

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій  
(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом  
електролізу алюмінію

Виконав: студент

VI курсу, групи КТМ-61

спеціальності

174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва спеціальності)

Іванов Р.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Голотенко О.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Тернопіль  
2023

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Микитишин А.Г.  
(підпис) (прізвище та ініціали)

«    »                      2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Іванову Роману Олеговичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом електролізу алюмінію

Керівник роботи Голотенко Олександр Сергійович, к.т.н., доцент кафедри КТ  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «    »                      2023 року №                     

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про електроліз алюмінію

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна

Спеціальна частина

Безпека в надзвичайних ситуаціях, охорона праці, Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Тотосько О.В., доцент кафедри КТ		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В. М., проректор з адміністративно-господарської роботи та будівництва		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	25.11.2023	Виконано
2.	Підбір наукових джерел по темі роботи	26.11.2023-28.11.2023	Виконано
3.	Опрацювання наукових публікацій та збір даних по темі роботи	29.11.2023-1.12.2023	Виконано
4.	Виконання дослідження згідно мети кваліфікаційної роботи	2.12.2023-4.12.2023	Виконано
5.	Оформлення першого та другого розділів	5.12.2023-7.12.2023	Виконано
6.	Оформлення третього розділу	8.12.2023-10.12.2023	Виконано
7.	Оформлення четвертого розділу	11.12.2023-13.12.2023	Виконано
8.	Виконання завдання до підрозділу «Охорона праці»	14.12.2023-15.12.2023	Виконано
9.	Виконання завдання до підрозділу «Безпека в надзвичайних ситуаціях»	16.12.2023-17.12.2023	Виконано
10.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.12.2023-19.12.2023	Виконано
11.	Нормоконтроль	19.12.2023-20.12.2023	Виконано
12.	Перевірка на плагіат	21.12.2023	Виконано
13.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	22.12.2023	Виконано
14.	Захист кваліфікаційної роботи		

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Іванов Р. О.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Голотенко О.С.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить \_\_\_\_\_.

Об'єм пояснювальної записки складає 72 друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано 36 літературних джерел.

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування процесом електролізу алюмінію. Розглянуто тенденції автоматизації в промисловості виробництва алюмінію.

Надано формалізований опис вхідних і вихідних параметрів, а також керуючих і збурюючих впливів, на основі чого сформовано модель процесу, що дозволило забезпечити більш ефективне керування. На основі отриманих даних та результатів кореляційного аналізу побудовано концептуальну модель процесу виробництва алюмінію в електролізері.

Побудовано математичну модель, яка дає змогу визначити ступінь впливу зміни окремих параметрів процесу на його кінцеві результати та на якість одержуваної продукції.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, АЛЮМІНІЙ, ЕЛЕКТРОЛІЗЕР, МОДЕЛЮВАННЯ, АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА .....	6
1.1 Тенденції автоматизації в алюмінієвій галузі .....	6
1.2. Огляд аспектів виробництва алюмінію.....	10
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА .....	13
2.1 Характеристика технологічного процесу виробництва алюмінію .....	13
3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА .....	21
3.1 Структурна ідентифікація процесу виробництва алюмінію.....	21
4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	29
4.1 Експертний аналіз та обробка результатів за допомогою кореляційного аналізу.....	29
5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	53
5.1 Цифрова трансформація .....	53
5.2 Індустрія 4.0.....	53
5.3 Цифрова трансформація в алюмінієвій промисловості .....	56
6 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ, ОХОРОНА ПРАЦІ.....	57
6.1. Система управління охороною праці .....	57
6.2. Вимоги до робочого середовища користувача ЕОМ: мікроклімат, освітлення, рівень шуму, електромагнітне випромінювання .....	60
6.3. Створення і функціонування системи моніторингу довкілля з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території .....	62

6.4. Організація цивільного захисту на об'єктах промисловості та виконання заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного походження .....	65
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ .....	68
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	69

## ВСТУП

Технологічний процес електролізу алюмінію є складним науково-технічним завданням. Це пов'язано з великою кількістю внутрішніх, зовнішніх і результатних факторів. Метою роботи є аналіз цих факторів, оцінка їх та їх впливу на технологічний процес електролізу та розробка комплексної та математичної моделі виробництва алюмінію в електролізері Содерберга. У роботі проаналізовано технологічний процес виробництва первинного алюмінію на основі методу Байєра, а потім на основі методу Холла–Еру. Проаналізовано існуючі методи та технології комп'ютерного моделювання технологічного процесу. Розглянуто сучасні методи аналізу теплових і електромагнітних полів в електролізерах. На основі поглибленого аналізу визначено ряд факторів, що впливають на процес виробництва первинного алюмінію. Використовуючи методи системного аналізу для аналізу ідентифікованих факторів, отримано ранжований список факторів за ступенем впливу. Використовуючи діаграму Парето, ми отримуємо список факторів з максимальним впливом. Виведено концептуальну модель технологічного процесу. На основі отриманої концептуальної моделі виведено математичну модель технологічного процесу. Проведено автоматизацію процесу виробництва алюмінію.

## 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Тенденції автоматизації в алюмінієвій галузі

Алюміній є другим найбільш виробленим металом, поступаючись лише сталі для сучасних суспільств. За останні десятиліття на нього значно зріс попит у транспортній, будівельній, пакувальній та електротехнічній промисловості. У 2021 році в усьому світі було вироблено приблизно 67 мільйонів метричних тонн алюмінію в електролізерах. Прогнозується постійне щорічне зростання на 2,65% до 2029 року, що призведе до прогнозованого річного виробництва 78,4 мільйонів метричних тонн алюмінію до 2029 року. Сектор виробництва алюмінію є однією з найбільш енергоємних галузей промисловості сучасності та має серйозний вплив на навколишнє середовище. Приблизно 1% глобальних викидів парникових газів можна пояснити виробництвом первинного алюмінію, а 4% світової електроенергії споживає промисловість первинного алюмінію. Попередником виплавки алюмінію є процес Байера. Процес Байера передбачає видобуток бокситу, осадової породи, і його переробку в глинозем ( $Al_2O_3$ ). На заводах з виплавки первинного алюмінію оксид алюмінію розчиняють у розплавленому кріоліті в електролітних ємностях, і через розчин пропускають струм. Атом вуглецю відокремлюється від оксиду алюмінію та зв'язується з вуглецем, який присутній в аноді, залишаючи розплавлений алюміній на дні ємності.

На сучасних алюмінієвих заводах попередньо обпалені аноди систематично змінюються операторами за допомогою мостових кранів, оскільки вони витрачаються в процесі відновлення. Оператор відкачує рідкий алюміній із ємностей у великий тигель, який потім транспортним засобом транспортує до ливарного цеху. У ливарному цеху алюміній обробляється,



легуючі елементи змішуються з алюмінієм, і алюмінієвий сплав відливається в продукти, які потім продаються клієнтам для подальшої обробки.

Виробництво первинного алюмінію - це складний і безперервний процес, що працює в замкнутому циклі. Зміни, внесені на ранніх стадіях виробничого процесу, можуть вплинути на процеси на наступних стадіях виробництва, таким чином перешкоджаючи можливості алюмінієвих заводів для експериментів з покращення виробництва. Огляд основних процесів на алюмінієвих заводах можна знайти нижче на рис. 1.1.

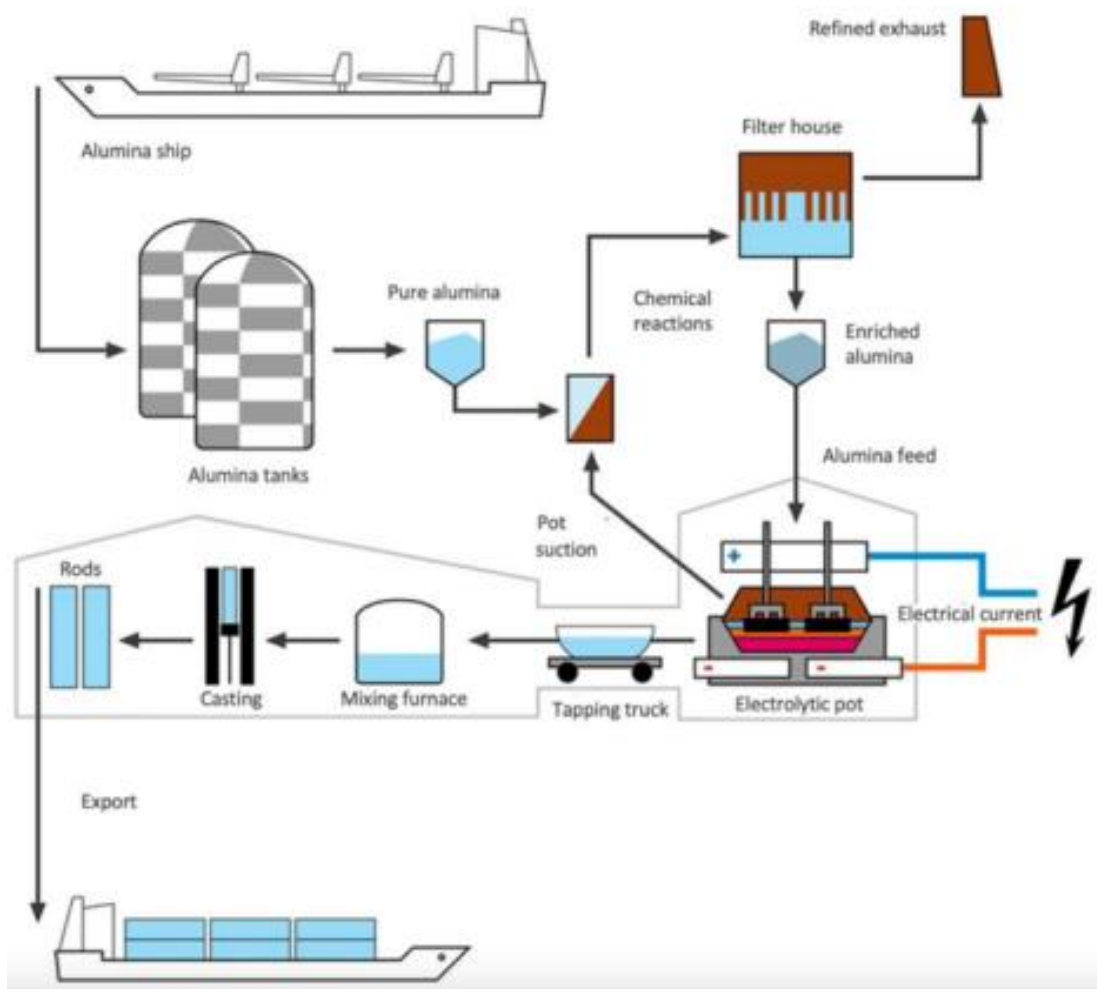


Рисунок 1.1 - Виробничий процес алюмінієвого заводу.

Виробничий процес відрізняється на заводах вторинного алюмінію. Замість виробництва алюмінію в електролітних ємностях перероблений алюміній збирають, подрібнюють і знімають покриття для видалення забруднень з поверхні. Подрібнений алюміній потім переплавляють і обробляють перед тим, як відливати у вироби так само, як на заводах з виплавки первинного алюмінію. Виробництво вторинного алюмінію (SAP) є життєво важливим для збереження навколишнього середовища. Це вимагає менше енергії та виробляє менше викидів газу, ніж первинне виробництво плавки алюмінію. Це також має опосередкований вплив на зменшення видобутку бокситів і споживання глинозему через меншу кількість первинного алюмінію, що використовується у виробництві алюмінієвих виробів. SAP — це галузь, що розвивається, і Європейська алюмінієва асоціація прогнозує, що до 2050 року виробництво алюмінію після споживання, доступного для переробників, може зрости більш ніж удвічі з 3,8 мільйона тонн на рік до 8,6 мільйона тонн на рік у Європі, і за прогнозами галузь SAP буде відповідальний за понад 50% загального обсягу алюмінію, виробленого за рік у всьому світі.

DTE — це інноваційна стартап-компанія, яка нещодавно почала виробляти та продавати пристрої та рішення для алюмінієвої промисловості після років розвитку. Компанія DTE розробила перший у галузі елементний аналізатор, який здатний аналізувати хімічний склад розплавленого алюмінію в режимі реального часу за допомогою рідкофазної лазерно-індукованої спектроскопії пробую. Ця нова технологія замінює поточні ручні та трудомісткі методи аналізу хімічного складу алюмінію, які вимагають відливання твердого зразка, тоді як розчин DTE може вимірювати безпосередньо з розплавленого металу. Рішення DTE під назвою IREAS складається з елементних аналізаторів і хмарної платформи на основі штучного інтелекту.

Аналіз у режимі майже в реальному часі в поєднанні з програмним забезпеченням прогнозного аналізу технічного обслуговування має позитивні результати для цехів виплавки алюмінію. Застосування аналізаторів на місці в ливарних цехах з виробництва алюмінію забезпечує платформу для оптимізації процесів лиття, які зараз використовуються в ливарних цехах з виробництва алюмінію.

Аналізатори також надають виробникам вторинного алюмінію можливість покращити використання брухту та знизити експлуатаційні витрати (OpEx). Безпрецедентні знання складу металу протягом усього процесу виробництва алюмінію забезпечують виробникам алюмінію контроль якості, який раніше не був досяжний в алюмінієвій промисловості. IREAS підтримує заводи, щоб покращити планування виробництва, скоротити викиди, скоротити відходи та сприяти підвищенню сталості та безпеки. Цифрова трансформація — це нова тенденція у виробництві, яка дозволяє поєднати цифрові технології зі звичайним виробництвом.

Серія швидких трансформацій, що вказує на стрибок у методах виробництва завдяки залученню кіберфізичних систем, Інтернету речей, Інтернету послуг і формату розумної фабрики. Термін «Промисловість 4.0» (I4.0) стає міжнародним визнаним синонімом оцифрування галузей, об'єднання виробництва з сучасними інформаційними та комунікаційними технологіями. Технології платформи I4.0, включаючи промисловий Інтернет речей (IIoT), цифровий двійник (DT), штучний інтелект (AI), машинне навчання, хмарні обчислення тощо, надають додаткові можливості для алюмінієвої промисловості. Кіберфізичні системи в цілому відносяться до систем, які збирають, зберігають, аналізують і обробляють дані за допомогою IIoT, інтегруючи реальний фізичний і віртуальний світ, включаючи взаємодію людини і машини. Концепція інноваційної екосистеми стала популярною за останні 15 років із швидко зростаючим обсягом літератури (зазвичай зосередженої на бізнесі та стратегії). Інноваційну екосистему

можна визначити як сукупність інституцій та організацій, взаємодію та зв'язок між ними, що підтримує розвиток інновацій та створення знань. Основою цього є те, що вартість не може бути створена окремою компанією, і що потрібен внесок від великої кількості різноманітних учасників, включаючи фірми, університети, дослідницькі центри, регулятори та державні органи.

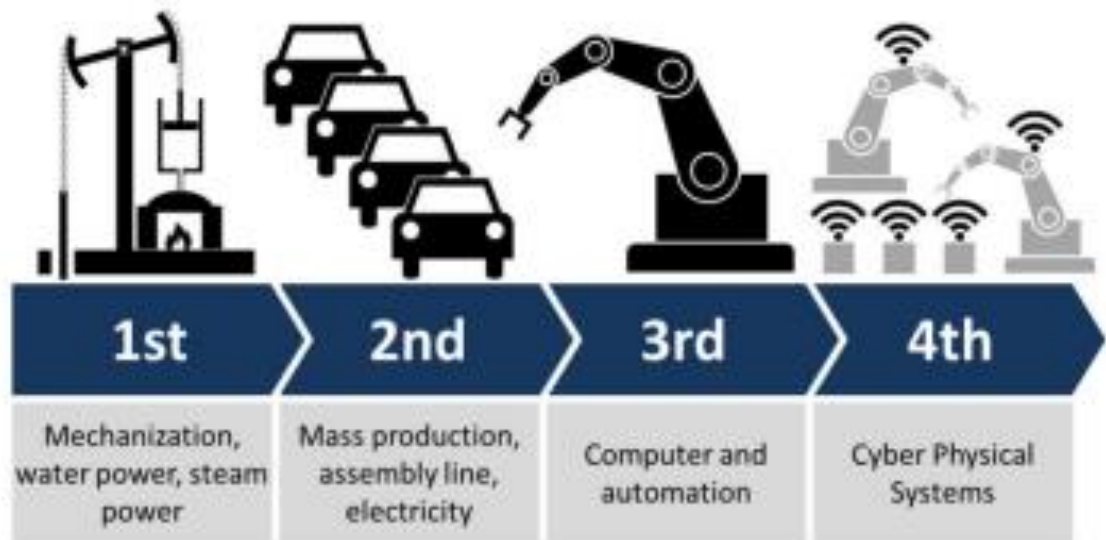


Рисунок 1.2 - Промислові революції

## 1.2. Огляд аспектів виробництва алюмінію

Сьогодні виробництво алюмінію посідає друге місце у світі після сталі. З кожним роком попит на метал зростає, оскільки він затребуваний у різних галузях промисловості та машинобудування [1]. Зростання виробництва відбувається в основному в Азії та на Близькому Сході [2]. З початку 2002 року Китай був провідним у світі виробником алюмінію, і сьогодні його виробництво перевищує половину світового виробництва.

Значення алюмінію та його сплавів у житті сучасної людини неможливо недооцінити. Перш за все, він використовується в авіаційній і автомобільній промисловості, але також широко використовується в

машинобудуванні, приладобудуванні, електротехнічній і хімічній промисловості і т. д. У чистому вигляді алюміній в природі не зустрічається. Розвиток науки і поява електрики дозволили людині відкрити алюміній лише в 19 столітті. Близько 150 років людство виробляє алюміній електролітичним способом і весь час удосконалює технологію його виробництва.

Промисловий процес виробництва первинного алюмінію здійснюється в електролізерах електролізом металургійного глинозему в розплавленому кріоліті. За роки виробництва конструкція анодів змінювалася; вони можуть бути або попередньо обпаленими вуглеграфітовими блоками, або самозапаленими [3].

Варіант із самозапалюючими анодами був запропонований інженером К. Содербергом на початку 1920-х років. Відтоді всі алюмінієві заводи світу використовують цю технологію вже майже сто років, оскільки його використання значно здешевлює алюміній [4].

Технологія процесу залежить від багатьох параметрів, важливість яких визначається при розробці комплексної математичної моделі виробництва алюмінію. Розуміння фізико-хімічних процесів в апараті та вимірювання більшості параметрів дозволить більшою мірою автоматизувати процес. Світовим завданням математичного моделювання алюмінієвого виробництва є візуалізація всіх процесів і, оскільки найпростішим способом сприйняття інформації для людини є зорове сприйняття, математична модель комірки Содерберга може частково спростити людині роботу по управлінню установкою [5,6]. Невід'ємною властивістю математичної моделі є її адаптивність і здатність до розвитку. Саме цей параметр є якісним результатом моделювання у великому масштабі. Комплексне математичне моделювання відображає зміну параметрів не тільки в залежності від розташування в просторі, але й відображає їх зміну в часі.

Отже, основою будь-якого технологічного процесу є складний симбіоз між багатьма вхідними, внутрішніми та вихідними факторами, які тісно

пов'язані з розміщенням виробництва. Виходячи з цього, необхідно проводити глибокий аналіз існуючих факторів, визначаючи фактори, які мають максимальний вплив на технологічний процес, або відсікаючи фактори, які є незначними або мають мінімальний вплив. Сформована таким чином система рівнянь дозволить максимально точно описати фізичні процеси, що відбуваються в електrolізері. Важливо зазначити, що особливістю даного підходу є застосування методів системного аналізу до металургійного виробництва [7].

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Характеристика технологічного процесу виробництва алюмінію

В результаті вивчення значної кількості літературних джерел і, відповідно, Ідей, які були запропоновані для спрощення розробки математичної моделі, можна зробити висновок, що не багато з розглянутих раніше варіантів представляють досліджуваний апарат у вигляді такої математичної моделі, яка б наочно відображала те, що відбувається в електролізері під час процесу виробництва алюмінію. Існуючі моделі описують зміну різних параметрів електролізера в часі: рівняння в часткових похідних, наприклад, таких як напруга живлення електролізної ванни або кількість металу, що виливається з електролізера [8,9].

Однак, щоб зрозуміти цю модель, все ще необхідно зрозуміти основу, наприклад, що означає кожна змінна, як визначаються постійні коефіцієнти тощо. Тому необхідно приділяти особливу увагу розробці складних математичних моделей виробництва алюмінію, що відображає розрахунок основних параметрів і їх варіювання у взаємозв'язку. На цій основі можна створювати віртуальні електролізери, оскільки наочність таких моделей значно вища. Це спростить проектування та реконструкцію існуючих камер, оскільки всі зміни будуть прозорими та не вимагатимуть складних розрахунків, що заощадить час на інші складні питання. Крім того, була побудована комплексна математична модель.

Враховуючи тенденції розвитку електролітичної технології виробництва первинного алюмінію, можна зробити висновок, що важливість вирішення проблеми покращення робочих параметрів анодного та катодного блоків буде лише зростати [10]. Найкращим методом її вирішення визнано комплексний підхід, що включає оптимізацію як вихідної сировини, так і впровадження додаткових стадій у технологічний процес. Після апробації

запропонованих раніше методів у промислових умовах можна виділити ті варіанти, які стосувалися просочування пеком і створенням змінного опору по довжині блоку, оскільки їх застосування покращувало експлуатаційні параметри об'єкта [11,12]. Через помилки або помилки людини дані, зібрані безпосередньо під час виробничого процесу, неминуче призводять до помилок і шуму. Для забезпечення стабільності системи вхідні дані керування в реальному виробництві обмежені певним діапазоном, щоб підтримувати температуру електролізера та середню напругу в необхідному діапазоні.

Деякі наукові статті згадують питання енергоефективності, але зосереджуються на інших речах, таких як розробка технології чи обчислювальна модель [13,14]. Зменшити енергоємність можна шляхом впровадження як поточних, так і нових енергоефективних заходів. У майбутньому також може виникнути перспектива досягнення вуглецево-нейтрального та незалежного від вугілля електролізу. Однак це вимагатиме подальших досліджень і розробки заходів, визначених як нові або такі, що виникають. Електроліз демонструє більше нових методів порівняно з іншими процесами, що також можна пояснити високою енергоємністю. У багатьох випадках представлені заходи можна поєднувати, що означає, що найкращим рішенням має бути поєднання заходів для досягнення найвищого підвищення енергоефективності. Виробництво вторинного алюмінію стає все більш важливим для задоволення зростаючого попиту на алюміній. Виробництво вторинного алюмінію вимагає лише 5% енергії порівняно з виробництвом первинного алюмінію [15]. Це важливо з точки зору екологічних та економічних проблем і підвищення конкурентоспроможності.

Алюміній — метал, який не існує в природі у вільному стані; тому його виробляють електролізом криоліт-глиноземних розплавів у плоских ваннах, футерованих вуглецевими матеріалами. Криоліт є комплексною сіллю і становить 80-90% загальної маси електроліту; це розплавлений криоліт. Як



сировину для процесу електролізу використовують оксид алюмінію — оксид алюмінію, який займає не більше 5—8 % маси розплаву; виробляється шляхом переробки металів, що містять алюміній, гідрохімічними методами. Така кількість глинозему добре розчиняється в електроліті. Крім того, в електроліті міститься до 6-10% різних добавок: так само, як і у вихідних продуктах, є ряд оксидів, що дозволяють поліпшити характеристики електроліту [16].

Кріоліт-глиноземний розплав дуже агресивний. Хімічна взаємодія електроліту відбувається практично з усіма матеріалами, за винятком деяких вуглецевих матеріалів. Молекулярне відношення фториду натрію до фториду алюмінію, так зване кріолітне співвідношення (CR), важлива характеристика складу електроліту, зазвичай виражається як

$$\frac{\text{NaF}}{\text{AlF}_3} = 2,6 - 2,8.$$

При його зміні поточний вихід алюмінію зменшується; тому під час електролізу важливо підтримувати стабільний склад електроліту.

Під час електролізу дисоціація розплавленого кріоліту утворює позитивно заряджені катіони натрію та негативно заряджені комплексні аніони. При температурі, що дорівнює температурі плавлення алюмінію, зв'язки між алюмінієм і фтором в комплексних іонах можуть розриватися, після чого відбувається частковий розпад комплексного іона на більш прості іони [17,18]. При введенні в розплав глинозему структура електроліту значно ускладнюється. Розчинення глинозему супроводжується утворенням акцепторних комплексів в електроліті. Іони алюмінію і кисню є сильними комплексоутворювачами, тому їх існування в розплаві у вільному вигляді малоймовірно.

У спрощеному вигляді електроліт складається з катіонів натрію та комплексних іонів. Найбільш рухливі з усіх іонів натрію несуть струм під час процесу електролізу [19]. Порівняно з іншими катіонами, іони алюмінію мають найбільш позитивний потенціал вивільнення; отже, їх розряд до катода відбувається швидше, що призводить до відновлення алюмінію з комплексного іона, що містить алюміній.

Алюміній, будучи важчим за електроліт (питома вага алюмінію 2,3 г/см<sup>3</sup>; електроліту 2,1 г/см<sup>3</sup>), накопичується на дні електролізера. Явище, що відбувається на аноді, можна описати так: відбувається розряд іона кисню з комплексного аніона; при цьому при адсорбції атомарного кисню вуглецем утворюються проміжні оксиди, а потім негативно заряджені аніони мігрують до анода [20]. Їх розкладання і десорбція газоподібного вуглекислого газу з поверхні анода є найповільнішою стадією. Він визначає значну перенапругу на аноді.

Процес електролізу зазвичай відбувається при температурі 950–965 °С, необхідній для розкладання глинозему, але підтримання цієї температури вимагає постійного споживання вихідної сировини глинозему, вуглецевого анода, фтористих солей та електроенергії. На виробництво однієї тонни необробленого алюмінію витрачається приблизно 14 500 кВт-год електроенергії. Фторид натрію та фторид алюмінію, що входять до складу електроліту, певною мірою впливають на алюміній у резервуарі електролізера, а саме натрій під алюмінієвим шаром атакує вуглецеві матеріали на дні резервуара електролізера, а алюмінієвий суб-фторид окислюється вуглекислим газом в анодному просторі, що призводить до зниження виходу металу за струмом до 85–87%.

Крім того, вміст оксиду вуглецю в анодних газах збільшується з підвищенням температури в результаті реакції алюмінію з компонентами електроліту. На вихід алюмінію за струмом також впливає температура електроліту [21,22]. Ця температура підтримується бічними обшивками та

перегородками, які діють як вкладиші та терморегулятори для електролізерів. Температурний режим значною мірою залежить від міжполюсної відстані (МПД), яка зазвичай коливається в межах 4-6 см.

Якщо його зменшити, споживання струму на тонну алюмінію одразу зменшується, але зростає ризик зворотного окислення металу анодними газами. Збільшення відстані призводить до перегріву електроліту і порушення процесу електролізу. При електролізі коригують склад електроліту фторосолями. Для цього працівники періодично відбирають проби, які потім доставляють у лабораторію для кристалооптичного аналізу. Важливе значення має вміст глинозему в електроліті; якщо його достатньо, він добре змочить анод. Напруга ванни становить 4-4,5 В, і газоподібні продукти не затримуються на поверхні анода і виходять з електроліту у вигляді дрібних бульбашок.

Якщо електроліт значно збіднений глиноземом, то поверхня анода пасивується і підвищується його потенціал, що призводить до розряду фторвмісних іонів. В результаті змочування анода зменшується, а бульбашки утворюють на його поверхні суцільну газову плівку. Електричний опір на межі анод–електроліт зростає, а напруга зростає в 10 разів або більше. У нижній частині анода виникають сильні іскрові розряди, тому у ванні виникає анодний ефект [23]. Для її усунення у ванну вводять глинозем, а електроліт ретельно змішують з газами сухої перегонки деревини. Після цього відновлюється нормальний режим.

На рис. 2.1 представлено схему виробництва алюмінію.

Катодний апарат електролізера являє собою жорсткий металевий кожух, облицьований зсередини шамотною цеглою. Зсередини корпус бака захищений карбоновими пластинами і блоками, які є теплоізоляційними.

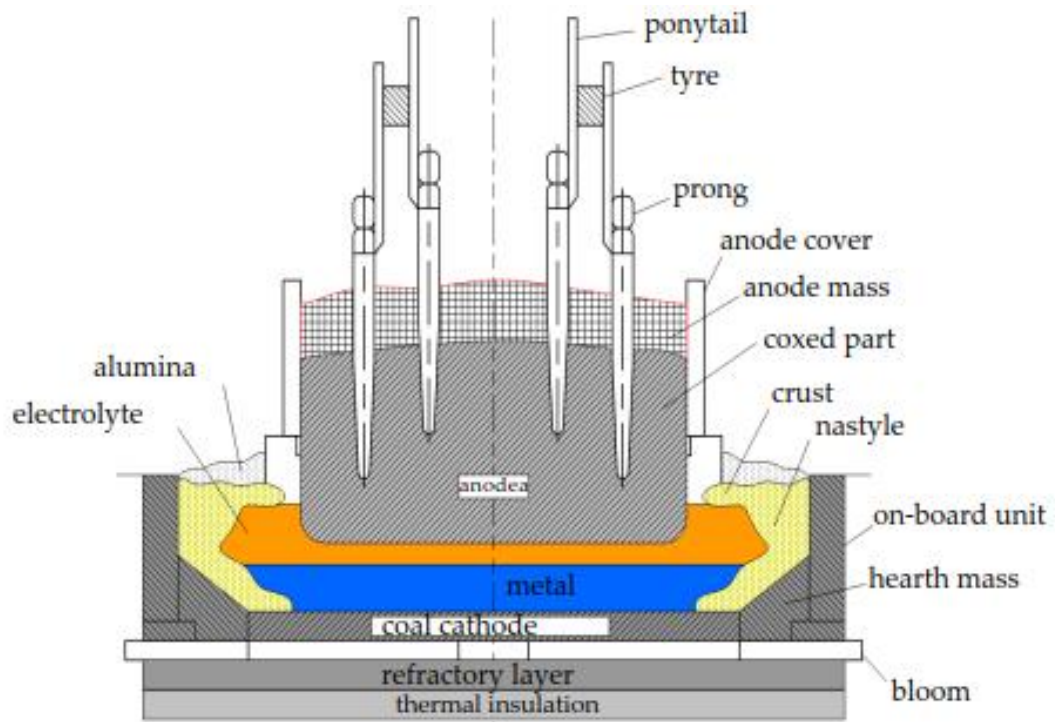


Рисунок 2.1 - Алюмінієвий електролізер Soderbergh S-8BM з самозаймистим анодом.

Катодні блоки, скріплені в чавуні сталевими стрижнями, утворюють нижні секції, які укладаються поверх вугільного шару, в результаті чого виходить повністю зібрана алюмінієва підкладка ванни. Над вуглецевим шаром знаходиться шар розплавленого алюмінію, поверхня якого є катодом.

Над шаром розплавленого алюмінію знаходиться електроліт. Процес електролізу відбувається при дуже високих температурах, тому катодний пристрій повинен бути стійким до таких агресивних умов, а також мати такі властивості, як тепло- і струмоізоляція, електропровідність, довговічність і мобільність.

Анодний пристрій електролізера складається з 20 або більше анодів, кожен зібраний з попередньо обпалених вугільних блоків, які є чавунними ніпельними анодотримачами зі сталі. Анодний пристрій проводить струм до місця, де відбувається процес електролізу. Анодні рейки з'єднуються з анодними рейками за допомогою спеціальних гвинтових затискачів, які

також виконують роль несучої рами. Каркас ізольований від корпусу катода. Вертикальне переміщення рами здійснюється за допомогою електродвигуна, редуктора і домкрата. Під час електролізу рамка опускається вниз, оскільки аноди згорають.

Анодний блок оснащений штифтами, які подають струм, а також стабілізують електромагнітні поля електролізера, оскільки виготовлені зі сталі з домішкою алюмінію, який не має магнітних властивостей. Самі штири кріпляться до рамки анода, що дозволяє їм зберігати горизонтальне положення анода.

Для автоматичного регулювання положення анодів використовується система алюміній-3. У процесі електролізу електроди спалюються. Коли під сталевим ніпелем залишається шар вуглецю товщиною 12-13 см, анод знімають, а на його місце встановлюють новий. Глибина анода встановлюється дуже точно, оскільки це має великий вплив на ефективність ванни. Аноди розміщені в шаховому порядку. Біля кожного нового анода в першому, як і в другому аноді, повинна бути пальник. Це необхідно для рівномірного розподілу струмового навантаження [24].

Вибір прокладки дуже важливий. При односторонньому підведенні струму магнітні поля створюють перекося металу у ванні, що призводить до порушення міжполюсної відстані та нерівномірного згорання анодів. Це зменшує поточний вихід алюмінію. Навпаки, двостороннє підведення струму до анода послаблює величину магнітних полів; метал приймає горизонтальне положення; MPR не змінюється; і процес електролізу протікає нормально. Схема електролізера така: спочатку електричний струм проходить через анодні стояки до анодної шини, а через анодотримачі надходить в анодні блоки. Звідти струм тече через електроліт, нагріває його джоулевим теплом і здійснює електроліз. Потім струм тече через катодну рейку до наступного електролізера.

Катодна металокопструкція відповідає за термін служби електролізера, при її поломці електролізер підлягає капітальному ремонту; тому металокопструкції повинні компенсувати умови в катодному пристрої.

Щоб продовжити термін служби електролізера, слід також враховувати взаємодію між окремими частинами електролізера. Виникнення високих напруг призводить до утворення тріщин в підкладці, тому важливо залишити невеликий простір для її переміщення з компенсатором. Компенсатор — периферійні частини футеровки і з'єднань — глушить зусилля від катодного ефекту.

Під час процесу електролізу тепло виділяється в навколишнє середовище, таким чином споживаючи електричну енергію. Катодний вкладиш завдяки своїй структурно-механічній міцності допомагає контролювати температуру розплаву та протистояти впливу компонентів розплаву. Шамот, який використовується як вогнетривкий матеріал, запобігає потраплянню електроліту в простір ізоляції.

У шахті електролізера встановлені нижні блоки, які виготовлені з вуглецевих матеріалів і служать катодами. Вони проводять струм і стійкі до розплавленого алюмінію та електроліту.

Торцеві сторони електролізера постійно загерметизовані. Бічні стінки зазвичай виготовляються з тих самих матеріалів, що й стручкові блоки, тому їхні властивості дуже схожі. Ефективність такого укриття становить 95%.

Для захисту персоналу від шкідливих газів електролізер обладнаний навісним укриттям врізного типу. Коли електролізер обробляється, клапани укриття електрично піднімаються, щоб надати працівникам доступ до ванни. Обслуговування електролізерів включає ряд основних операцій. Вони проводяться в суворо регламентованому порядку з використанням спеціальних машин і механізмів.

## 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Структурна ідентифікація процесу виробництва алюмінію

Об'єктом дослідження є електролізер Содерберга. Електролізер являє собою складну, багатозв'язну систему; тому всі процеси всередині і поза електролізером не можна розглядати ізольовано.

Не можна нехтувати умовами електролізера, оскільки вони мають значний вплив на кінцевий продукт.

Основними параметрами холу, які впливають на електролізер, є

- Вологість в цеху;
- Пил в майстерні;
- Температура повітря в цеху;
- Зовнішня температура, що впливає на температуру в цеху;
- Рівень шуму в цеху;
- Рівень електромагнітного поля за межами електролізера в окремих точках;
- Кількість і розташування електролізерів в цеху.

Розглянемо кожен з них докладніше:

У цехах з виплавки алюмінію виділяються сірчистий газ і дрібні частинки золи. Побічні продукти виробництва алюмінію негативно впливають на організм людини та навколишнє середовище. Основними компонентами, з якими взаємодіє людина, є глинозем, криоліт, солі фтору, побічні продукти та мікроклімат [25]. Через вплив пилу глинозему у людини розвиваються хронічні ураження дихальних шляхів. Вплив високих температур і вологості посилюється вмістом пилу в повітрі. Повітря в цехах електролізу часто насичене туманом сірчаної кислоти і сульфату цинку.

Тепловий стан електролізера залежить від втрати тепла від поверхонь електролізера в навколишнє середовище, загального тепла, накопиченого

окремо анодом і днищем, і надходження тепла від згоряння палива [26]. Цей стан описується за допомогою енергетичного балансу. Теплові втрати на аноді та катоді швидко зростають при температурах навколишнього середовища  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що доведено численними експериментами зі статичного аналізу теплового поля алюмінієвого електролізера. При температурі навколишнього середовища  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  втрати тепла значно зменшуються. Через це в зимовий період збільшується додаткова витрата палива на кожному електролізері [27]. Підтримання теплового та енергетичного балансу сприяє стабільній роботі та довгостроковій роботі електролізера.

Температурні показники в основному мало впливають на якість готового продукту, але ними не можна нехтувати, оскільки температура всередині електролізної ванни значно вища за зовнішню і регулюється розплавом і кріолітом. Оскільки процес виробництва алюмінію ще не повністю автоматизований, контроль і регулювання процесу здійснюється оперативним персоналом шляхом вимірювання параметрів електролізера.

При використанні самоструминних анодів Soderberg рівні шуму, вібрації та теплового випромінювання перевищують гігієнічні норми. Такі умови праці відповідають класам небезпеки 3.3–3.4. Тривалий вплив цих факторів може призвести до ненавмисних помилок і ризиків.

При електролізі алюмінію струм тече вертикально вгору та вниз через аноди та стояки, а також горизонтально вздовж і впоперек ванни, тому магнітне поле має складну структуру в кожній точці ванни. Електроліз алюмінію вимагає високої сили струму; отже, елементи живлення струму розроблені для струмів великої сили струму, і навколо них генеруються сильні магнітні поля. Напрямок електромагнітних сил залежить від напрямку струмів при їх взаємодії, що впливає на поверхню розплавленого металу та його спрямований рух [28]. Цей параметр істотно впливає кінцевий продукт, оскільки при високих значеннях електромагнітного поля та його джерел обертовий момент всередині електролізної ванни викликає хвилювання



металу. Конструктивні дані електролізера самозапального анода відносяться до вхідних параметрів і є постійними в технологічному процесі.

Залежно від розміру установки середня електролізна установка містить до 200 електролізерів, розташованих у два ряди. Довжина і ширина окремого вольєра до 700 м і 27 м відповідно.

На середній ділянці проходить транспортний коридор, через який можуть здійснюватися всі транспортні та технологічні комунікації, включаючи транспортування металу, обладнання, сировини та інших матеріалів. У кінці кожного цеху є ділянка довжиною до 35 м, яка називається ремонтно-технологічними зонами, де ремонтують основне і допоміжне технологічне обладнання. Нижче на позначці «0» розміщені частини основного обладнання, які були демонтовані, вивезені в ремонт або призначені для транспортування. На відмітці +13,500 м розташовані майданчики для ремонту технологічного устаткування, що обслуговує електролізери, — технологічних підйомних і монтажних кранів.

На якість технологічного процесу і кількість виробленого алюмінію впливає також специфіка планування електролізних цехів, оскільки кількість і розташування суміжнихрядів електролізерів у серії впливає на величину та виражений вплив зовнішнього електромагнітного поля на магнітодинамічну стійкість розплаву в працюючих суміжних електролізерах серії.

На процес електролізу всередині самого електролізера впливає багато вхідних параметрів, значення яких можна виміряти, але вплинути на них не завжди можливо [29]. Під час процесу оперативний персонал виконує регламентні технологічні операції, визначення регламенту загального технологічного процесу в корпусі і серії в цілому. Всі технологічні операції, що виконуються машинами і обслуговуючим персоналом, є керуючими діями, що визначають обов'язкові регламентні операції в технологічних циклах в рамках загального процесу електролізу.

Усі виміряні величини та параметри, отримані з математичної моделі: вихідний струм, енергоспоживання, кількість залитого металу, робоча напруга, концентрація глинозему тощо, є вихідними (контрольованими) значеннями. Крім того, під час технічного обслуговування та експлуатації електролізера виникають випадкові впливи, які включають завантаження сировини, заливку металу, зміну анодних штифтів, корекцію процесу електролізу, короткі замикання та варіації: струм і температура розплаву, навколишнє середовище температура повітря і хімічний склад сировини.

Основними показниками, що відповідають за ефективність ТП, є струм і енерговитрата. Ці показники визначаються такими факторами: параметрами електроенергії та неелектроенергетики [30].

Неелектроенергетичними параметрами ТП є: глинозем, маса анода, рівень і склад кріоліту, властивості і температура електроліту та висота шару технологічного алюмінію.

При електролітичному виробництві алюмінію глинозем використовується як основна сировина. Вимоги до його якості досить високі, оскільки він повинен бути розчинним у розплавленому кріоліті та містити якомога менше електропозитивних елементів, що погіршують якість кінцевого продукту. Глинозем ділиться на кілька марок, але найбільш чистий склад, відповідний 1 сорту, використовується в алюмінієвій промисловості. Варто також зазначити, що частинки глинозему не повинні бути занадто дрібними або занадто грубими, оскільки дрібний оксид алюмінію розпилюється під час завантаження, тоді як грубий глинозем дуже нерозчинний.

Кріоліт  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  зустрічається в природі дуже рідко, тому штучний промисловий кріоліт використовують на алюмінієвих заводах. Він складається з фториду натрію та надлишку фториду алюмінію. Кріолітовий коефіцієнт цієї солі є основною характеристикою складу електроліту. У розплавленому стані при КО 2,6–2,8 спостерігаються найменші втрати

алюмінію в електроліті та найбільші значення виходу за струмом (рис. 3.1). Додавання фториду кальцію і магнію призводить до зниження температури плавлення електроліту, що, в свою чергу, знижує напругу; тому їх вміст в електроліті може бути настільки низьким, як 10%. Вміст фтористих солей у розплавленому електроліті не повинен перевищувати допустимих значень, оскільки це може призвести до нерозчинності глинозему.

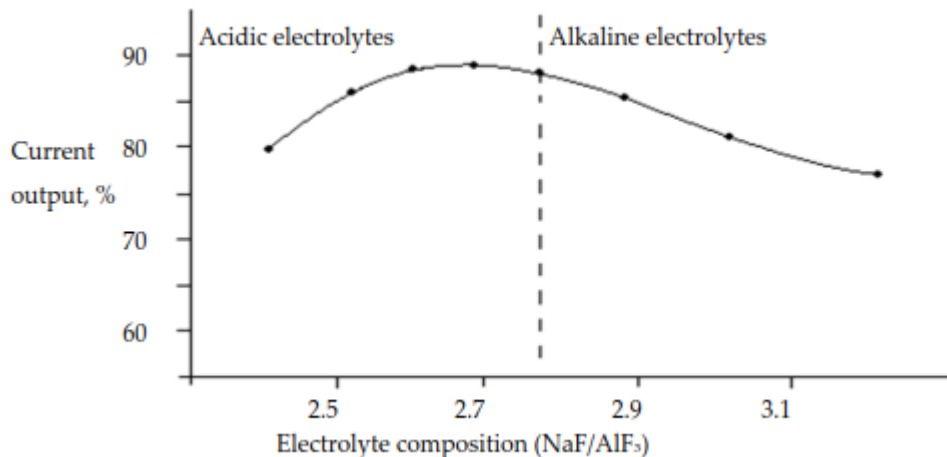


Рисунок 3.1 - Залежність сили струму від складу електроліту.

Фтористі солі також збільшують щільність електроліту та розплавленого алюмінію, щодозволяє алюмінію накопичуватися на дні ванни під шаром електроліту під час процесу електролізу, оскільки щільність алюмінію в розплавленому стані вища. Оксид алюмінію в електроліті, а також фтористий кальцій і магній підвищують в'язкість кріолітових розплавів, але також знижують їх електропровідність. Температура ванни підтримується завдяки джоулевому теплу, яке утворюється при падінні напруги в шарі електроліту. Склад електроліту регулюється вмістом фтористих солей.

Недостатня концентрація глинозему в електроліті і критична щільність струму призводять до анодних ефектів (іскрових розрядів) на межі між електролітом і поверхнею зануреного анода. Однак надмірний вміст глинозему в електроліті (7–8%) призводить до утворення осаду. Якщо

анодний ефект виникає часто, споживання енергії та матеріалів збільшується, тому частоту потрібно контролювати. На щільність струму впливають температура і природний характер солей, а також матеріал, з якого виготовлено анод. Температура плавлення глинозему становить 2050 °С, але використання добавок до електроліту дозволило знизити температуру до 960 °С. Підвищення температури електроліту зменшує вихід струму, але розчиняє метал у розплавленому електроліті (рис. 3.2). Підтримання правильної температури необхідний для того, щоб щільність металу та електроліту не порушувалася та була стабільною

спостерігається картина електролізу.

Важливо відзначити, що температурні та механічні перешкоди призводять до руйнування підкладки та передчасного виходу електролізера з ладу. Коливання температури викликані поганим послідовним регулюванням струму та напруги, а механічні коливання спричинені неправильною конструкцією електролізера.

Склад анодної маси в електролізерах Содерберга визначається вимогами високих техніко-економічних показників, оскільки напруга, при якій відбувається розкладання глинозему, залежить від матеріалу анода.

Поточний вихід є одним з важливих показників, що визначає собівартість кінцевого продукту. Висота шару технічного алюмінію є одним з факторів, що впливають на цей параметр, оскільки висота металу повинна зростати зі збільшенням густини струму. При зниженні рівня металу анод занурюється глибше і піддається більшому тепловому навантаженню, що сприяє швидшому витраті анодної маси. Завдяки високій теплопровідності алюмінію розсіює тепло через сторони кожуха катода, тим самим відновлюючи теплове поле під анодом електролізера.

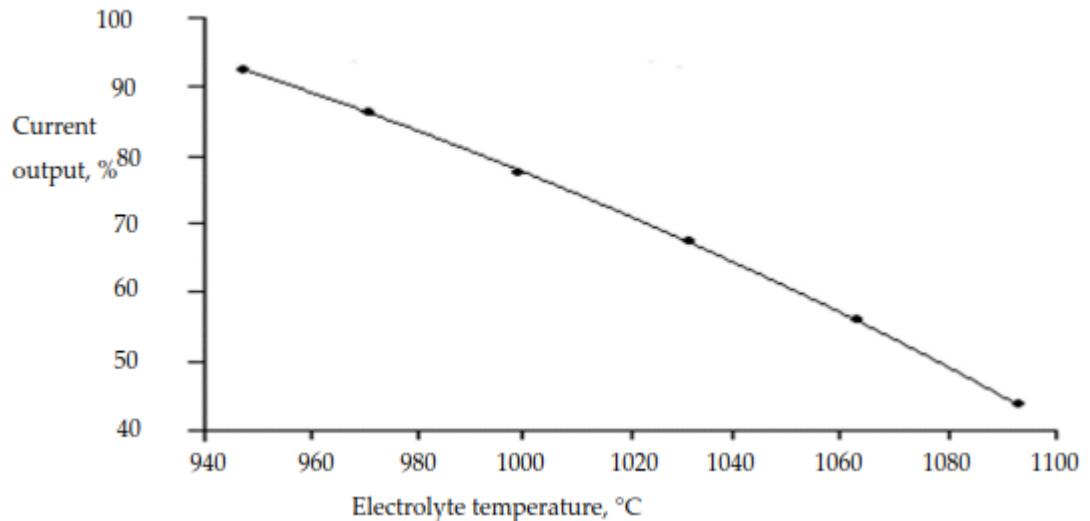


Рисунок 3.2 -Залежність сили струму від температури електроліту.

Вхідними параметрами енергії ТП є відстань між полюсами (відстань між електродами), напруги електролізера, електромагнітне поле, сила обертання та сила струму. Магнітне поле може вплинути на результати вимірювання, а тому можуть виникнути помилки. Вимірювання цих параметрів здійснюється за допомогою спеціальних приладів.

Анод періодично опускають для забезпечення необхідної міжполюсної відстані, так як протягом доби частина анода згорає приблизно на 2 см, і відбувається окислення за рахунок виділення кисню на поверхні анода. МПР і склад електроліту використовуються для регулювання падіння робочої напруги електролізера, якості теплоти, що виділяється, швидкості електрохімічних процесів і т. д. Збільшення МПР призводить до збільшення видачі струму і споживаної потужності, що призводить до падіння напруги (рис. 3.3).

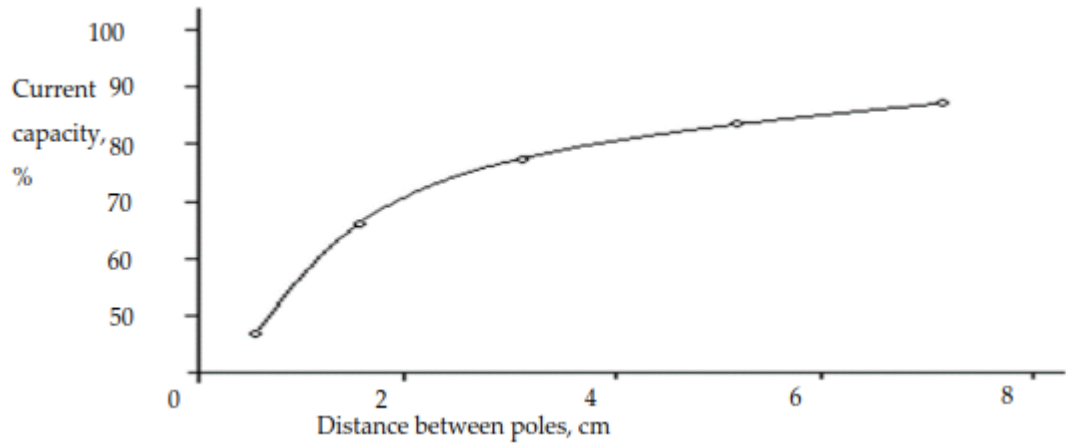


Рисунок 3.3. - Залежність сили струму від міжполюсної відстані.

У цеху всі електролізери розташовані послідовно і струм на одному електролізері регулюється за допомогою підживлювальних установок. Під час ТР виникають анодні ефекти, коливання напруги, обробка електролізерів тощо — усе це заважає силі струму залишатися постійною. Сила струму безпосередньо залежить від щільності струму (рис5). При густинах струму вище допустимих значень спостерігається перевищення вмісту натрію в алюмінії, а при менших густинах струму можливий повний або частковий розряд катіонів за рахунок зниження напруги і збіднення електронів на катоді.

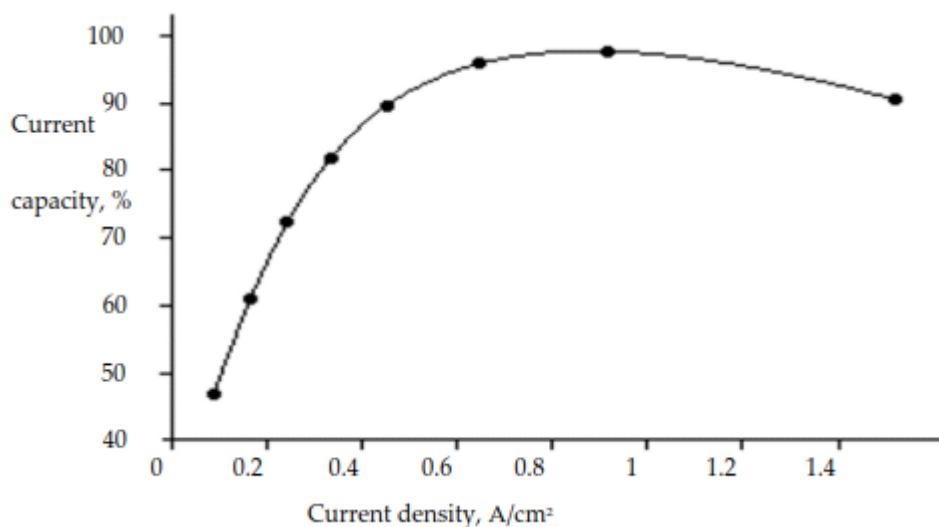


Рисунок 3.4 -Залежність сили струму від густини струму.

## 4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

### 4.1 Експертний аналіз та обробка результатів за допомогою кореляційного аналізу

Зв'язок між параметрами об'єкта вимагає нового підходу в моделюванні, оскільки цей процес є складним і багатозв'язним, а багато попередніх розробок розбивали систему на підпроцеси, для яких розроблялися і потім зв'язувалися математичні моделі; отже, синтезована математична модель повинна в цілому відображати всі взаємозв'язки, що виникають в електролізері. З метою отримання математичної моделі системи та її подальшої реалізації на основі технічних засобів розроблено концептуальну модель процесу виробництва алюмінію в електролізері Содерберга.

На основі всіх перерахованих вище параметрів складається результуюча таблиця (табл 4.1), що показує всі параметри, що впливають на ТП електролізу алюмінію, які в подальшому будуть направлені на експертну оцінку.

Кореляційний аналіз використовується для побудови концептуальної моделі та визначення зв'язку між змінними та їх значущістю. Оцінки є індивідуальними та базуються на думці окремих експертів.

Принцип відбору експертної групи такий: Експерти, залучені до оцінки технологічних параметрів електролізера, повинні мати практичний та дослідницький досвід роботи в алюмінієвій промисловості. При виборі експертів важливо враховувати їх професійну компетентність, особисту зацікавленість у результатах експертної роботи та відповідність.

Очікується, що експерти нададуть заповнений аркуш та/або коментарі щодо виконаної роботи.

Таблиця 4.1 - Технологічні параметри електролізера та процесу виробництва алюмінію.

Технологічні параметри електролізера		№	
Вихідні параметри	Вологість в цеху	1	
	Температура повітря в цеху	2	
	Температура повітря на вулиці	3	
	Рівень шуму в цеху	4	
	Коливання послідовного струму	5	
	Рівень електромагнітного поля за межами електролізера в певних точках	6	
	Напруженість електромагнітного поля сусідніх електролізерів в цеху	7	
	Склад команди електролізерів	8	
	Модель електролізера	9	
	Термін служби електролізера	10	
	Кількість електролізерів в цеху	11	
	Розташування електролізерів в цеху	12	
Конструктивні параметри електролізера	Глибина	13	
	Довжина	14	
	Ширина	15	
Внутрішні параметри	Рядові струми електролізу	16	
	Розподіл струму на індивідуальному електролізері	17	
	Щільність струму	18	
електролізер і електроліз процес	на аноді	19	
	на катоді	20	
	в арматурі	21	
	в електроліті	22	
	внаслідок анодних ефектів	23	
	Напряга розкладання	24	
	Степеневий ряд електролізу	25	
	Електромагнітне поле електролізера	26	
	Електромагнітна сила, що діє на розплав	27	
	Обертальний момент через диференціал розплаву	28	
Внутрішні параметри електролізера та процес електролізу	Характеристика глинозему	29	
	Масова характеристика анода	30	
	Рівень криоліту	31	
	Кріолітовий коефіцієнт	32	
	Склад криоліту (електроліту)	33	
	Вміст фториду алюмінію в криоліті	34	
	Вміст фториду кальцію в криоліті	35	
	Фізико-хімічні властивості електроліту	36	
	Температура електроліту	37	
	Однорідність температурного поля подіуму	38	
	Висота шару технологічного алюмінію	39	
	Питома витрати на сировину	Питома витрата глинозему	40
		Питома витрата маси анода/анода	41
	Середовище та зовнішні фактори	Питома витрата фтористих солей	42
		Рівень промислового виробництва	43
		Стан технології виробництва	44
		Джерела електроенергії	45
Витрати електроенергії		46	
Тарифи на електроенергію		47	
Витрати на імпорту сировину		48	
Витрати на експорт кінцевої продукції		49	
Трудові ресурси		50	
Доступність ресурсів		51	
Природні ресурси	Транспортрозвиток системи	52	
	Родовища бокситів	53	
Контрольні дії	Запаси води	54	
	Екологічна безпека	55	
	Швидкість подачі глинозему	56	
	Зміна положення анода	57	
Вихідні параметри електролізера	Вихід електролізера	58	
	Кількість алюмінію в електролізній ємності	59	
	Об'єм електроліту в електролізері	60	
	Концентрація глинозему в електроліті	61	
	Відстань між стовпами	62	
	Кількість анодних впливів на електролізер	63	
	Поточний дохід	64	
	Робоча напруга	65	
	Теплоємність електролізера	66	
	Температура електроліту	67	



Оцінюючи ступінь важливості параметрів, оцінювач присвоює їм рейтинговий номер за шкалою від 1 до 10, де бали мають таке значення:

- ❖ Незначна важливість 1–3;
- ❖ Незначна важливість 4–5;
- ❖ Значні 6–7;
- ❖ Важливо 8–10.

Зведена матриця (табл. 4.2), таким чином, генерується з отриманих даних.

Таблиця 4.2 - Зведена таблиця експертних оцінок

Порядковий номер параметра (xi)	Експерти				
	1 Ехр.	2 Ехр.	3 Ехр.	4 Ехр.	5 Ехр.
x1	3	2	4	3	3
x2	5	2	4	4	4
x3	5	1	4	3	4
...	...	...	...	...	...
x67	9	7	10	10	10

Всього заявлено 67 параметрів, тобто їхня ідеальна сума дорівнює

$$2.278 \left( \sum_{n=1}^{67} n \right)$$

Переформулювання рангів здійснюється таким чином: ранги ранжуються знизу вгору відповідно до отриманих балів; потім проводиться дослідження, щоб знайти однакові бали для різних параметрів. Далі порядкові значення параметрів складаються (оскільки вони розташовані в порядку зростання, а не просто пронумеровані) і діляться на кількість параметрів з однаковим значенням у цій категорії (табл. 4.3).

$$P_{АНГ} = \frac{\sum (a_1, a_2, \dots a_n)}{\sum (b_1, b_2, \dots b_n)};$$

де  $a_n$  – послідовні номери в порядку зростання;  $b_n$  – кількість параметрів з однаковим значенням у цій категорії.

Таблиця 4.3 - Визначення розрядів за оцінками

Параметр	Послідовність параметрів Номер (хі)	Число в порядку зростання порядок	Експертна Оцінка	Ранг
Рівень шуму в залі	x1	1	1	1,00
Кількість електролізерів в цеху	x2	2	2	2.00
Вологість приміщення	x3	3	3	5.50
...	...	...	...	...
Температура електроліту	x67	67	9	64,00

Це значення вважається рангом і призначається всім параметрам в тій самій області оцінки. Таблиця3 показує переформулювання для одного експерта; аналогічні розрахунки виконуються для решта експертів.

Подібним чином бали перетворюються на ранги для всіх експертів, а потім генерується зведена таблиця рангів (табл. 4.4).

Далі для кожного параметра розраховується сума рангів і розраховується коефіцієнт  $d$  (табл. 4.5).

$$d^2 = \left( R_i - \frac{\sum_{i=1}^n (R_i)}{n} \right)^2 = \left( R_i - \frac{11,390}{67} \right)^2 = (R_i - 170)^2$$

де  $d$  – відхилення суми рангів від середнього арифметичного рангів;

Таблиця 4.4 - Зведена таблиця рангів експертів

Порядковий номер параметра (xi)	Експерти				
	1 Еxp	2 Еxp.	3 Еxp.	4 Еxp.	5 Еxp.
x1	5.5	4.5	8.5	6	4
x2	14	4.5	8.5	11.5	8
x3	14	1.5	8.5	6	8
...	...	...	...	...	...
x67	64	56	52	58	64.5

Таблиця 4.5 - Розрахунок коефіцієнта d.

Послідовність параметрів Номер (xi)	Експерти					$\sum_{i=n}^{i=1}(R_i)$	d	d <sup>2</sup>
	1 Еxp.	2 Еxp.	3Еxp.	4Еxp.	5Еxp.			
x1	5.5	4.5	8.5	6	4	28.5	-141,50	20 022,25
x2	14	4.5	8.5	11.5	8	46.5	-123,50	15 252,25
x3	14	1.5	8.5	6	8	38	-132,00	17424,00
...	...	...	...	...	...	...	...	...
x67	64	56	52	58	64.5	294.5	124,50	15 500,25
$\Sigma$	2278	2278	2278	2278	2278	11 390	0	357 322,50

p– кількість параметрів, що підлягають дослідженню,  $n = 67$ .

Важливість факторів ранжується відповідно до загального рангу кожного параметра.

Результат показано в (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 - Розташування факторів за важливістю.

Номер у порядку зростання суми рангів	Параметр	Послідовність параметрів Номер (xi)	$\sum_{i=n}^{i=1}(P_i)$
1	Вологість в цеху	x1	28.5
2	Температура повітря на вулиці	x3	38
3	Кількість електролізерів в цеху	x11	39
...	...	...	...
67	Струмовий вихід	x64	305.5

Коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2 \cdot (n^3 - n) - m \cdot \sum T_i'}$$

де  $S = \sum d_i^2 = 357,322,5$  - це підсумовування квадратів відхилення суми рангів від середнього арифметичного розрядів;

$m = 5$  кількість експертів.

$$T_i = \frac{1}{12} \cdot \sum (t_i^3 - t_i),$$

де  $T_i$  - кількість пучків (видів елементів, що повторюються) в оцінках  $i$ -го експерта,

$t_i$  - кількість елементів в  $i$ -му пакеті для  $i$ -го експерта (кількість повторних елементів).

$$T_1 = 1652; T_2 = 768; T_3 = 2700.5; T_4 = 1225.5; T_5 = 879.5; \sum T_i = 7225.5$$

$$W = \frac{357,322.5}{\frac{1}{12} \cdot 5^2 \cdot (67 - 67) - 67 \cdot 7225.5} = 0.61$$

Якщо  $W \geq 0,5$ , то думки експертів збігаються.

Потім ми оцінюємо значущість коефіцієнта конкордації; з цією метою ми обчислити критерій узгодженості Пірсона:

$$\chi^2 = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m \cdot n \cdot (n + 1) + \frac{1}{n-1} \cdot \sum T_i}$$

$$\chi^2 = \frac{357,322.5}{\frac{1}{12} \cdot 5 \cdot 67 \cdot (67 + 1) + \frac{1}{67-1} \cdot 7225.5} = 180.7$$

Зазначений рівень значущості для кількості проб до 100 одиниць становить 0,05. Розраховане значення  $\chi^2 = 180,7 \geq$  табличного (85,965), тому отриманий коефіцієнт конкордантності  $W = 0,61$  не є випадковим; тому розраховані результати мають сенс і можуть бути використані в подальших дослідженнях.

$$K = n - 1 = 67 - 1 = 66$$

Відповідно до табл. 4.6 «Розташування факторів за важливістю», вага ( $\lambda$ ) кожного параметра розраховується на основі суми рангів ( $R$ ) усіх експертів. Для цього беремо суму рангових сум за одиницю і за формулою:

$$\lambda_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{67} R_i}$$

Крім того, було розраховано вагу для першого параметра та аналогічні розрахунки для решти були проведені (табл. 4.7):

$$\lambda_i = \frac{28.5}{11,390} = 0.00250219 \approx 0.003 = 0.3\%$$

Таблиця 4.7 - Розрахунок ваг параметрів.

Order Number in Ascending Order of the sum of Ranks	Parameter Title	Parameter Sequence Number (xi)	$\sum_{i=1}^n (R_i)$	Weight ( $\lambda_i$ )
1	Humidity in the shop	x1	28.5	0.0025
2	Air temperature outside	x3	38	0.0033
3	Number of electrolyzers in the shop	x11	39	0.0034
...	...	...	...	...
67	Current output	x64	305.5	0.0268
	$\Sigma$		11,390	1

Відповідно до табл. 4.7 «Розрахунок ваг параметрів», представлений вище, ми вирішили взяти до уваги та вважати значущими лише ті параметри, які на основі діаграми Парето (рис. .4.1), мають вагу  $\lambda \geq 0,0171$ . Представлені вибрані параметри табл. 4.8.

На діаграмі Парето по осі ординат відкладено ваги параметрів як у числовому, так і в накопиченому відсотках, а по осі абсцис — параметри технологічного процесу, розташовані в порядку спадання. Перші стовпці діаграми показують найважливіші параметри процесу, а всі інші параметри за межами розділової кумулятивної кривої залишаються незмінними, оскільки їх здатність впливати на результат невелика. Враховуючи важливі фактори, можна зосередитися на усуненні найбільш суттєвих проблем.

Побудова концептуально-математичної моделі

Таблиця 4.8 - Параметри обрані як найбільш значущі для процесу електролізу

Parameter Title	Parameter Sequence Number (xi)	$\sum_{i=1}^n (R_i)$	Weight ( $\lambda_i$ )	Letter Designation	Unit
Bauxite deposits	x53	192.5	0.0171	-	-
Electricity costs	x46	194.5	0.0173	$C_p$	rub./MW·ч
Electrolyte temperature	x37	200.5	0.0179	$T_{electrolit}$	°C
Amount of aluminium in the electrolyser	x59	204.5	0.0182	$G_{Al}$	kg/w
Uniformity of the temperature field of the bottom plate	x38	207	0.0184	-	-
Specific alumina consumption	x40	210	0.0187	$g_{Al_2O_3}$	kg/kgAl
Alumina concentration in the electrolyte	x61	215	0.0192	$Al_2O_3$	%
Cryolite (electrolyte) composition	x33	215.5	0.0192	$M_{30}$	kg
Electromagnetic force acting on the melt	x27	218.5	0.0195	$f$	H/cm <sup>3</sup>
Aluminium fluoride content in the cryolite	x34	220	0.0196	AlF3	%
Cryolite ratio	x32	221.5	0.0197	KO	-
Process aluminium layer height	x39	227.5	0.0203	$h_m$	cm
Physico-chemical properties of the electrolyte	x36	235	0.0209	-	-
Current density	x18	235	0.0209	$i$	A/cm <sup>2</sup>
Electricity tariffs	x47	236	0.0210	ЦЭЭ, ЦМ	rub./MW·h
State of production technology	x44	237.5	0.0212	-	-
Current distribution on an individual electrolyser	x17	248	0.0221	$K$	-
Voltage drop in anode	x19	251	0.0224	$\Delta U_{anode}$	W
Voltage drop in electrolyte	x22	254	0.0226	$\Delta U_{electrolit}$	W
Raw material import costs	x48	255	0.0227	$M$	rub/unit
Voltage drop in cathode	x20	260.5	0.0232	$\Delta U_{cathode}$	W
Voltage drop in the busbar	x21	265	0.0236	$\Delta U_{wire}$	W
Amount of heat in the electrolyser	x66	273	0.0243	$Q'$	J
Pole-to-pole distance	x62	292	0.0260	$L$	cm
Operating voltage	x65	292	0.0260	$U_{work}$	W
Electrolyte temperature (output)	x67	294.5	0.0262	$T_{electrolit}$	°C
Current output	x64	305.5	0.0272	$\eta$	unit

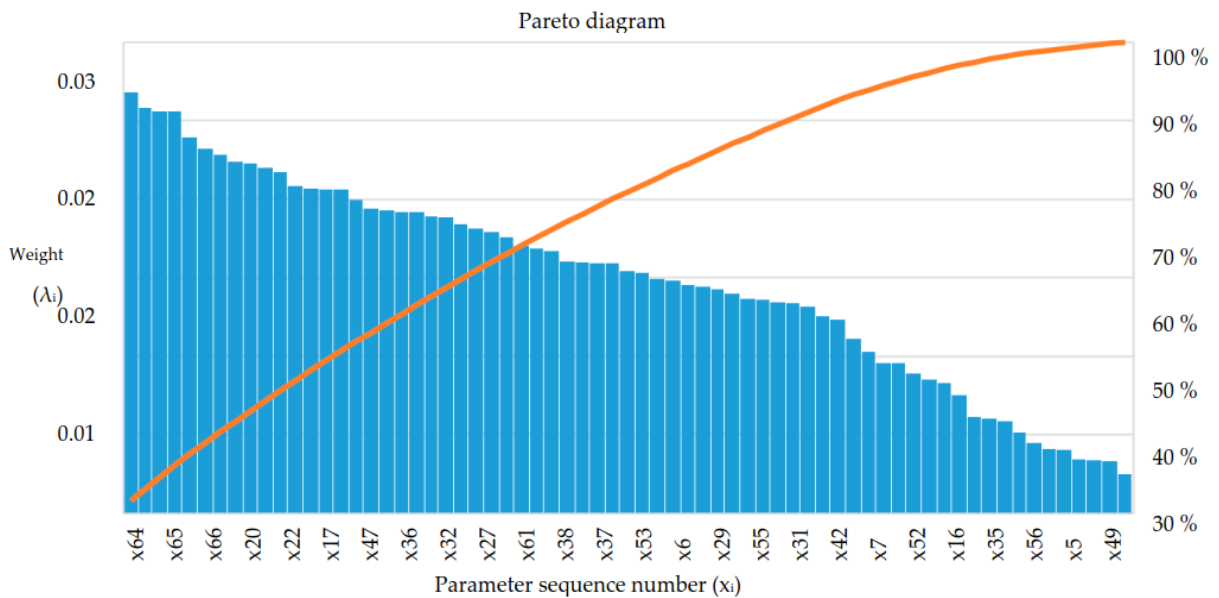


Рисунок 4.1 - Найважливіші фактори, що впливають на ефективність технологічного процесу.

Будь-яке проектування системи або написання програми починається з етапу побудови концептуальної моделі об'єкта. Концептуальна модель - це набір понять, що описують досліджувану область. Важливим чинником її побудови є аналіз наукової літератури, яка дає досить чітке уявлення про структуру об'єкта та елементи, що знаходяться у взаємозв'язку.

Використання графічного представлення концептуальної моделі більш переважно, ніж у формі тексту, оскільки інформація, виражена діаграмою або схемою, наочно демонструє спрямованість основних зв'язків.

Усі поняття, включені в концептуальну модель, конкретизуються та інтерпретуються таким чином, щоб побудована концептуальна модель могла служити основою для подальшого розвитку методів збору даних тощо. Деякі терміни використовуються в математичних поняттях, що дає змогу описати їх за допомогою рівнянь і формули.

Побудова концептуальної моделі базується на даних, отриманих на етапах експертної оцінки та формування значущих параметрів. Таблиця 8 є результатом, і саме з його висновків буде побудована концептуальна модель. «Центральним» об'єктом моделі є процес, що розглядається: електроліз алюмінію, що відбувається в електролізері Содерберга.

Найважливішими параметрами є параметри з найбільшою вагою, наведені в табл. 8, і приналежність до групи вхідних і вихідних параметрів. Побудована концептуальна модель, яка відображає суттєві технологічні параметри, представлена на рис. 4.2.

На основі вищенаведеного дослідження щодо визначення найбільш значущих параметрів техно-логічний процес, між ними можна встановити функціональні зв'язки.

Слід зазначити, що більшість параметрів мають нелінійну залежність, тому покращення одного з них може призвести до погіршення іншого. Немає формули, яка включала б усі змінні ТР одночасно, але система рівнянь, що описують окремі параметри, може відображати зв'язок між параметрами.

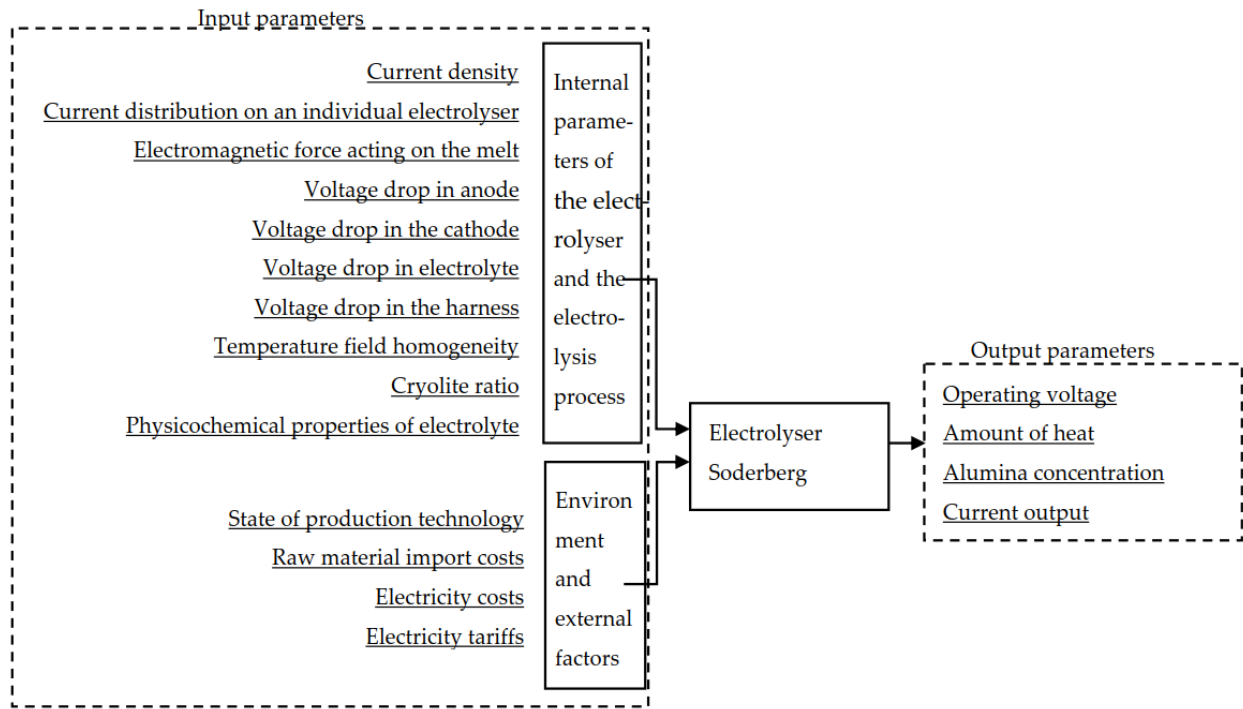


Рисунок 4.2 - Концептуальна модель виробництва алюмінію

Багато параметрів можна описати за допомогою існуючих законів і математичних формул, але є категорія параметрів, які вимагають якісного опису.

Стан техніки багато в чому залежить від якості металу, що виробляється, і дотримання технологічних регламентів. Найбільше котирування на Лондонській біржі металів має первинний алюміній з вмістом основного компонента 99,7–99,8 %. Для підтримки на виробництві марки металу не нижче А7 після капітального ремонту електролізерів його первинний метал (А0–А6) розбавляють у ливарному цеху з марки А8 до марки А7 протягом перших двох тижнів.

Бокситова сировинна база Росії в основному низько- і середньосортна, що знижує якість видобутого глинозему; тому нефелінові руди також повинні використовуватися як алюмінієва сировина. Щоб задовольнити потреби алюмінієвих заводів у глиноземі, сировина імпортується з-за кордону.



Розрахунок вартості імпорту сировини базується на виробничо-економічних показниках. У загальному вигляді, щоб розрахувати вартість закупленої з-за кордону сировини, необхідно узагальнити ряд показників, які змінюються залежно від обставин.

Формула, за якою можна розрахувати вартість сировини, така

$$M = \frac{N_p \cdot C_M \cdot K_{ТЗ}}{1000} \quad (4.1)$$

де  $N_p$  – норма витрат матеріалу на вироби, кг.;

$C_M$ —ціна матеріалу, грн./т;

$K_{ТЗ}$ —коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати.

Матеріальний баланс - це співвідношення між матеріалами, отриманими в процесі електролізу, і тими, що завантажуються в електролізер. За даними матеріального балансу визначають зміну складу електроліту та необхідні витрати сировини, матеріалів та електроенергії [10].

Концентрація глинозему в електроліті виражається з матеріального балансу розчиненим глиноземом і суворо регулюється стабілізацією в межах допустимого діапазону коливань, тому що недостатня концентрація є причиною анодного ефекту, а надмірна концентрація знижує розчинність глинозему в розплав електроліту:

$$m_{electrolit} \cdot \frac{dC_{Al_2O_3}}{dt} = \Delta G_{Al_2O_3} - k_{Al} \cdot G_{Alt} \quad (4.2)$$

де  $m_{electrolit}$  – маса розплаву електроліту, кг;

$C_{Al_2O_3}$ — концентрація глинозему в електроліті, мас. дріб;

$\Delta G_{Al_2O_3}$ – витрата завантаженого глинозему, кг/с;

$k_{Al}$ – стехіометричний коефіцієнт реакції розкладу оксиду алюмінію, який дозволяє визначити кількісні та якісні співвідношення між використовуваними компонентами сировини.

Кількість алюмінію в електролізері - це алюміній, який утворюється в процесі електролізу, і представлений у вигляді наступного рівняння:

$$G_{Al} = k_{elchem} \cdot I \cdot \eta \quad (4.3)$$

Продуктивність електролізера  $P_{Al}$  (кг/год) — це кількість алюмінію, що виділяється за одиницю часу:

$$P_{Al} = I \cdot k_{elchem} \cdot \eta$$

де  $I$  - сила струму на електролізері, А;

$k_{elchem} = 0,009 \cdot 10^{-6}$  – електрохімічний еквівалент алюмінію, кг/А·с;

$\eta$  – поточний вихід, масова частка.

Введення матеріалу в електролізну ванну розраховується з ємності електролізера:

$$\begin{cases} G_{Al_2O_3} = P_{Al} \cdot g_{Al_2O_3} \\ G_a = P_{Al} \cdot g \\ G_f = P_{Al} \cdot g \end{cases} \quad (4.4)$$

де  $g_{Al_2O_3}$ ,  $g_a$ ,  $g_f$  – питома витрата відповідно глинозему, маси анода та фтористих солей, кг/кгAl;

$G_{Al_2O_3}$ ,  $G_a$ ,  $G_f$  – витрата глинозему, маси аноду та фтористих солей відповідно, кг.

Вміст фториду алюмінію в криоліті необхідний для підтримки хімічного складу електроліту;

До якості фториду алюмінію висуваються такі вимоги:

- Містить не менше 30% алюмінію і 61% фтору;
- Містить домішки:  $Na \leq 0,5\%$ ,  $SiO_2 + Fe_2O_3 \leq 0,38\%$ ,  $SO_4 \leq 0,5\%$ ,  $P_2O_5 \leq 0,04\%$ .

Щоб контролювати співвідношення криолітів, необхідно підтримувати концентрацію вмісту фториду алюмінію в електроліті. У ванну з фторидом алюмінію подається фторид алюмінію за допомогою автоматичної системи

контролю, яка контролює рівень електроліту. Контроль базується на щоденних дискретних вимірюваннях і якісних аналізах, які оновлюються принаймні тричі на тиждень. Системи автоматичного контролю співвідношення кріолітів «TROLL» і «Stella» розраховують оптимальні добавки за сумою трьох незалежних змінних.

компоненти, які динамічно реагують на збурення кожен у своєму каналі для відхилення від номіналу [14]:

$$M_{\text{доб}} = M_{\text{ко}} + M_{\text{тем}} + M_{\text{норм}} \quad (4.5)$$

де  $M_{\text{доб}}$  – загальна (розрахункова) добавка фторозолів для корекції КО та технологічного стану електролізера, кг;

$M_{\text{ко}}$  – поточна добавка КО (лабораторні дані), кг;  $M_{\text{тем}}$  – температурна добавка (виміряна величина), кг;

$M_{\text{норм}}$  — добавка, що враховує нормативну витрату фторозолів — кількість фторидів, необхідну для отримання певної маси металу та підтримання КО за відсутності інших факторів.

Добавка для поточного КО дорівнює:

$$M_{\text{ко}} = \frac{2 \cdot M_{\text{эл}} \cdot (\text{КО}_{\text{тек}} - \text{КО}_{\text{баз}})}{C \cdot \text{КО}_{\text{баз}} \cdot \text{КО}_{\text{тек}} + 2 \cdot \text{КО}_{\text{баз}} \cdot \text{КО}_{\text{тек}} + 2}$$

де  $M_{\text{эл}}$  – маса електроліту в електролізері, кг;  $\text{КО}_{\text{баз}}$  - базовий КО (набір КО для даної ванни);  $\text{КО}_{\text{тек}}$  – поточна КО (дані лабораторії); константа, що характеризує використану сировину.

Виправлення КО відбувається тільки тоді, коли обидва не дорівнюють один одному.

Температурна добавка допускає корекцію та розраховується за такою формулою:

$$M_{\text{тем}} = K_{\text{тем}} \cdot (\text{— баз})$$

температура електролізера, К;

$K_{\text{темр}} = 1, 2 \text{ кг/град}$  – температурний коефіцієнт;

баз- температура електролізу, К.

Система також містить формулу для розрахунку змінної складової  $M_{\text{норм}}$ :

$$M_{\text{НОРМ}} = \frac{H_{\text{МЕТ}}}{H_{\text{баз}}} \cdot \text{НОРМ}_{\text{баз}}$$

де  $H_{\text{МЕТ}}$  – рівень електроліту в електролізері;  $H_{\text{баз}}$  – основний рівень електроліту в електролізері;  $\text{НОРМ}_{\text{баз}}$  – нормативна витрата фторозолів.

Вимірюється висота шару розплавленого алюмінію на дні електролізера

різними методами, наприклад, за допомогою сталевого прута вручну, але ефективність таких методів є низька, тому в даний час використовується метод, заснований на трасуванні межі розділу на сталевих стрижнях. Коли сталевий стрижень вертикально занурюють у розчин електроліту та розплавлений алюміній, утворюється слід, який називається слідом розділу. Цей метод вимірює відстань між контрольною точкою на сталевому стрижні та утвореною слідом. Висота шару розплавленого алюмінію розраховується за виразом:

$$h_m = X_{\text{Т.ф.-П}} - (X_{\text{Т.ф.-Т.О.}} + \text{Т.О.-слід}) \quad (4.6)$$

де  $X_{\text{Т.ф.-П}}$  – відстань від точки фіксації до ложа електролізера, см, яка визначається одноразово під час калібрування штанги та коригується у міру зношування ложа електролізера не рідше двох разів на рік;  $X_{\text{Т.ф.-Т.О.}}$  – відстань від точки фіксації до точки відліку, см, визначена один раз під час калібрування штанги;

$\text{Т.О. - слід}$  – відстань від контрольної точки до сліду міжфазної межі між електролітом і розплавленим алюмінієм, см, визначають при кожному вимірюванні висоти шару розплавленого алюмінію.

Кількість теплоти в електролізері описується рівнянням енергетичного балансу:

$$\frac{dQ'}{dt} = Q_{energy} + \sum_i Q_{in} - \sum_i Q_{out} - Q_{loss} - Q_{chem\_effect} \quad (4.7)$$

де  $Q'$  – кількість теплоти в електролізері, включаючи теплоту плавлення електроліту, Дж;

$Q_{energy}$  – споживана електроенергія (електропотужність), Вт;

Цинь,  $Q_{out}$  – теплота вхідного та вихідного матеріальних потоків (глинозем, анод, вуглець, алюміній, вихлопні газы), Вт;

$Q_{loss}$  – потік тепловтрат у навколишнє середовище, Вт;

$Q_{chem\_effect}$  – енергетичний ефект усіх хімічних реакцій в електролізері (при температурі реакції), Вт.

Споживання електроенергії:

$$Q_{energy} = I \cdot U = I^2 \cdot R_{electrolit} + I \cdot E_0 \quad (4.8)$$

де  $U$  – напруга на електролізері, В;

$R_{electrolit}$  – опір електроліту, Ом;

$E_0$  – оборотна частина енергетичного ефекту хімічної реакції (зміна внутрішньої енергії реагуючих речовин), Вт.

Потік теплових втрат у навколишнє середовище

$$Q_{loss} = Q_{loss_1} + Q_{loss_2} \quad (4.9)$$

де  $Q_{loss_1}$  – потік теплових втрат через межу плавлення електроліту, Вт;

$Q_{loss_2}$  – потоки тепловтрат через межу днища електролізера та анодів, Вт.

Потік теплових втрат через межу плавлення електроліту:

$$Q_{loss_1} = k_{smelt} \cdot S_{electrolit} \cdot (T_{smelt} - T_0) \quad (4.10)$$

де  $k_{спл}$  – коефіцієнт тепловіддачі в зоні плавлення, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

Селектроліт– площа контакту електроліту з анодами, м<sup>2</sup>;

Цмельт– температура в зоні плавлення, °С;

до– температура навколишнього середовища, °С.

Потік теплових втрат через межу плавлення електроліту під електролізером і анодами:

$$Q_{loss_2} = k_{bottom} \cdot S_{bottom} \cdot (T_{electrolit} - T_0) \quad (4.11)$$

де  $k_{bottom}$  – коефіцієнт тепловіддачі від електроліту через днище електролізера та аноди до атмосфери, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$S_{bottom}$ – сумарна площа основи та анодів електролізера, м<sup>2</sup>.

Електроліттемпература електроліту, °С.

Енергетичний ефект усіх хімічних реакцій, що відбуваються в електролізері:

$$Q_{chem\_effect} = I \cdot E_0 + Q_p \quad (4.12)$$

$Q_p$ – необоротна частина енергетичного ефекту хімічної реакції (теплота Пельтьє), Вт;

У процесі електролізу маса рідкого електроліту непостійна, оскільки відбувається приплив і відтік речовин, тому рівняння міжфазного теплового балансу визначає зміну маси в часі:

$$q_{electrolit} \cdot \frac{dm_{smelt}}{dt} = a_{electrolit} \cdot S_{electrolit} \cdot (T_{electrolit} - T_{smelt}) - k_{smelt} \cdot S_{electrolit} \cdot (T_{smelt} - T_0) \quad (4.13)$$

де  $q_{electrolit}$  – питома теплота плавлення електроліту, Дж/кг;

$m_{smelt}$ – маса розплаву глинозему, кг;

$a_{electrolit}$ – коефіцієнт теплопередачі від електроліту до зони плавлення глинозему Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Підставляючи рівняння (4.8) – (4.13) у (4.7), отримуємо рівняння енергетичного балансу для визначення температури електроліту в електролізері:

$$m_{electrolit} \cdot c_{electrolit} \cdot \frac{dT_{electrolit}}{dt} = I^2 \cdot R - a_{electrolit} \cdot S_{electrolit} \cdot (T_{electrolit} - T_{smelt}) - k_{smelt} \cdot S_{electrolit} \cdot S_{bottom} \cdot (T_{electrolit} - T_0), \quad (4.14)$$

де  $c_{electrolit}$  – теплоємність електроліту, Вт/(кг·°C), розрахована за теплоємністю речовин, що входять до складу електроліту.

Магнітне поле в електролізері виникає поблизу струмоведучих елементів електролізера. Електромагнітна сила, що діє на розплав, виникає в результаті взаємодії магнітного поля зі струмом, що протікає через електролізер.

$$\begin{cases} f_x = 0.1 \cdot (i_y \cdot H_z - i_z \cdot H_y) \\ f_y = 0.1 \cdot (i_z \cdot H_x - i_x \cdot H_z) \\ f_z = 0.1 \cdot (i_x \cdot H_y - i_y \cdot H_x) \end{cases} \quad (4.15)$$

де  $i_x, i_y, i_z$  – складові густини струму, А/см<sup>2</sup>;

$H_x, H_y, H_z$  – складові напруженості магнітного поля, А/м.

Робоча напруга на електролізері знімається з анодних і катодних зв'язків і характеризує стаціонарний стан режиму роботи:

$$U_{work} = I \cdot R + E_0$$

де  $R$  – опір електролізера, Ом;

$E_0$  – зворотний ЕДС на електролізері, В.

Для контролю та розрахунку відстані між полюсами використовується таке рівняння:

$$\frac{dl_{mpr}}{dt} = v_{anode} - v_{Al}$$

де  $v_{anode}$  – швидкість горіння анода, м/с;

$v_{Al}$  – швидкість зміни рівня алюмінію, м/с.

Оскільки опір електроліту пропорційний опору міжполюсної відстані, значення міжполюсної відстані можна виразити непрямим методом:

$$L = \frac{S_{electrolit} \cdot R_{mpr}}{\rho_{electrolit}} \quad (4.16)$$

де  $S_{electrolit}$  – площа поперечного перерізу електроліту, м<sup>2</sup>;

$R_{mpr}$ – опір електроліту на міжполюсній відстані, Ом;

релектроліт– питомий опір електроліту, Ом·м.

Електричний баланс складається на основі розрахунку значень струмів і падіння напруги в елементах конструкції електролізера. Падіння напруги в різних вузлах і зонах залежить від опору цих елементів і зміни послідовного струму:

$$U_{work} = E + \Delta U_{anode} + \Delta U_{cathode} + \Delta U_{electrolit} + \Delta U_{wire} \quad (4.17)$$

де  $E$  - напруга поляризації, В.

Емпіричне рівняння М. А. Коробова відображає залежність падіння напруги від конструктивних параметрів анода і провідних штирів, а також питомого опору анода і густини струму [6]. Для електролізерів з максимальною подачею струму падіння напруги на самоzapalюючих анодах розраховується за таким виразом:

$$\Delta U_{anode} = \left( 26,000 - \left( 16,000 - \frac{10.9 \cdot S_a}{n_{pin}} - 805 \cdot l_{middle\_pin} - \frac{l_{middle\_pin} \cdot S_a}{6.85 \cdot n_{pin}} \right) \cdot i \right) \cdot \rho_{anode} \cdot 10^{-3} \quad (4.18)$$

де  $n_{pin}$  – кількість струмопровідних виводів;

$l_{middle\_pin}$  – середня відстань від усіх струмоведучих штирів до дна анода, м;

$\rho_{анод}$ – середній питомий опір анода Ом·м;

$i$ – густина анодного струму, А/м<sup>2</sup>;

$S_a$ – площа анода, м<sup>2</sup>.

Падіння напруги в катодному пристрої також визначається рівнянням М. А. Коробова:

$$\Delta U_{athode} = \frac{l_{way} \cdot \rho_{block\_kathode} \cdot 10^3 + (3.83 \cdot 10^{-2} \cdot b_{cell/2}^2 + 2.87 \cdot b_{crust} \cdot b_{crust}^{1/3}) \cdot b_{block\_kathode}}{S_{kathode\_rod}} \cdot j_{anode} \quad (4.19)$$

де  $l_{way}$  – довжина поточного шляху по блоку, м;

$\rho_{блокувати\_катод}$ – питомий електричний опір катодного блоку, Ом·м;

$b_{cell/2}$  становить половину ширини шахти ванни, м.



Скатод\_rod – площа поперечного перерізу катодного стрижня з урахуванням чавунного лиття, м<sup>2</sup>.

Г. В. Форсблом і В. П. Машовець запропонували формулу для розрахунку падіння напругив електроліті:

$$\Delta U_{electrolit} = \frac{I \cdot \rho_{electrolit} \cdot L}{S_a + 2 \cdot (l_{anode} + b_{anode}) \cdot (2.5 + L)} \quad (4.20)$$

де  $2 \cdot (l_{anode} + b_{anode})$  – периметр анода, м.

Падіння напруги в електроліті становить велику частку напруги ванни; тому важливо контролювати цей показник. Зниження МПР до допустимих значень сприяє зменшенню кількості тепла, що виділяється в електроліті при протіканні електричного струму, а також стабілізації електричного балансу.

Падіння напруги в джгуті визначається сумою падіння напруги на аноді і катоді, а також в контактах електролізера:

$$\Delta U_{wire} = \Delta U_{a.wire} + \Delta U_{c.wire} \quad (4.21)$$

де  $\Delta U_{a.wire}$  – падіння напруги на анодному джгуті, В;

$\Delta U_{c.wire}$  — падіння напруги на катодному джгуті.

Анодна густина струму, густина струму в штифтах і в електроліті рівні до:

$$i_{a/sh/el} = \frac{I}{S_{a/o/Al}} \quad (4.22)$$

де  $S_o$  – загальна площа штифтів, мм<sup>2</sup>;

$S_{Al}$ —площа металевого дзеркала, см<sup>2</sup>.

Критичну густина струму  $i_c$  можна оцінити за рівнянням Піонте:

$$i_c = \frac{[5.5 + 0.0018 \cdot (-1323)] \cdot (\%Al_2O_3^{0.5} - 0.4)}{S_a^{0.1}} \quad (4.23)$$

Гранична густина струму  $i_{lim}$  дорівнює

$$i_{lim} = 0.0029 \cdot \%Al_2O_3^{0.56}$$

Найбільший вплив на силу струму має форма межі метал–електроліт і циркуляція електроліту й алюмінію; тому вихід по струму визначається емпіричною формулою Коробова, яка відображає зв'язок з різними характеристиками електролізної ванни:

$$\eta = \frac{1 - 256,700 \cdot S_a^{0.21}}{I_a^{0.58} \times L \times e^{1294/T_{electrolit}}}$$

Перерозподіл струму на елементах електролізера відбувається безперервно, коли анодні штирі змінюються, замінюються анодні блоки, обробляється електролізер та інші виконуються технологічні операції. Для забезпечення рівномірних витрат енергії на електроліз і відповідного її споживання необхідно підтримувати енергетичний баланс електролізера в залежності від стану технології виробництва, що визначає оптимальні техніко-економічні показники процесу [7]. Зміну розподілу струму по вузлах електролізера прийнято оцінювати за величиною коефіцієнта нерівномірності розподілу струму  $K$ :

$$K_n = \frac{1}{I_{cp}} \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum (I_i - I_{cp})^2} \quad (4.24)$$

де  $I_i$  – середнє значення струму;

$I_{cp}$  – поточне значення струму на  $i$ -му струмопроводі;

$n$  – кількість гілок.

Варто відзначити, що вимірювання величини струму окремими елементами в роботі електролізера заважають потужні магнітні поля і високі значення струму, оскільки сила струму досягає декількох тисяч ампер.

Витрати електроенергії визначаються питомим енергоспоживанням  $W$  (кВт·год/кг) для виробництва алюмінію, що дорівнює відношенню витрат енергії до кількості виробленого металу:

$$W = \frac{A}{G_{Alt}} = \frac{U_{middle}}{k_{elchem} \cdot \eta}$$

де  $A$  - повна електротехнічна робота, Дж;

$U_{\text{middle}}$  - середня напруга, В.

Зменшення вартості електроенергії є наслідком зниження споживання електроенергії, що є одним із головних завдань енергосистем. Споживання електроенергії не є одночасним, оскільки деякі споживачі електроенергії працюють лише через певні проміжки часу; найчастіше пік споживання спостерігається в ранкові та вечірні робочі години, оскільки більшість обслуговуючої техніки, освітлювального обладнання тощо не споживають електроенергію в нічний час. Рівномірний розподіл електроенергії є виробничою проблемою. Для вирішення цієї проблеми в Росії введені одноставковий і двоставковий тарифи.

Одноставковий тариф розрахований на малу потужність, яка не перевищує 100 кВт. У цьому тарифі оплата здійснюється за результатами зняття показань електролічильника.

Двоставковий тариф передбачає дві ставки — основну та додаткову. Ця система оплати тривалий час діяла, але це було не вигідно для виробників алюмінію, тому що базовий тариф сплачувався за максимальне навантаження, що контролювалося спеціальними лічильниками протягом місяця в години пік і становив 1 МВт, а додатковий тариф сплачувався за споживання електроенергії, зафіксоване метри. Генеруючі компанії не враховують, що енергоспоживання серії алюмінієвих електролізерів є стабільним. Тарифи на оголошену потужність визначаються компанією на місячній основі ( грн./МВт·год), а на спожиту електроенергію — по годинно ( грн./МВт·год).

$$C_p = C_{\text{ээ}} + \left( \frac{C_M}{24 \cdot N_d} \right) \quad (4.25)$$

де  $N_d$  – кількість днів у місяці ( $N_{\text{день}} = 28, 29, 30, 31$ );

$C_{\text{ээ}}$  - ціна електроенергії за лічильниками, грн./МВт·h;

Цм - ціна за заявлену потужність, грн./МВт·ч.

Слід зазначити, що собівартість електроенергії, виробленої на гідроелектростанціях, нижча, ніж на теплових. Транспортування купленої електроенергії також оплачується за тарифами в залежності від мережі — федеральної або міжобласної, по якій вона постачається споживачеві. Так, у випадку міжрегіонального транспорту частка електротранспорту може становити до 70%, а федерального – до 20%.

Математична модель – це система рівнянь, яка дозволяє оцінити та визначити параметри технологічного процесу, що впливають на основні показники електролізера, а також встановити внутрішні та зовнішні зв'язки по об'єкту.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 1. M = \frac{H_p \cdot H_{st} \cdot \kappa}{1000} \\
 2. m_{electrolit} \cdot \frac{dC_{Al_2O_3}}{dt} = \Delta G_{Al_2O_3} - k_{Al} \cdot G_{Alt} \\
 3. G_{Alt} = k_{elchem} \cdot I \cdot \eta \\
 4. \begin{cases} G_{Al_2O_3} = P_{Al} \cdot g_{Al_2O_3} \\ G_a = P_{Al} \cdot g \\ G_f = P_{Al} \cdot g \end{cases} \\
 5. M = M + M + M \\
 6. h_m = X_{T..-II} - (X_{T..-T..} + T_{..-}) \\
 7. \frac{dQ'}{dt} = Q_{energy} + \sum_i Q_{in} - \sum_j Q_{out} - Q_{loss} - Q_{chem\_effect} \\
 8. m_{electrolit} \cdot c_{electrolit} \cdot \frac{dT_{electrolit}}{dt} = I^2 \cdot R - a_{electrolit} \cdot S_{electrolit} \cdot (T_{electrolit} - T_{smelt}) - \\ - k_{smelt} \cdot S_{electrolit} \cdot S_{bottom} \cdot (T_{electrolit} - T_0) \\
 9. \begin{cases} f_x = 0.1 \cdot (i_y \cdot H_z - i_z \cdot H_y) \\ f_y = 0.1 \cdot (i_z \cdot H_x - i_x \cdot H_z) \\ f_z = 0.1 \cdot (i_x \cdot H_y - i_y \cdot H_x) \end{cases} \\
 10. L = \frac{S_{electrolit} \cdot R_{mpr}}{\rho_{electrolit}} \\
 11. U_{work} = E + \Delta U_{anode} + \Delta U_{cathode} + \Delta U_{electrolit} + \Delta U_{wire} \\
 12. \Delta U_{anode} = \left( 26000 - \left( 16000 - \frac{10.9 \cdot S_a}{n_{pin}} - 805 \cdot l_{middle\_pin} - \frac{l_{middle\_pin} \cdot S_a}{6.85 \cdot n_{pin}} \right) \cdot i \right) \cdot \rho_{anode} \cdot 10^{-3} \\
 13. \Delta U_{athode} = \frac{l_{way} \cdot \rho_{block\_kathode} \cdot 10^3 + (3.83 \cdot 10^{-2} \cdot b_{cell/2}^2 + 2.87 \cdot b_{crust} \cdot b_{crust}^{1/3}) \cdot b_{block\_kathode}}{S_{kathode\_rod}} \cdot j_{anode} \\
 14. \Delta U_{electrolit} = \frac{I \cdot \rho_{electrolit} \cdot L}{S_a + 2 \cdot (l_{anode} + b_{anode}) \cdot (2.5 + L)} \\
 15. \Delta U_{wire} = \Delta U_{a.wire} + \Delta U_{c.wire} + \text{в контактах} \\
 16. i_{a/m/el} = \frac{I}{S_{a/Al}} \\
 17. \eta = \frac{1 - 256700 \cdot S_a^{0.21}}{I_a^{0.58} \times L \times e^{1294/T_{electrolit}}} \\
 18. K_H = \frac{1}{I} \cdot \sqrt{\left( \frac{1}{n} \right) \cdot \sum (I_i - I)^2} \\
 19. = \Pi + \left( \frac{H_{st}}{24 \cdot N_{st}} \right)
 \end{array} \right.$$

Рівень технологічності виробництва алюмінію визначається напрямком удосконалення функціонування технологічного процесу електролізу.

Більшість прийомів оптимізації технологічного процесу мають точковий локальний характер. У даному дослідженні зроблено спробу описати технологічний процес як динамічний нестационарний процес з великою кількістю збурюючих впливів. Автори, спираючись на праці в галузі просторово-розподілених систем і теорії системного аналізу, проаналізували технологічний процес виробництва алюмінію. Досить детально висвітлено вхідні, вихідні та результуючі параметри електролізера з самозапалювальними анодами Содерберга. Отримано комплексну математичну модель процесу електролізу.

Науковий інтерес даної роботи полягає в математичній моделі, яка відрізняється від існуючих просторовим розподілом. Це дозволяє визначити технічні параметри електролізера на будь-якому етапі технологічного процесу.

Промисловий інтерес даної роботи полягає в можливості технічного контролю та прогнозування розвитку технологічного процесу. Сучасний електролізер - дуже динамічний об'єкт. Визначення криолітового коефіцієнта в лабораторних умовах займає до 8 год, а процес розкатки 10–12 год. Таким чином, результат детермінації втрачає свою актуальність практично на етапі вимірювання. Побічно про криолітовому коефіцієнті можна судити за станом температурного поля, але цей вид вимірювання має велику похибку. Представлена математична модель знижує похибку непрямого розрахунку на 7–10%.

Проте ця робота не позбавлена недоліків. До них можна віднести наступний ряд аспектів. Розробка концептуальної моделі технологічного процесу повинна враховувати низку економічних факторів; це не розглядається в цій статті через наголос на технічній частині питання. Крім того, у цій статті не розглядається екологічна сторона питання. Слід зазначити, що використання чистого алюмінію ефективно в різних галузях промисловості: машинобудуванні, у процесах видобутку природних ресурсів

і в процесі роботи систем автоматизації та управління. Особливе місце в структурі цих досліджень займають праці Першина І.М., який наочно показав можливість удосконалення систем керування гірничими та гірничими системами. Крім того, ця робота не розглядає альтернативні технології, де отримані результати можуть бути застосовані. Наприклад, технології отримання екологічно чистого палива, що значно підвищило б економічну ефективність процесу.

Беззаперечною позитивною стороною роботи є висока технічна точність розроблених моделей. Це підтверджено багатьма експериментами, проведеними на основі цієї моделі.

## **5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА**

### **5.1 Цифрова трансформація**

Цифрова трансформація визначається як процес, що використовується для використання цифрових технологій і можливостей для реконструкції економіки, інститутів і суспільства на рівні системи. Для компаній це дія із застосування цифрових технологій для створення цінності для компанії, зміни способу ведення бізнесу компаніями, створення відносин із клієнтами, постачальниками та іншими зацікавленими сторонами. Чіткі досягнення у виробництві, його випуску та процесах можуть сприяти цифровій трансформації разом із розвитком інноваційної бізнес-моделі та створенням цінності для клієнтів. Правильно інтегрована цифрова трансформація може підвищити загальну перевагу всіх зацікавлених сторін.

Успіх цифрових технологій залежить від того, як лідери та менеджери організують трансформацію, а також від підготовки людей, які використовують продукти та послуги. Цифрову трансформацію можна знайти скрізь, жоден бізнес, галузь чи організація не зачеплені нею.

### **5.2 Індустрія 4.0.**

Концепція «розумного заводу» була представлена в І4.0, у якому комп'ютери та автоматизація працюють разом абсолютно по-новому. Завдяки використанню Інтернету речей, інтелектуальних датчиків, хмарних обчислень, великих даних і штучного інтелекту він може вивчати та контролювати процеси з мінімальним внеском з боку людей. Забезпечення більш ефективних і точних операцій, зменшення споживання енергії, менше споживання сировини, а також позитивний вплив на навколишнє середовище. У І4.0 програмне забезпечення не просто стає більшою

частиною створення цінності в продукті, але воно спрямоване на підвищення загальної ефективності та якості всього ланцюга створення вартості. Таким чином, I4.0 охоплює більше, ніж просто «розумну фабрику», включаючи зв'язок між машинами та між ними, від машин до працівників і між цехом і бек-офісом. Він охоплює більше, ніж окрему фабрику чи компанію, залучаючи всіх учасників ланцюжка створення вартості, включаючи логістику. Мет та ін. нагадав, що, незважаючи на важливе значення з точки зору фірми, I4.0 є масштабним явищем, яке вимагає участі різних учасників, включаючи фірми, уряд, регулятори, університети та дослідницькі центри. Після успішного розгортання технологія на основі I4.0 стане невід'ємною частиною сучасних алюмінієвих заводів і буде використана на існуючих підприємствах, щоб досягти цілей сталого розвитку та залишатися конкурентоспроможними. Ральф і Стокінгер виявили, що багато виробників не повністю використовують потенціал четвертої промислової революції, причиною чого є низький рівень автоматизації їхніх процесів.

Компанії стикаються з дедалі більшими труднощами, адаптуючи технології цифрової трансформації, прийняті та прийняті людьми. Впровадження нових технологій і не дуже підковані користувачі можуть спричинити опір змінам, що уповільнює адаптацію цифрового рішення. Брунетті та ін. показали, що компаніям необхідно розробляти навчальні програми, які дозволять людям підвищити свою технологічну компетентність. За словами Белінгері та Нейротті, еволюція технологічних продуктів вимагає від фірм ініціювати контакти з іншими компаніями з іншим досвідом, ніж у центральній фірми, вони також заявили, що фірми часто не помічають ключових переваг нових технологій.

Ральф і Стокінгер визнають, що страх перед втратою роботи через ці проривні технології сприяє опору впровадження, особливо в металургійній промисловості. Вони також стурбовані тим, що взаємодія між людьми та



складними алгоритмами оптимізації процесів передбачає особливу проблему під час впровадження рішень І4.0 у металургійній промисловості.

Конкурентна перевага компанії залежить від її здатності створювати більше цінності, ніж її конкуренти, а створення більшої вартості залежить від здатності компанії успішно впроваджувати інновації . Численні емпіричні дослідження показують позитивний зв'язок між інноваціями та продуктивністю компанії. Дослідження підкреслили корисність розробки корпоративної стратегії та стратегічного управління в контексті внутрішніх можливостей компанії, а також потенційних можливостей, які пропонує зовнішнє середовище.

Інноваційна екосистема — це спосіб створення мереж і зосередження на спільному створенні вартості. Дана інновація часто не стоїть сама по собі, натомість вона залежить від змін у середовищі компанії, щоб досягти успіху. Вбудовування центральної фірми в екосистему взаємозалежних інновацій. Бенітез та ін запропонував структуру, за якою інноваційна екосистема може консолідуватися та розвиватися на різних етапах зрілості, залежно від того, чи досягають мети різні види діяльності. Rong та ін. стверджували, що коли галузь є дуже зрілою, бізнес-екосистема досить закрита, і контроль над продуктом або послугою має бути в руках центральної фірми разом із продуктом. Гранстранд і Хольгерссон визначили інноваційну екосистему таким чином: «Інноваційна екосистема — це набір акторів, видів діяльності та артефактів, що розвивається, а також інституцій і відносин, включаючи взаємодоповнюючі та замінні відносини, які важливі для інноваційної діяльності актор або популяція акторів».

### 5.3 Цифрова трансформація в алюмінієвій промисловості

Dolgikh et al. у своїй статті заявили, що потреба алюмінієвих заводів упровадити цифрову технологію для зниження вартості та підвищення якості була не можливістю, а необхідністю для російських алюмінієвих заводів, щоб залишатися конкурентоспроможними. Підвищення вимог ринку до якості металопродукції та підвищений попит на алюмінієві вироби з високим ступенем обробки є однією з рушійних сил цифрової трансформації в алюмінієвій промисловості. Одним із викликів, з якими стикається металургійна промисловість, коли йдеться про цифрову трансформацію, є високий ступінь неоднорідності галузі. Іншими проблемами, які вони згадали, є труднощі з модернізацією існуючого обладнання, взаємодія «людина-машина», висока вартість і відсутність стандартизації в інтеграції Digital-Twin, організаційна структура, не обладнана для вертикальної інтеграції цифрової трансформації, безпека даних і право власності. Найбільшою проблемою, за їх словами, була неналежна координація з відповідальними за виробництво та внутрішнім IT-відділом. У нас є докази, засновані на Sorger et al. досліджують, що великі дані є ключовим елементом ланцюжка створення вартості, який повністю оцифрований у світі металообробки. Цифрова трансформація може допомогти виробникам у прийнятті рішень разом з оптимізацією процесів і операцій.

## 6 БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ, ОХОРОНА ПРАЦІ

### 6.1. Система управління охороною праці

Система управління охороною праці (СУОП) — це сукупність органів управління підприємством, які на підставі комплексу нормативної документації проводять цілеспрямовану, планомірну діяльність щодо здійснення завдань і функцій управління з метою забезпечення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці. Створення СУОП здійснюється шляхом послідовного визначення мети і об'єкта управління, завдань і заходів щодо охорони праці, функцій і методів управління, побудови організаційної структури управління, складання нормативно-методичної документації. Головна мета управління охороною праці є створення здорових, безпечних і високопродуктивних умов праці, покращення виробничого побуту, запобігання травматизму і профзахворюванням.

Охорона праці базується на законодавчих, директивних та нормативно-технічних документах. При управлінні охороною праці не повинні прийматись рішення та здійснюватись заходи, що суперечать діючому законодавству, державним нормативним актам про охорону праці, стандартам безпеки праці, правилам та нормам охорони праці.

До основних функцій управління охороною праці належать:

- прогнозування і планування робіт, їх фінансування;
- організація та координація робіт;
- облік показників, аналіз та оцінка стану умов і безпеки праці;
- контроль за станом охорони праці та функціонуванням СУОП;
- стимулювання діяльності з охорони праці.

Функція планування, в основі якої лежить прогностичний аналіз, має вирішальне значення в СУОП. Планування роботи з охорони праці поділяється на перспективне, поточне та оперативне.

Перспективне планування охоплює найбільш важливі, трудомісткі й довгострокові за терміном виконання заходи з охорони праці, виконання яких, як правило, вимагає сумісної роботи кількох підрозділів підприємства. Можливість виконання заходів перспективного плану має бути підтверджена обґрунтованим розрахунком необхідного матеріально-технічного забезпечення і фінансових витрат із зазначенням джерел фінансування. Основною формою перспективного планування роботи з охорони праці є розроблення комплексного плану підприємства (на 3—5 років) щодо покращення стану охорони праці.

Поточне планування здійснюється у межах календарного року шляхом розроблення та включення відповідних заходів до розділу "Охорона праці" колективного договору.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці у структурних підрозділах і на підприємстві в цілому або перевірок органів державного нагляду. Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються у наказі роботодавця.

Оперативне планування роботи з охорони праці здійснюється за підсумками контролю стану охорони праці в структурних підрозділах і на підприємстві в цілому. Оперативні заходи щодо усунення виявлених недоліків зазначаються безпосередньо у наказі власника підприємства, який видається за підсумками контролю, або у плані заходів, як додатку до наказу.

Функція СУОП щодо організації та координації робіт передбачає формування органів управління охороною праці на всіх рівнях управління і всіх стадіях виробничого процесу, визначення обов'язків, прав, відповідальності та порядку взаємодії осіб, що приймають участь в процесі управління, а також прийняття та реалізацію управлінських рішень.

Контроль за станом охорони праці. Дійове управління охороною праці можна здійснювати тільки при наявності повної, своєчасної і вірогідної

інформації про стан охорони праці. Одержати таку інформацію, виявити можливі відхилення від норм безпеки, а також перевірити виконання планів та управлінських рішень можна тільки на підставі регулярного та об'єктивного контролю.

До основних форм контролю за станом охорони праці належать: оперативний контроль; контроль, що проводиться службою охорони праці підприємства; громадський контроль; адміністративно-громадський трьохступеневий контроль; відомчий контроль вищих органів. Необхідно зазначити, що крім контролю, здійснюється нагляд за охороною праці з боку державних та профспілкових інспекцій.

Адміністрація (роботодавець) для створення безпечних і нешкідливих умов праці працівників і для власної безпеки зобов'язана керуватися переліком таких основних нормативно-законодавчих актів і документів з охорони праці:

- Закон України «Про охорону праці»;
- Типове положення про службу охорони праці;
- Положення про порядок розслідування нещасних випадків, що сталися під час навчально-виховного процесу в навчальних закладах (Наказ МОН України № 616 від 31.08.2001 року):
  - Порядок розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві (Постанова КМУ № 1112 від 25 серпня 2004 року);
  - Типове положення про навчання з питань охорони праці;
  - Положення про розробку інструкцій з охорони праці;
  - Перелік робіт з підвищеною небезпекою;
  - Граничні норми підняття і переміщення важких речей жінками;
  - Граничні норми підняття і переміщення важких речей неповнолітніми;
- Положення про медичний огляд працівників окремих категорій;

- Перелік посад посадових осіб, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці;
- Порядок розробки і затвердження власником нормативних актів про охорону праці, чинних на підприємстві;
- Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту (Наказ Держгірпромнагляду від 24.03.2008 року № 53);
- Порядок проведення атестації робочих місць за умовами праці (Постанова Кабінету Міністрів України N 442 від 01.09.1992 року);
- Типове положення про комісію з питань охорони праці;
- Типове положення «Про кабінет охорони праці».

Стимулювання діяльності з охорони праці спрямовано на створення зацікавленості працівників у забезпеченні здорових та безпечних умов праці. Стимулювання передбачає як моральні, та матеріальні заохочення, так і покарання за невиконання покладених на конкретну особу зобов'язань стосовно безпеки праці або порушення вимог щодо охорони праці. До числа останніх належать: премії, винагороди за виконану конкретну роботу, винахідництво та раціоналізаторські пропозиції з питань охорони праці. Джерелом стимулювання діяльності з охорони праці є фонди охорони праці..

## **6.2. Вимоги до робочого середовища користувача ЕОМ: мікроклімат, освітлення, рівень шуму, електромагнітне випромінювання**

Приміщення з ЕОМ повинні бути оснащені системою автоматичної пожежної сигналізації відповідно до вимог переліку однотипних за призначенням об'єктів, які підлягають обладнанню автоматичними установками пожежегасіння та пожежної сигналізації, затвердженого наказом Міністерства внутрішніх справ України і зареєстрованого в

Міністерстві юстиції України з димовими пожежними сповіщувачами та переносними вуглекислотними вогнегасниками з розрахунку 2 шт. на кожні 20 кв. м площі приміщення з урахуванням граничнодопустимих концентрацій вогнегасної рідини відповідно до вимог Правил пожежної безпеки в Україні .

Правила експлуатації ЕОМ встановлюють вимоги безпеки та санітарно-гігієнічні вимоги до обладнання робочих місць користувачів ЕОМ і працівників, що виконують обслуговування, ремонт та налагодження ЕОМ, та роботи з застосуванням ЕОМ, відповідно до сучасного стану техніки та наукових досліджень у сфері безпечної організації робіт з експлуатації ЕОМ та з урахуванням положень міжнародних нормативно-правових актів з цих питань.

Гігієнічні вимоги до параметрів виробничого середовища включають вимоги до параметрів мікроклімату, освітлення, рівень шуму і електромагнітного випромінювання.

У виробничих приміщеннях на робочих місцях мають забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату: температури, відносної вологості й рухливості повітря.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення. Природне світло повинно проникати через бічні світлопрорізи, зорієнтовані, як правило, на північ чи північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5%. При виробничій потребі дозволяється експлуатувати ЕОМ у приміщеннях без природного освітлення за узгодженням з органами державного нагляду за охороною праці та органами і установами санітарно-епідеміологічної служби.

Загальне освітлення має бути виконане у вигляді суцільних або переривчатих ліній світильників, що розміщуються збоку від робочих місць (переважно зліва) паралельно лінії зору працівників.

Рівні шуму на робочих місцях осіб, що працюють з відеотерміналами та ЕОМ, визначені ДСанПіН 3.3. 2-007-98.

Для забезпечення нормованих рівнів шуму у виробничих приміщеннях та на робочих місцях застосовуються шумопоглинальні засоби, вибір яких обґрунтовується спеціальними інженерно-акустичними розрахунками.

Рівні електромагнітного випромінювання та магнітних полів повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.1. 006 "ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля", СН N 3206-85 "Гранично допустимі рівні магнітних полів частотою 50 Гц" та ДСанПіН 3.3. 2-007-98.

### **6.3. Створення і функціонування системи моніторингу довкілля з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території**

Державна система моніторингу довкілля - це система спостережень, збирання, оброблення, передавання, збереження та аналізу інформації про стан довкілля, прогнозування його змін і розроблення науково-обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень про запобігання негативним змінам стану довкілля та дотримання вимог екологічної безпеки. Це Положення визначає порядок створення та функціонування такої системи в Україні.

Система моніторингу є складовою частиною національної інформаційної інфраструктури, сумісної з аналогічними системами інших країн.

Система моніторингу – це відкрита інформаційна система, пріоритетами функціонування якої є захист життєво важливих екологічних інтересів людини і суспільства; збереження природних екосистем; відвернення кризових змін екологічного стану довкілля і запобігання



надзвичайним екологічним ситуаціям. Створення і функціонування системи моніторингу з метою інтеграції екологічних інформаційних систем, що охоплюють певні території, ґрунтується на принципах:

- узгодженості нормативно-правового та організаційно-медичного забезпечення, сумісності технічного, інформаційного і програмного забезпечення її складових частин;

- систематичності спостережень за станом довкілля та техногенними об'єктами, що впливають на нього;

- своєчасності отримання, комплексності оброблення та використання інформації про стан довкілля, що надходить і зберігається в системі моніторингу;

- об'єктивності первинної, аналітичної і прогнозної інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та оперативності її доведення до органів державної влади, органів місцевого самоврядування, громадських організацій, засобів масової інформації, населення України, заінтересованих міжнародних установ та світового співтовариства.

Моніторинг довкілля здійснюють:

- Мінприроди - ґрунтів на природоохоронних територіях (вміст ЗР, у тому числі радіонуклідів); державного екологічного картування території України для оцінки його стану та його змін під впливом господарської діяльності; наземних екосистем (фонова кількість ЗР, у тому числі радіонуклідів); видів рослинного і тваринного світу, що перебувають під загрозою зникнення, та видів, що перебувають під особливою охороною.

- Мінекономіки - ґрунтів сільськогосподарського використання (радіологічні, агрохімічні та токсикологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів); сільськогосподарських рослин і продуктів з них (токсикологічні та радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів).

□ Держлісагентство - ґрунтів земель лісового фонду (радіологічні визначення, залишкова кількість пестицидів, агрохімікатів і важких металів); лісової рослинності (стан, продуктивність, пошкодження біотичними та абіотичними чинниками, біорізноманіття, радіологічні визначення); мисливської фауни (видові, кількісні та просторові характеристики);

□ Держгеокадастр - ґрунтів і ландшафтів, зрошуваних і осушених земель (вторинне підтоплення і засолення тощо); берегових ліній річок, морів, озер, водосховищ, лиманів, заток, гідротехнічних споруд (динаміка змін, ушкодження земельних ресурсів);

□ Мінрегіон - питної води централізованих систем водопостачання (вміст ЗР, обсяги споживання); стічних вод міської каналізаційної мережі та очисних споруд (вміст ЗР, обсяги надходження);

□ Держгеонадра - підземних вод (ресурси та використання); ендегенних та екзогенних процесів (видові і просторові характеристики, активність прояву).

Фінансування робіт із створення і функціонування системи моніторингу та її складових частин здійснюється відповідно до порядку фінансування природоохоронних заходів за рахунок коштів, передбачених у державному та місцевих бюджетах згідно із законодавством.

Покриття певної частини витрат на створення і функціонування складових частин і компонентів системи моніторингу може здійснюватися за рахунок інноваційних фондів у межах коштів, передбачених на природоохоронні заходи, міжнародних грантів та інших джерел фінансування.

#### **6.4. Організація цивільного захисту на об'єктах промисловості та виконання заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного походження**

Виходячи з принципів побудови цивільного захисту в Україні слід підкреслити, що територіально - виробничий принцип знайшов втілення в організації цивільного захисту на об'єктах народного господарства, а також на територіях областей, міст і районів, в тому числі міських та сільських.

Відповідно до статті 16 Кодексу цивільного захисту України та з метою запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру (далі - надзвичайні ситуації), забезпечення стійкого функціонування об'єктів в умовах особливого періоду Кабінет Міністрів України.

Поставляє установити, що дія цієї постанови поширюється на органи управління цивільного захисту, а саме на центральні органи виконавчої влади, Раду міністрів Автономної Республіки Крим, обласні, Київську та Севастопольську міські, районні, районні у м. Києві та Севастополі державні адміністрації, військово-цивільні адміністрації, органи місцевого самоврядування та об'єкти незалежно від форми власності, порушення функціонування яких може завдати шкоди життєво важливим національним інтересам та які провадять діяльність та надають послуги в галузях енергетики, хімічної промисловості, підлягають охороні та обороні в умовах надзвичайного стану і особливого періоду, є об'єктами підвищеної небезпеки.

Для керівництва поточної роботи з цивільного захисту на об'єкті економіки створюється основний орган управління - штаб цивільного захисту. До складу штабу цивільного захисту входять: начальник штабу і його заступники (помічники) з оперативно-розвідувальної частини, бойової підготовки, житлового сектора.

Посада начальника штабу цивільного захисту передбачається штатним розкладом об'єкта. Начальник штабу є першим заступником начальника цивільного захисту об'єкта і має право за його ім'ям віддавати накази та розпорядження з цивільного захисту. Він є безпосереднім організатором управління цивільним захистом і сповіщення про загрозу або факт надзвичайної ситуації, розвідки, дозиметричного і хімічного контролю, веде поточне та перспективне планування, підготовку формувань і виробничого персоналу з цивільного захисту та контроль за виконанням всіх заходів з цивільного захисту.

Керівникам функціональних та територіальних підсистем єдиної державної системи цивільного захисту та підприємствам, установам, організаціям незалежно від форми власності, на які поширюється дія цієї постанови, забезпечити:

- уточнення планів реагування на надзвичайні ситуації і планів локалізації та ліквідації наслідків аварій, здійснення заходів щодо запобігання їх виникненню;
- готовність до здійснення оповіщення органів управління та сил цивільного захисту, населення про загрозу виникнення або виникнення надзвичайної ситуації та інформування їх про межі поширення, наслідки, способи та методи захисту, а також дії у зоні можливої надзвичайної ситуації;
- спостереження та контроль за ситуацією на об'єктах, на які поширюється дія цієї постанови, територіях цих об'єктів та/або за їх межами, а також здійснення постійного прогнозування можливості виникнення надзвичайних ситуацій, їх масштабів;
- готовність наявних сил і засобів цивільного захисту, можливість залучення додаткових сил і засобів у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- створення і використання матеріальних резервів для запобігання виникненню надзвичайних ситуацій і ліквідації їх наслідків.

Державній службі з надзвичайних ситуацій узагальнювати аналітичні матеріали та подавати їх для розгляду Державній комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій для забезпечення координації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій державного рівня.

Остаточне рішення щодо рівня надзвичайної ситуації з подальшим відображенням її у даних статистики, у тому числі при відсутності достатніх відомостей щодо розвитку надзвичайної ситуації, приймає спеціально уповноважений центральний орган виконавчої влади, до компетенції якого входить вирішення питань захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру, за погодженням у разі потреби із зацікавленими міністерствами та іншими центральними органами виконавчої влади. Обов'язково враховується (за його наявності) експертний висновок регіональної комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій щодо рівня надзвичайної ситуації.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У роботі було розроблено автоматизовану систему керування процесом електролізу алюмінію. Розглянуто тенденції автоматизації в промисловості виробництва алюмінію.

Надано формалізований опис вхідних і вихідних параметрів, а також керуючих і збурюючих впливів, на основі чого сформовано модель процесу, що дозволило забезпечити більш ефективне керування. На основі отриманих даних та результатів кореляційного аналізу побудовано концептуальну модель процесу виробництва алюмінію в електролізері.

Побудовано математичну модель, яка дає змогу визначити ступінь впливу зміни окремих параметрів процесу на його кінцеві результати та на якість одержуваної продукції.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Marinina O., Kirsanova N., Nevskaya M. Circular. Economy Models in Industry: Developing a Conceptual Framework. *Energies* 15, 2022. p. 9376
2. Ponomarenko T., Reshneva E., Mosquera Urbano A.P. Assessment of Energy Sustainability Issues in the Andean Community: Additional Indicators and Their Interpretation. *Energies* 15, 2022. p. 1077.
3. Cai X., Zang K. Design and implementation of electrolyzer simulation system. *Lect. Notes Electr. Eng.* 2013, 210, 247–254.
4. Popov P.A., Vabishchevich P.N. Numerical Simulation of the Aluminum Production. In *AIP Conference Proceedings*; American Institute of Physics Inc.: College Park, MD, USA. Volume 1629. 2014. p. 56–68.
5. Piskazhova T.V., Savenkova N.P., Anpilov S.V., Kalmykov A.V., Zaitsev, F.S., Anikeev, F.A. Three-Dimensional Mathematical Modeling of Dynamics Interfaces between Aluminum, Electrolytes and Reverse Zone of Oxidized Metal Depending on the Potencial Distribution. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 10, 2017. p. 59–73.
6. Savenkova N.P., Mokin A.Y., Udovichenko N.S. The MHD stability investigation of an aluminum electrolyzer under various process conditions. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2020. p. 1560.
7. Petrov P.A., Sharikov Y.V., Vlasov A.A., Bazhin V.Y., Feoktistov A.Y. Developing Software for the Feed-Control Systems of High-Power Aluminum Reduction Cells. *Metallurgist*, 58, 2015. p.1060–1063.
8. Makeev A.V., Piskazhova T.V., Gofman P.M. Optimization control actions for the electrolytic method of aluminium production. *Sib. J. Sci. Technol.*, 21, 2020. p.314–322.
9. Feshchenko R.Y., Erokhina O.O., Kvanin A.L., Lutskiy D.S., Vasilyev V.V. Analytical review of the foreign publications about the methods of rise of

- operating parameters of cathode blocks during 1995–2014. *CIS Iron Steel Rev.*, 13, 2017. p.48–52.
10. Litvinenko V.S. Digital Economy as a Factor in the Technological Development of the Mineral Sector. *Nat. Resour. Res.*, 29, 2020. p. 1521–1541.
  11. Li X., Liu B., Qian W., Rao G., Chen, L., Cui, J. Design of Soft-Sensing Model for Alumina Concentration Based on Improved Deep Belief Network. *Processes*, 10, 2022. p.2537.
  12. Zhu, J., Li, J. Diagnosis Method for the Heat Balance State of an Aluminum Reduction Cell Based on Bayesian Network. *Metals*, 10, 2020. p. 604.
  13. Džurnák, R., Varga, A., Jablonský, G., Variny, M., Pástor, M., Lukáč, L. Analyzing the Formation of Gaseous Emissions during Aluminum Melting Process with Utilization of Oxygen-Enhanced Combustion. *Metals*, 11, 2021. p.242.
  14. Marchi, B., Zanoni, S., Ferretti, I. Energy Efficiency Investments in Industry with Uncertain Demand Rate: Effects on the Specific Energy Consumption. *Energies*, 13, 2020. p.161.
  15. Sarnovsky, M., Bednar, P., Smatana, M. Cross-Sectorial Semantic Model for Support of Data Analytics in Process Industries. *Processes*, 7, 2019.p. 281.
  16. Akundi, A., Euresti, D., Luna, S., Ankobiah, W., Lopes, A., Edinbarough, I. State of Industry 5.0—Analysis and Identification of Current Research Trends. *Appl. Syst. Innov.*, 5, 2022.p. 27.
  17. Xu, C., Tu, Z., Zhang, W., Cen, J., Xiong, J., Wang, N. A Method of Optimizing Cell Voltage Based on STA-LSSVM Model. *Mathematics*, 10, 2022. p.4710.
  18. Cui, J., Li, Z., Li, X., Liu, B., Li, Q., Yan, Q., Huang, R., Lu, H., Cao, B. A Novel Method of Local Anode Effect Prediction for Large Aluminum Reduction Cell. *Appl. Sci.*, 12, 2022. p. 12403.
  19. Wang, J., Chen, X., Deng, Z., Zhang, H., Zeng, J. Distributed Robust Dictionary Pair Learning and Its Application to Aluminum Electrolysis Industrial Process. *Processes*, 10, 2022. p. 1850.



20. Curtolo, D.C., Xiong, N., Friedrich, S., Friedrich, B. High- and Ultra-High-Purity Aluminum, a Review on Technical Production Methodologies. *Metals*, 11, 2021. p.1407.
21. Yang, Y., Zhang, Y., Yu, J., Wang, Z., Shi, Z. Study on the Inter-Electrode Process of Aluminum Electrolysis (II)—Digital Analysis of the Anode Gas Distribution Patterns on the Anode Surface Using A See-Through Cell. *Appl. Sci.*, 11, 2021. p.7702.
22. Sun, K., Li, J., Zhang, H., Li, T., Li, J. First-Principles Study on the Mechanism of Greenhouse Gas Generation in Aluminum Electrolysis. *Metals*, 11, 2021. p. 1118.
23. Stanic, N., Bø, E.T., Sandnes, E. CO and CO<sub>2</sub> Anode Gas Concentration at Lower Current Densities in Cryolite Melt. *Metals*, 10, 2020. p.1694.
24. Wang, W., Sun, K. Influence of Current Density on the Microstructure of Carbon-Based Cathode Materials during Aluminum Electrolysis. *Appl. Sci.*, 10, 2020. p. 2228.
25. Yang, Y., Tao, W., Liu, W., Hu, X., Wang, Z., Shi, Z., Shu, X. The Adsorption Behavior of Moisture on Smelter Grade Alumina during Transportation and Storage—For Primary Aluminum Production. *Metals*, 10, 2020. p. 325.
26. Luneng, R., Bertel, S.N., Mikkelsen, J., Ratvik, A.P., Grande, T. Chemical Durability of Thermal Insulating Materials in Hall-Héroult Electrolysis Cells. *Ceramics*, 2, 2019. p. 441–459.
27. Boikov, A., Payor, V. The Present Issues of Control Automation for Levitation Metal Melting. *Symmetry*, 14, 2022. p.1968.
28. Boikov, A.V., Savelev, R.V., Payor, V.A. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using dem. Part 2. *CIS Iron Steel Rev.*, 20, 2020. p.3–6.
29. Guan, P., Liu, A., Shi, Z., Hu, X., Wang, Z. Corrosion Behavior of Fe-Ni-Al Alloy Inert Anode in Cryolite Melts. *Metals*, 9, 2019. p.399.

30. Yakimov, I., Zaloga, A., Dubinin, P., Bezrukova, O., Samoilo, A., Burakov, S., Semenkin, E., Semenkina, M., Andruschenko, E. Application of Evolutionary Rietveld Method Based XRD Phase Analysis and a Self-Configuring Genetic Algorithm to the Inspection of Electrolyte Composition in Aluminum Electrolysis Baths. *Crystals*, 8, 2018. p.402.
31. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 1. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-8052 від 28.05.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2013. – 256 с.
32. А.Г. Микитишин, М.М. Митник, П.Д. Стухляк, В.В. Пасічник Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник] (Лист МОНУ №1/11-11650 від 16.07.12р.) - Львів, "Магнолія 2006", 2014. – 312 с.
33. Микитишин А.Г., Митник, П.Д. Стухляк. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем: навчальний посібник – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. – 256 с.
34. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі : навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 384 с.
35. Введення в компютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, компютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.
36. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.