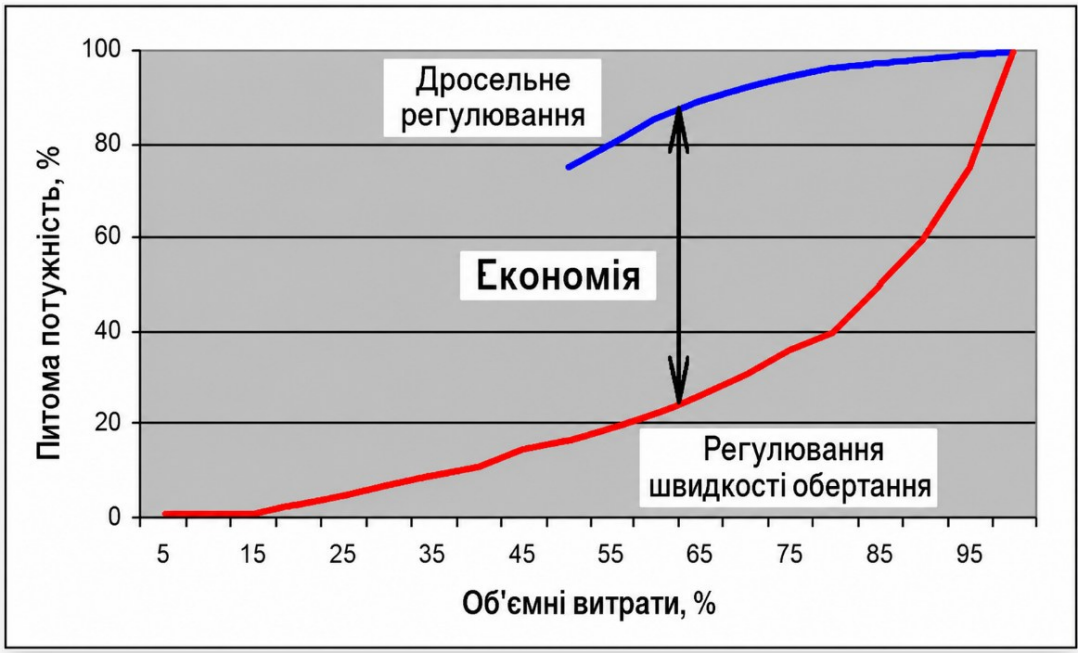


Рисунок 3.4. – Порівняння поміж дросельним керуванням та регулюванням швидкості обертів з 60% об’ємними витратами.

3.2.2 Основні шляхи підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів

Основним видом регульованого електроприводу сьогодні є частотно-регульований асинхронний електропривод за схемою «перетворювач частоти — асинхронний двигун». Він забезпечує плавне регулювання швидкості, високі

енергетичні показники та широкі можливості автоматизації. Для окремих технологічних завдань також застосовують систему «тиристорний перетворювач напруги — асинхронний двигун», у якій регулювання здійснюється зміною напруги статора.

На підприємствах і надалі експлуатуються асинхронні двигуни з фазним ротором, швидкість яких регулюють введенням додаткового опору в коло ротора. Такі реостатні електроприводи особливо поширені у підйомно-транспортних механізмах, зокрема в кранах і підйомниках.

Основні напрями енергозбереження в асинхронному електроприводі можна поділити на три групи.

Перший напрям передбачає зменшення втрат електроенергії без зміни технологічного процесу. Він стосується як механізмів із частими пусками та гальмуваннями, так і установок із тривалим режимом роботи та повільною зміною навантаження. До них належать крани, підйомники, прокатні механізми, насоси, вентилятори, компресори й конвеєри. Економія досягається завдяки зниженню втрат у сталих і перехідних режимах.

Другий напрям пов’язаний зі зміною способу керування технологічним процесом. Перехід від нерегульованого електроприводу до керованого дає змогу змінювати продуктивність механізму відповідно до фактичної потреби. Це особливо ефективно для вентиляторів, насосів, компресорів, конвеєрів і систем регулювання співвідношення палива та повітря.

Третій напрям полягає у використанні електроприводу як елемента комплексної системи автоматизації енергоємного технологічного процесу. У таких установках потужність самого приводу може бути відносно невеликою, однак він керує значним енергетичним потоком. До таких об’єктів належать електродугові, вакуумно-дугові та рудовідновні печі, а також установки індукційного нагріву. Точність, швидкодія та надійність електроприводу безпосередньо впливають на загальну енергоефективність обладнання.

До основних способів зниження втрат в асинхронному електроприводі належать:

Правильний вибір потужності двигуна. Надмірно потужний двигун працює з низьким завантаженням, що зменшує ККД і коефіцієнт потужності. Недостатня потужність, навпаки, спричиняє перевантаження та перегрівання.

Застосування енергоефективних двигунів. Використання якісніших електротехнічних матеріалів і збільшення активної маси міді та сталі дає змогу підвищити ККД і зменшити експлуатаційні витрати.

Перехід до сучасних систем керування. Найменші втрати в широкому діапазоні швидкостей забезпечує частотно-регульований електропривод. Реостатні системи та регулювання напругою є менш ефективними, особливо в перехідних режимах.

Автоматичне регулювання напруги за навантаженням. Такий спосіб доцільний для механізмів із тривалою роботою та змінним навантаженням, оскільки дозволяє знизити втрати при недовантаженні двигуна.

Удосконалення алгоритмів керування. Оптимізація систем регулювання за енергетичними критеріями дає змогу зменшити струми, втрати потужності та нагрівання двигуна.

Найбільший ефект забезпечує комплексне застосування цих заходів: правильний вибір двигуна, використання перетворювача частоти, автоматизація технологічного процесу та контроль фактичного навантаження.

Вентилятори є одними з найпоширеніших промислових механізмів після насосів. Вони використовуються у вентиляційних системах, системах кондиціювання, газовідведення та охолодження води в градирнях. Великі вентилятори зазвичай працюють із порівняно низькою частотою обертання через обмеження швидкості кінців лопатей.

Робочі колеса вентиляторів мають значний момент інерції, який часто перевищує момент інерції двигуна. Це ускладнює пуск і збільшує тривалість розгону, а в окремих випадках потребує застосування електричного гальмування.

Для вентиляторів характерна квадратична залежність моменту опору від частоти обертання, тоді як споживана потужність приблизно пропорційна кубу

швидкості. Тому навіть незначне зниження частоти обертання дає суттєве зменшення споживання електроенергії.

Вентилятори поділяють на відцентрові та осьові. Для регулювання продуктивності відцентрових вентиляторів традиційно використовують дроселювання або поворотні напрямні лопатки. Проте енергетично ефективнішим є регулювання швидкості робочого колеса за допомогою перетворювача частоти, оскільки воно забезпечує необхідну витрату повітря без значних додаткових втрат.

Аеродинамічні характеристики димососа типу ВМ-20А при регулюванні кута $\Theta_{н.а}$ повороту лопатей направляючої лопаті і $n_{ном}$ = 1000 об / хв показані на рисунку 3.5.

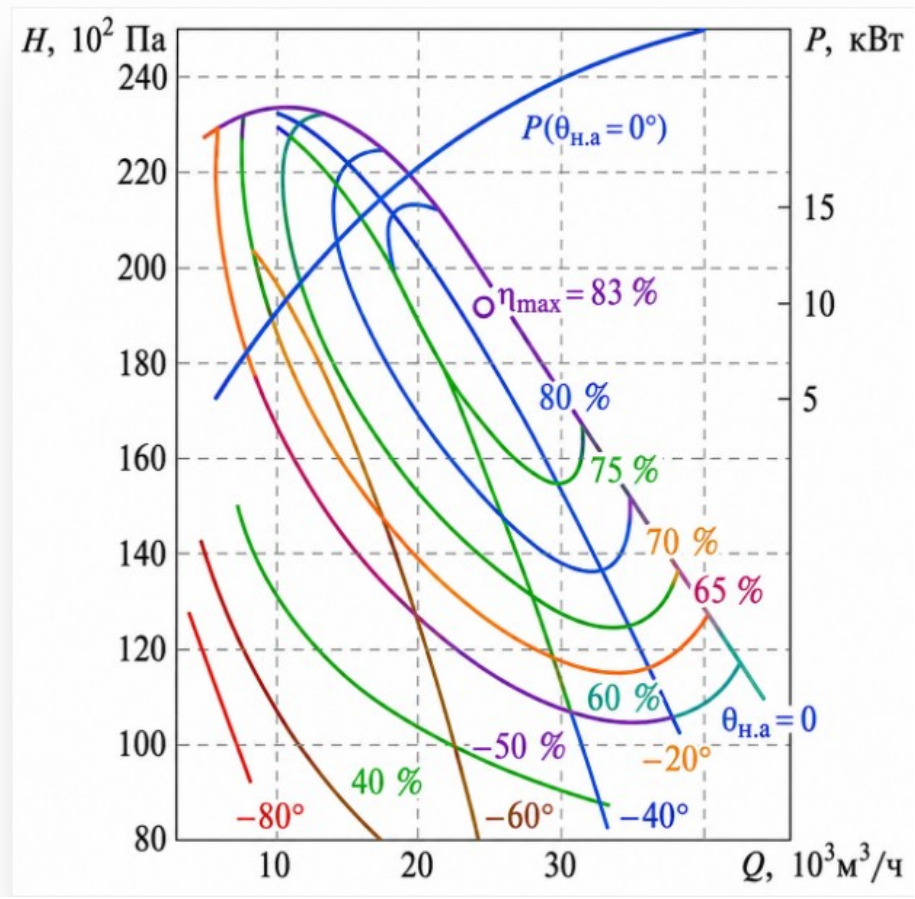


Рисунок 3.5. – Аеродинамічні характеристики димососу типу ВМ-20А при регулюванні направляючим апаратом при $n_{ном}$ = 1000 об/хв

За такого способу регулювання продуктивності енергетична ефективність вентилятора помітно знижується. Зміна положення напрямних лопаток може виконуватися вручну залежно від потреби або автоматично за допомогою виконавчого механізму. Водночас у системах автоматичного керування такі пристрої застосовують обмежено через складність конструкції, підвищені вимоги до обслуговування та недостатню експлуатаційну надійність.

Ще менш економічним є регулювання продуктивності вентилятора шляхом зміни площі перерізу вихідного каналу за допомогою заслінки. За принципом дії цей спосіб подібний до дросельного регулювання насосних установок. У цьому разі характеристика самого вентилятора практично не змінюється, натомість змінюється опір повітропровідної мережі, що призводить до додаткових втрат енергії.

Якщо подача вентилятора регулюється зміною швидкості, то характеристика мережі відповідає формулі (3.1) з $HC = 0$, т. Е. $H = RQ^2$, а ефективність вентилятора у всьому діапазоні регулювання залишається постійною. Потужність, що споживається двигуном вентилятора з мережі (без урахування ККД вентилятора), може бути оцінена за виразами, отриманими з (3.1) і (3.2). Отже, при регулюванні за допомогою засувки:

$$P_{1*} = \frac{1 + aS_{ном}}{1 - S_{ном}} Q* \qquad (3.1)$$

і з регулюванням частоти

$$P_{1*} = Q* + \frac{(1 + a)S_{ном}}{1 - S_{ном}} Q* \qquad (3.2)$$

Залежності споживаної потужності, побудовані за формулами (3.1) і (3.2), показані на рисунку 3.6. Пунктирною лінією показані графіки потужності двигуна з урахуванням ККД вентилятора. З рисунка 3.6 видно, що споживана

потужність в частотно-регульованому приводі вентилятора значно нижче, ніж при регулюванні затвором практично при будь-якій витраті Q, крім точки номінального режиму.

Вентилятори осьового потоку мають характеристики, наведені на рисунку 3.7, які відрізняються за формою від характеристик відцентрових машин. Відмінність полягає в тому, що ліва сторона осьового вентилятора має провали і є нестабільною, через що його робота можлива тільки в зоні нижче граничної головки. Права (робоча) частина характеристик осьових машин круто падає.

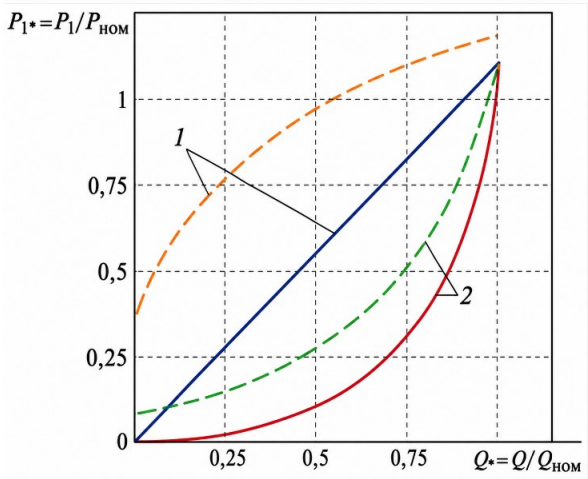


Рисунок 3.6. – Залежності зміни потужності, що вживається з мережі електроприводом вентилятора, при регулюванні шибером (1) та частотному регулюванні (2).

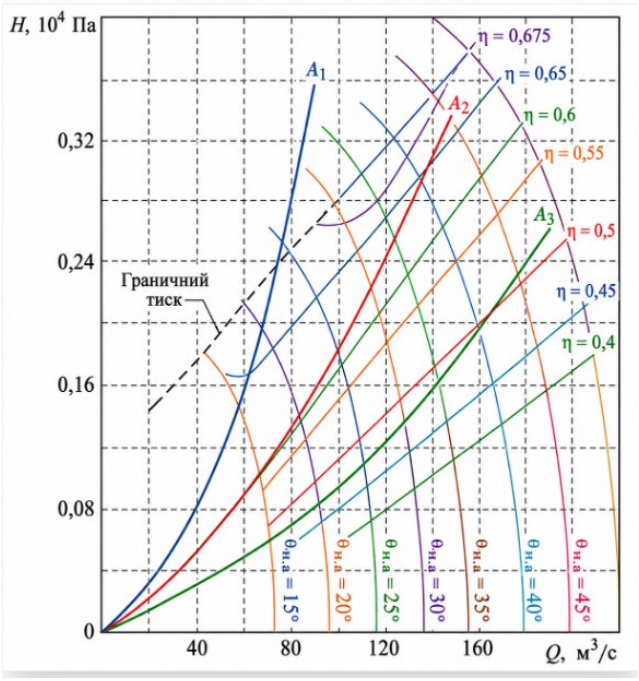


Рисунок 3.7. – Експлуатаційні характеристики вентилятора ВМ – 20А.

Подача осьових вентиляторів може регулюватися зміною кута встановлення лопаток робочого колеса. У більшості конструкцій поворот лопаток здійснюється лише після зупинки вентилятора, тому такий спосіб малопридатний для систем автоматичного керування. Механізми зміни кута лопаток під час роботи значно ускладнюють конструкцію та знижують надійність агрегату.

За регулювання поворотом лопаток криві однакового ККД осьового вентилятора розташовані майже перпендикулярно до характеристик H=f(Q). Зі зменшенням напору ефективність вентилятора помітно знижується. Це відрізняє осьові машини від відцентрових, у яких криві однакового ККД за регулювання напрямним апаратом переважно проходять паралельно до напірних характеристик.

Регулювання продуктивності осьового вентилятора зміною частоти обертання також має певні обмеження. Наприклад, за фіксованого кута встановлення лопаток Θн.а=47°° робота в мережах із характеристиками, розташованими ліворуч від лінії ОА2, може призвести до переходу вентилятора в нестійкий режим. Робота з характеристиками, що лежать праворуч від ОА2, зокрема ОА3, є малоефективною, оскільки ККД вентилятора не перевищує приблизно 0,5.

Отже, діапазон економічної роботи осьового вентилятора лише за рахунок зміни частоти обертання є відносно вузьким. За значних змін параметрів мережі доцільно застосовувати комбіноване регулювання: періодично змінювати кут установлення лопаток, а безперервне коригування продуктивності здійснювати зміною швидкості обертання. Тому вибір способу керування осьовим вентилятором потребує попереднього аналізу можливих робочих режимів.

Застосування регульованого електропривода дає змогу підвищити енергетичну ефективність вентиляційної установки, спростити її механічну частину та забезпечити узгоджену роботу кількох вентиляторів. За окремими даними, ККД вентиляторів із регульованим приводом може бути в середньому на 12 % вищим порівняно з нерегульованими установками [1].

Вентилятори працюють переважно в тривалому режимі зі спокійним навантаженням без значних перевантажень. Водночас вони мають великий момент інерції, що необхідно враховувати під час розрахунку пускових режимів. Пуск може здійснюватися із закритим або відкритим напрямним апаратом. У першому випадку момент опору становить приблизно 0,4 номінального, у другому — наближається до номінального. Для потужних вентиляторів із великим робочим колесом необхідно обмежувати прискорення під час розгону, щоб уникнути надмірних динамічних навантажень на лопатки.

Найбільш повно зазначеним вимогам відповідає частотно-регульований асинхронний електропривод. Для вентиляторних механізмів, як правило, достатньо застосування відносно простих і економічних систем частотного керування.

3.2.3. Вибір частотного перетворювача швидкості обертання вентилятора

Перетворювачі частоти широко застосовуються для регулювання режимів роботи насосних і вентиляторних установок, які характеризуються квадратичною залежністю моменту опору від частоти обертання робочого механізму. Використання частотно-регульованого електропривода дає змогу плавно змінювати продуктивність технологічного обладнання відповідно до фактичної потреби виробничого процесу. Крім насосів і вентиляторів, такі перетворювачі можуть застосовуватися в інших електромеханічних системах, для яких не висуваються підвищені вимоги до швидкодії, точності позиціонування та високодинамічного регулювання моменту.

На сучасному ринку електротехнічного обладнання представлений широкий асортимент перетворювачів частоти різної потужності, функціонального призначення та конструктивного виконання. Виробництвом такої техніки займаються провідні міжнародні компанії, зокрема ABB, Schneider

Electric, Siemens, Aparator Control, Danfoss, Mitsubishi Electric, Emotron та інші. Моделі різних виробників відрізняються діапазоном регулювання, алгоритмами керування, переліком захисних функцій, можливостями інтеграції в автоматизовані системи, ступенем захисту корпусу, надійністю та вартістю.

У межах дипломної роботи для регулювання частоти обертання електродвигуна вентилятора димососа електродугової печі ДСП-50 АТ «СПД» пропонується використати перетворювач частоти серії FDU виробництва шведської компанії Emotron. Вибір обладнання цієї серії обумовлений його орієнтацією на керування насосними, вентиляторними та іншими механізмами зі змінним моментом навантаження. Перетворювачі Emotron FDU характеризуються достатньо широкими функціональними можливостями, надійністю, зручністю налаштування та прийнятним співвідношенням між технічними характеристиками і вартістю.

Додатковими аргументами на користь застосування перетворювачів Emotron є наявність вбудованих алгоритмів енергозберігаючого керування, функцій плавного пуску і зупинки електродвигуна, захисту від перевантаження, перегрівання, короткого замикання, обриву фаз та інших аварійних режимів. Використання такого обладнання дає змогу зменшити пускові струми, обмежити механічні навантаження на муфти, підшипники та робочі органи вентилятора, а також скоротити витрати електроенергії за умови роботи димососа з неповним навантаженням.

Перетворювачі частоти Emotron FDU нового покоління охоплюють широкий діапазон номінальних потужностей — від 0,75 кВт до 1,6 МВт. Це дозволяє застосовувати обладнання цієї серії як у малопотужних допоміжних механізмах, так і в потужних промислових електроприводах металургійних, гірничодобувних, енергетичних та інших підприємств. Перетворювачі випускаються для різних класів напруги живлення, зокрема 3×380 В, 3×500 В і 3×690 В, що забезпечує можливість їх узгодження з параметрами промислових електричних мереж та електродвигунів.

Моделі потужністю до 132 кВт у базовій комплектації обладнуються міцним металевим корпусом зі ступенем захисту IP54. Таке виконання забезпечує захист внутрішніх елементів перетворювача від потрапляння пилу, випадкового контакту з рухомими або струмопровідними частинами, а також від бризок води. Завдяки цьому перетворювач може встановлюватися безпосередньо у виробничому приміщенні поблизу електродвигуна та технологічного механізму без обов'язкового розміщення в окремій електротехнічній шафі.

Ступінь захисту IP54 особливо важливий для умов металургійного виробництва, де обладнання може експлуатуватися за підвищеної запиленості, наявності металевих частинок, температурних коливань і механічних впливів. Водночас під час вибору місця встановлення необхідно забезпечити належну вентиляцію перетворювача, дотримання допустимого температурного режиму та зручний доступ для технічного обслуговування.

Застосування частотного перетворювача Emotron FDU в електроприводі вентилятора димососа електродугової печі дозволить регулювати його продуктивність шляхом зміни частоти обертання робочого колеса. Порівняно з дросельним регулюванням або зміною положення напрямних апаратів такий спосіб є більш енергоефективним, оскільки зменшення витрати газу досягається не створенням додаткового аеродинамічного опору, а зниженням швидкості електропривода.

Таким чином, упровадження частотно-регульованого електропривода димососа сприятиме зменшенню споживання електричної енергії, підвищенню плавності регулювання продуктивності вентилятора, зниженню рівня механічного зношування обладнання та покращенню надійності всієї системи газовідведення електродугової печі. Крім того, можливість інтеграції перетворювача в систему автоматичного керування дасть змогу підтримувати необхідне розрідження в печі відповідно до поточного етапу технологічного процесу.

Як і попередня серія, FDU 2.0 (рисунку3.8) розроблена спеціально для насосів і вентиляторів і є одним з найбільш технічно досконалих перетворювачів частоти сучасності.



Рисунок 3.8. – Перетворювачі частоти серії FDU

Основні характеристики перетворювача частоти FDU перераховані нижче.

- Частотні перетворювачі забезпечують повний електронний захист перетворювача і двигуна від перевантаження по струму, перегріву, витоку грунту і обриву фаз.

- Перетворювач дозволяє контролювати і виводити на цифровий дисплей основні параметри системи: задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність і крутний момент, стан цифрових входів, загальний час роботи перетворювача і т.д.

- Частотний перетворювач може управлятися як з вбудованої цифрової панелі, так і за допомогою зовнішніх сигналів. У другому випадку швидкість обертання задається аналоговим сигналом 0-10В або 4-20мА, а команди на пуск, зупинку і зміну режимів подаються дискретними сигналами. Вивести параметри системи у вигляді графіків можна на виносну графічну панель (рисунку3.9).



Рисунок 3.9. – Панель керування частотним перетворювачем

Враховуючи, що в системі вихлопної системи електродугової печі використовується вентилятор ВМ-20А потужністю 800 кВт, для управління таким вентилятором необхідно використовувати перетворювач ФДУ 2.0 НГД 48-1500-20СЕБ з гальмівним блоком. Вартість зазначеної моделі перетворювача становить 41 822,00 у.о., ступінь захисту – IP 20.



Рисунок 3.10. – Комплект для керування димососом

Як видно з рисунку 3.10 у комплект управління димососом входить датчик вакууму, в якості такого датчика ми використовуємо прилад МТ-100Р від харківського виробника ТОВ «Промприлад». Середня вартість цього пристрою становить 11270 грн.

Враховуючи, що впровадження пристрою частотного регулювання в систему димососа пічки дозволяє знизити споживання електроенергії в діапазоні 20-25%, то на підставі тарифу на електроенергію (станом на 1.02.2025 р.), який становить 0,47 грн/кВт·год, використання перетворювача дозволить заощадити до 1,38 млн кВт або 650 тисяч гривень на рік на одній плиті ДСП-50.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі з метою підвищення енергетичної ефективності процесу виплавки сталі в умовах сталеплавильного цеху № 2 ПрАТ «Дніпроспецсталь» запропоновано комплекс енергозберігаючих заходів, спрямованих на зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів і раціональне використання вторинної теплової енергії. До складу запропонованого комплексу входять система утилізації теплоти відхідних технологічних газів та впровадження частотно-регульованого електропривода вентилятора димососа електродугової печі.

У цеху експлуатуються п’ять електродугових печей типу ДСП-50 та одна установка «піч-ківш». Потужність кожного з основних сталеплавильних агрегатів становить близько 20 МВт. Система газовидалення кожної електродугової печі обладнана потужним вентилятором-димососом типу ВМ-20А з номінальною потужністю електродвигуна 800 кВт. Значна встановлена потужність основного та допоміжного обладнання обумовлює високий рівень споживання електричної енергії та визначає необхідність пошуку технічно й економічно обґрунтованих способів зниження енерговитрат.

Електросталеплавильне виробництво належить до найбільш енергоємних галузей промисловості. Технологічний процес виплавки сталі супроводжується роботою обладнання за надзвичайно високих температур. У процесі плавлення температура металу може досягати 1800–1900 °C, унаслідок чого в електродуговій печі утворюються значні теплові потоки. Частина підведеної енергії корисно використовується для розплавлення металевої шихти та проведення необхідних металургійних реакцій, однак значна її частка втрачається через футеровку, систему охолодження, випромінювання, відкриття робочого простору печі та видалення нагрітих технологічних газів.

Особливо значними є втрати теплоти з відхідними газами, які залишають робочий простір печі за високої температури та виводяться через систему газоочищення в навколишнє середовище. За відсутності спеціального утилізаційного обладнання теплова енергія цих газів практично не використовується, що знижує загальний коефіцієнт корисного використання енергії сталеплавильного агрегату. Тому одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності є повернення частини втраченої теплоти назад у технологічний цикл.

У дипломній роботі запропоновано встановлення утилізатора теплоти відхідних газів, призначеного для попереднього нагрівання металобрухту та інших компонентів шихти перед їх завантаженням в електродугову піч. Попереднє нагрівання шихтових матеріалів дає змогу зменшити кількість електричної енергії, необхідної для їх нагрівання та розплавлення безпосередньо в печі. Крім того, використання утилізованої теплоти сприяє скороченню тривалості плавки, зменшенню навантаження на пічний трансформатор, підвищенню продуктивності сталеплавильного агрегату та зниженню питомих витрат електроенергії на одну тонну виплавленої сталі.

За результатами попередніх техніко-економічних розрахунків установлено, що впровадження системи утилізації теплоти відхідних газів може забезпечити річний економічний ефект у розмірі до 3,5 млн грн. Отримана економія формується переважно за рахунок зниження споживання електроенергії електродуговими печами, скорочення тривалості технологічного циклу та більш ефективного використання енергетичного потенціалу гарячих газів.

Другим запропонованим енергозберігаючим заходом є застосування частотного перетворювача для регулювання частоти обертання електродвигуна вентилятора димососа. Необхідність такого регулювання зумовлена циклічним характером електросталеплавильного процесу. Інтенсивність утворення технологічних газів істотно змінюється залежно

від окремої стадії плавки. Максимальне газовиділення спостерігається під час завантаження шихти, розплавлення металобрухту, продування ванни киснем і проведення окиснювальних реакцій. Водночас на інших етапах технологічного циклу потреба в максимальній продуктивності газовідвідної системи значно зменшується.

За традиційної нерегульованої роботи електродвигун вентилятора димососа тривалий час функціонує з номінальною або близькою до номінальної частотою обертання незалежно від фактичної кількості газів, що видаляються. Це призводить до нераціонального споживання електричної енергії, підвищеного механічного зношування обладнання та надлишкового розрідження в газовідвідному тракті. Застосування частотно-регульованого електропривода дає змогу змінювати продуктивність вентилятора відповідно до поточного технологічного навантаження печі.

Регулювання швидкості обертання вентилятора за допомогою частотного перетворювача дозволяє підтримувати необхідний рівень розрідження та забезпечувати ефективне видалення газів без постійної роботи електродвигуна на повній потужності. Оскільки потужність, споживана вентилятором, істотно залежить від частоти його обертання, навіть відносно невелике зниження швидкості може забезпечити значне скорочення витрат електроенергії. Додатковими перевагами частотного регулювання є плавний пуск електродвигуна, зменшення пускових струмів, зниження динамічних навантажень на механічні елементи, підвищення надійності обладнання та збільшення терміну його експлуатації.

Результати проведених розрахунків показали, що впровадження частотного регулювання електропривода вентилятора димососа дозволить отримати економію витрат на електричну енергію в розмірі близько 650 тис. грн на рік. При цьому забезпечується не лише економічний ефект, а й підвищується якість керування газовідвідною системою, покращуються

умови експлуатації вентиляційного обладнання та зменшується негативний вплив сталеплавильного виробництва на навколишнє середовище.

Таким чином, запропоновані заходи утворюють комплексну систему підвищення енергетичної ефективності електросталеплавильного виробництва. Використання теплоти відхідних газів забезпечує скорочення енерговитрат безпосередньо на процес нагрівання та плавлення металевої шихти, а частотно-регульований електропривод димососа знижує споживання електроенергії допоміжним обладнанням. Сукупний економічний результат від реалізації розглянутих заходів підтверджує їхню технічну та економічну доцільність.

Результати техніко-економічного обґрунтування показали, що капітальні витрати, необхідні для реалізації запропонованих рішень, можуть бути компенсовані за рахунок отриманої економії протягом приблизно 0,26 року. Такий незначний термін окупності свідчить про високу ефективність проєкту та доцільність його практичного впровадження в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь». Реалізація запропонованого комплексу заходів дозволить знизити собівартість виплавленої сталі, скоротити питомі витрати енергетичних ресурсів, підвищити надійність роботи технологічного обладнання та покращити загальні техніко-економічні показники роботи сталеплавильного цеху.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hughes A., Drury B. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. 5th ed. Oxford : Newnes, 2019.

2. Barnes M. *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*. Oxford : Newnes, 2003.

3. Blank L. T., Tarquin A. *Engineering Economy*. 9th ed. New York : McGraw Hill, 2024.

4. Waide P., Brunner C. U. *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*. Paris : OECD Publishing, International Energy Agency, 2011. 132 p.

5. U.S. Department of Energy. *Improving Fan System Performance: A Sourcebook for Industry*. Washington, DC : U.S. Department of Energy, 2003. 92 p. Report No. DOE/GO-102003-1294.

6. U.S. Department of Energy. *Improving Motor and Drive System Performance: A Sourcebook for Industry*. Washington, DC : U.S. Department of Energy, 2014. 96 p.

7. Emotron. *Emotron FDU 2.0 AC Drive: Instruction Manual*. Document No. 01-5325-01r4. Helsingborg : CG Drives & Automation Sweden AB, 2016.

8. IEC 61800-2:2021. *Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Part 2: General Requirements – Rating Specifications for Low-Voltage Adjustable-Speed AC Power Drive Systems*. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2021.

9. IEC 61800-3:2022. *Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Part 3: EMC Requirements and Specific Test Methods for Power Drive Systems and Machine Tools*. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2022.

10. IEC 61800-5-1:2022. *Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Part 5-1: Safety Requirements – Electrical, Thermal and Energy*. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2022.

11. IEC 60034-30-1:2025. *Rotating Electrical Machines – Part 30-1: Efficiency Classes of Line-Operated AC Motors (IE Code)*. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2025.

12. ISO 5801:2017/Amd 1:2025. *Fans – Performance Testing Using Standardized Airways – Amendment 1*. Geneva : International Organization for Standardization, 2025.

13. ISO 12759-1:2023. *Fans – Efficiency Classification for Fans – Part 1: General Requirements*. Geneva : International Organization for Standardization, 2023.

14. ISO 12759-4:2019. *Fans – Efficiency Classification for Fans – Part 4: Driven Fans at Maximum Operating Speed*. Geneva : International Organization for Standardization, 2019.

15. ASHRAE. *2024 ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment*. Peachtree Corners, GA : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2024.

16. Remus R., Aguado-Monsonet M. A., Roudier S., Delgado Sancho L. *Best Available Techniques Reference Document for Iron and Steel Production*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2013. 627 p. DOI: 10.2791/97469.

17. World Steel Association. *Energy Use in the Steel Industry*. Brussels : World Steel Association, 2021.

18. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S. A. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2018. Vol. 6. P. 268–289. DOI: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.

19. Alshehhi I., Alnahdi W., Hassan Ali M. I., Bouabid A., Sleptchenko A. Assessment of waste heat recovery in the steel industry. *Journal of*

Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2023. Vol. 11, No. 2. Article 1100440. DOI: 10.13044/j.sdewes.d10.0440.

20. Saidur R., Mekhilef S., Ali M. B., Safari A., Mohammed H. A. Applications of variable speed drive in electrical motors energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No. 1. P. 543–550. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.020.

21. Du Plessis G. E., Liebenberg L., Mathews E. H. The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems. *Applied Energy*. 2013. Vol. 111. P. 16–27. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.04.061.

22. Sadek M., El-Maghraby R. M., Fathy M. Evaluation of variable speed drives to improve energy efficiency and reduce gas emissions: case study. *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. 2023. DOI: 10.2298/CICEQ220318018S.

23. Schibuola L., Scarpa M., Tambani C. Variable speed drive technology applied to HVAC systems for energy saving: an experimental investigation. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 806–813. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.08.117.