

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Металургії  
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота(проект)

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

на тему "Аналіз та вдосконалення технології випалу  
вапняку в виробництві цементу"

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.136.9-МКМ-З  
спеціальності 136 "Металургія"  
(код і назва спеціальності)

спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми "Металургія кольорових металів"  
(назва освітньої програми)

К.О. Товбога  
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент Доциг К.Т.Н., Небєреико Т.М.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент проф. с.н.с. д.н. Гіруцьков О.В.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя  
20 20

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти Другий (магістерський)  
Спеціальність 136 "Металургія"  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)  
Освітня програма "Металургія кольорових металів"

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
« 10 » жовтня 20 20 року

ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Толога Костянтин Александрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) "Аналіз та вдосконалення технології випалу ваньку в виробництві шкочення"

керівник роботи Нестеренко Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 09 » жовтня 2020 року № 1586-с

2 Строк подання студентом роботи 30 листопада 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи Ванька поліестерного складу містить близько 10% часточок розміром до 40 мм.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1 Аналітична частина. 2 Методика дослідження. 3 Дослідницька частина. 4 Оцінка праці та технологія безпеки. 5 Економічна частина. Висновки. Перелік джерел посилання.

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

1 Аналітична частина - 7 л. 2 Методика дослідження - 1 л.  
3 Дослідницька частина - 6 л. 4 Оцінка праці та технологія безпеки - 1 л. 5 Економічна частина - 1 л.

### 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Несгеренко Т.М., доцент	<i>ТМ</i> 10.10.2020	<i>ТМ</i> 12.10.2020
2	Несгеренко Т.М., доцент	<i>ТМ</i> 10.10.2020	<i>ТМ</i> 30.10.2020
3	Несгеренко Т.М., доцент	<i>ТМ</i> 10.10.2020	<i>ТМ</i> 30.10.2020
4	Несгеренко Т.М., доцент	<i>ТМ</i> 10.10.2020	<i>ТМ</i> 20.11.2020
5	Несгеренко Т.М., доцент	<i>ТМ</i> 10.10.2020	<i>ТМ</i> 25.11.2020

7 Дата видачі завдання 10 жовтня 2020 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	12.10.2020	Виконано
2	Аналітична частина	20.10.2020	Виконано
3	Методика дослідження	26.10.2020	Виконано
4	Дослідницька частина	14.11.2020	Виконано
5	Оцінка праці та теплоенергетика Бурпека	19.11.2020	Виконано
6	Економічна частина	23.11.2020	Виконано
7	Графічна частина	30.11.2020	Виконано

Студент

*[Підпис]*  
(підпис)

К.О.Томота

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)

*ТМ*  
(підпис)

Т.М. Несгеренко

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

*[Підпис]*  
(підпис)

Т.М. Вольер

(ініціали)

та

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 91 с., 23 табл., 17 рис., 32 джерела.

ВАПНО, ВАПНЯК, ВИПАЛЮВАННЯ, ГАСІННЯ, ГЛИНОЗЕМ, ШАХТНА ПІЧ ВИПАЛЮВАННЯ ВАПНЯКУ.

Об'єкт дослідження: процес випалювання вапняку в виробництві глинозему.

Предмет дослідження: вплив технологічних умов випалювання вапняку і гасіння вапна на якість отриманого вапна і вапняного молока.

Мета роботи: дослідити особливості та вибрати напрями вдосконалення технології випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему.

Методика дослідження: визначення кількості зерен, які не погасилися; визначення вмісту активних оксидів кальцію і магнію; визначення балу пористості; спектральний і хімічний аналізи; визначення гранулометричного складу вапна; термодинамічні розрахунки.

Одержані наслідки та їх новизна: термодинамічними дослідженнями обґрунтовано вибір температурних інтервалів випалювання вапняку і гасіння вапна в глиноземному виробництві; досліджено кінетику і механізм процесів випалювання вапняку і гасіння вапна; визначено оптимальні технологічні умови випалювання вапняку і гасіння вапна; розроблено рекомендації щодо вдосконалення технології випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему.

Проведеними дослідженнями підтверджено доцільність використання шахтних печей для випалювання вапняку в виробництві глинозему. Для поліпшення якості одержуваного вапна слід відсівати дрібну фракцію вапняку (частинки з розмірами до 40 мм). Такий захід також створить більш сприятливі умови і поліпшить процес випалювання вапняку в шахтних печах.

Якісне вапняне молоко з хорошим гранулометричним складом можна отримувати гасінням вапна оборотним розчином при дозуванні вапна не більше 130 г/л активного оксиду кальцію.

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	6
1 Аналітична частина.....	9
1.1 Характеристика і використання вапна.....	9
1.2 Характеристика і властивості вапняку.....	12
1.3 Технологічний процес випалювання вапняку та приготування вапновмісних розчинів.....	14
1.3.1 Технологічний процес випалювання вапняку.....	14
1.3.2 Технологічний процес приготування вапняного молока.....	17
1.3.3 Технологічний процес приготування вапняної суспензії.....	18
1.4 Фізико-хімічні основи випалювання карбонатної сировини.....	19
1.5 Печі для випалювання вапняку.....	23
1.5.1 Шахтні печі для випалювання вапняку.....	24
1.5.2 Обертові печі для випалювання вапняку.....	29
2 Методика дослідження.....	32
2.1 Характеристики вихідних матеріалів і обладнання.....	32
2.2 Методика випалювання вапняку та гасіння вапна.....	32
2.3 Методика визначення гранулометричного складу вапна.....	35
2.4 Методика проведення термодинамічних розрахунків.....	36
3 Дослідницька частина.....	40
3.1 Дослідження термодинаміки і механізму випалювання карбонатної сировини і гасіння вапна.....	40
3.2 Дослідження конструкції завантажувально-розподільчого пристрою печі випалювання вапняку.....	47
3.3 Дослідження конструкції вивантажувального пристрою печі випалювання вапняку.....	50
3.4 Дослідження впливу умов випалювання вапняку на якість отриманого вапна і вапняного молока.....	52

3.5 Про модернізацію газоочисних споруд печей випалювання вапняку для виробництва глинозему.....	58
3.4 Заходи щодо впровадження результатів дослідження.....	60
4 Охорона праці та техногенна безпека.....	67
4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на дослідника в металургійній лабораторії.....	67
4.2 Заходи з поліпшення умов праці.....	69
4.3 Виробнича санітарія.....	70
5 Економічна частина.....	74
5.1 Організація виконання науково-дослідницької роботи.....	74
5.1.1 Планування етапів науково-дослідницької роботи.....	74
5.1.2 Визначення трудомісткості виконання НДР.....	75
5.1.3 Визначення числа виконавців НДР.....	76
5.1.4 Розрахунок тривалості етапів НДР.....	76
5.1.5 Побудова стрічкового графіка проведення науково-дослідної роботи.....	77
5.2 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження.....	79
5.2.1 Розрахунок витрат на основні матеріали.....	79
5.2.2 Розрахунок витрат на амортизацію обладнання.....	79
5.2.3 Розрахунок витрат на електроенергію.....	80
5.2.4 Розрахунок заробітної плати й відрахувань.....	81
5.2.5 Накладні витрати.....	84
5.2.6 Зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	84
Загальні висновки.....	86
Перелік джерел посилання.....	89

## ВСТУП

У виробництві глинозему вапно використовують для вапняної каустифікації, розмелювання бокситу, осадження оксиду алюмінію з маточного розчину у вигляді трикальцієвих гідроалюмінатів та ін. На стадії розмелювання бокситу в оборотний розчин додають 3-5 % вапна [1-6]. Для уникнення потрапляння неактивного вапна в технологічний процес передбачено подавати вапно у вигляді вапняного молока, вапновмісних розчинів.

Вапно отримують випалюванням вапняку в шахтних та обертових печах. Для випалювання вапняку поширено використовують шахтні вертикальні печі, які опалюють газоподібним, рідким (мазутом) або твердим паливом (кокс). Для отримання вапна в шахтних печах використовують подрібнений і відсортований вапняк розміром шматків 50-150 мм. Залежно від якості вапняку і вологості витрата його становить 1,75-2,5 т на 1 т вапна [2]. Якість вапна залежить від якості вихідного вапняку та повноти розкладання карбонату кальцію під час випалювання, визначається вмістом активного оксиду кальцію у складі вапна.

У виробництві вапна основні витрати припадають на сировину і паливо, тому зниження вартості сировини і витрати палива є найбільш важливими завданнями при виробництві вапна та випалюванні вапняку.

Низька якість вапняку, що використовується для випалювання в печах, є однією з основних причин низьких показників роботи багатьох вапняних ділянок глиноземного виробництва.

*Мета роботи* – дослідити особливості та вибрати напрями вдосконалення технології випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему.

*Завдання дослідження:*

1. Проаналізувати вплив якості вапняку на технологію його випалювання.

2. Проаналізувати вплив якості вапняку на вибір типу і конструкції сучасних печей випалювання вапняку.

3. Дослідити термодинаміку і механізм випалювання карбонатної сировини.

4. Дослідити термодинаміку і механізм гасіння вапна.

5. Дослідити вплив умов випалювання вапняку на якість отриманого вапна і вапняного молока.

6. Вибрати напрями реконструкції діючих у виробництві глинозему печей випалювання вапняку і вдосконалення технології випалювання вапняку.

*Об'єкт дослідження* – процес випалювання вапняку в виробництві глинозему.

*Предмет дослідження* – вплив технологічних умов випалювання вапняку і гасіння вапна на якість отриманого вапна і вапняного молока.

*Наукова новизна:*

1. Термодинамічними дослідженнями обґрунтовано вибір температурних інтервалів випалювання вапняку і гасіння вапна в глиноземному виробництві. Слід забезпечити підведення теплоти протягом всього процесу розкладання  $\text{CaCO}_3$  за температур в інтервалі 273-1173 К і розкладання  $\text{MgCO}_3$  за температур в інтервалі 273-573 К.

2. Досліджено кінетику і механізм процесу випалювання вапняку. Лімітуючою стадією процесу дисоціації є утворення кристалічних зародків  $\text{CaO}$ . На температуру дисоціації  $\text{CaCO}_3$  впливають температура газового середовища і вміст діоксиду вуглецю в ньому. Тривалість процесу дисоціації визначається також розміром шматків випалюваного вапняку.

3. Досліджено кінетику і механізм процесу гасіння вапна. Процес гідратації вапна є багатостадійним, стадії якого можуть накладатися або заміщувати одна одну. Експериментально визначено, що реакція гасіння вапна водою лімітується дифузійними процесами. Гасіння вапна відбувається також зі збільшенням об'єму твердої фази і диспергування вапна.



*Практичне значення:*

1. Вибір технологічних умов процесу гасіння вапна і якість вапна залежить від виду, структури та хімічного складу вихідної карбонатної породи, а також умов її випалювання. Для кожної конкретної карбонатної сировини потрібно встановлювати оптимальні температуру і тривалість випалювання, вид палива, коефіцієнт надлишку повітря, розміри шматків вапняку та ін.

2. Відсівання дрібної фракції вапняку (частинок з розмірами до 40 мм) дозволить поліпшити якість одержуваного вапна та створить більш сприятливі умови для випалювання вапняку в шахтних печах.

3. Використання «дешевого» вапняку приводить до зростання його витрати в 1,5-2 рази, проте активного вапна може не вистачати для технологічних потреб. Кожен 1 кг домішок, що завантажуються в піч як забруднення, так і у складі компонентів вапняку або палива зв'язує 1 кг випаленого вапна.

4. Модернізація діючих шахтних печей з встановленням нових завантажувально-розподільчих і вивантажувального пристроїв, до складу яких входить додатковий другий клапан і частотний перетворювач на приводі вивантажувального пристрою, дозволить забезпечити рівномірний розподіл вапняку за перерізом печі і знизити питомі витрати палива на 15 %.

5. Впровадження схеми автоматизації завантажування і вирівнювання рівня шихти в шахтних печах випалювання вапняку дозволить зменшити питомі витрати палива на 2-3 % від загальних витрат.

6. Якісне вапняне молоко з хорошим гранулометричним складом можна отримувати гасінням вапна оборотним розчином при дозуванні вапна не більше 130 г/л активного оксиду кальцію.

# 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

## 1.1 Характеристика і використання вапна

Вапно є продуктом випалювання вапняних і вапняно-магнезійальних карбонатних порід до можливо повного видалення вуглекислоти, що складається переважно з оксиду кальцію.

Вапно застосовують в багатьох галузях промисловості і сільському господарстві. Найбільшими споживачами вапна є металургійні підприємства та будівельна галузь. Основними напрями використання вапна в промисловості є:

- сталеплавильне виробництво – для видалення сполук фосфора, сірки, інших домішок;
- виробництво глинозему – для вапняної каустифікації, розмелювання бокситу, осадження оксиду алюмінію з маточного розчину у вигляді трикальцієвих гідроалюмінатів та ін.;
- гірничо-металургійна галузь – для збагачення руд корисними копалинами;
- хімічна промисловість – для виробництва кальцинованої соди, карбїду кальцію, хлорного вапна та ін.;
- будівельна галузь – для виробництва силікатної цегли;
- харчова промисловість – для виробництва цукру, соди;
- різні галузі промисловості – для очищення стічних вод і димових газів.

Випалювання вапняку, що містить не більше 5 % карбонату магнію, здійснюють в шахтних або обертових печах за температури 1100-1250 °С з отриманням вапна. Чим більше карбонатна порода містить домішок доломіту, глини, піску, тим нижча повинна бути оптимальна температура випалювання (900-1150 °С), для одержання м'яко випаленого вапна небажані домішки гіпсу. Гіпс (навіть при вмісті у вапні близько 0,5-1,0 %) сильно знижує пластичність вапняного тіста [7].

Значно впливають на властивості вапна залізисті домішки (особливо пірит). Такі домішки вже за температури 1200 °С і більше викликають утворення під час випалювання легкоплавких евтектик, що сприяють інтенсивному зростанню крупних кристалів, які повільно реагують з водою при гасінні вапна і викликають явища, зв'язані з «перепалом».

Вапно (CaO), отримане випалюванням вапняку в печі, поділяють на: вільне і зв'язане (рис. 1.1). Вільне CaO складається з активного і неактивного оксиду кальцію. Активний оксид CaO – це та частина вільного CaO, який без попереднього розмелювання гаситься водою, перетворюється на гідроксид кальцію Ca(OH)<sub>2</sub> або на гашене вапно. Неактивний оксид CaO є частиною вільного оксиду CaO, який не реагує з водою за звичайних умов, проте може бути перетвореним в активну фазу при тонкому розмелюванні. Утворення неактивного вапна відбувається за рахунок обволікання зерен активного оксиду CaO плівкою розплавленого шлаку (після розмелювання таке вапно добре гаситься), або це оксид CaO, який має структурні зміни через високу температуру випалювання (таке вапно буде довго гаситися навіть після тонкого розмелювання). Отже, саме такий оксид CaO і становить 50-60 % відходів після апаратів тонкого очищення вапняного молока. Неактивний оксид CaO називають «перепалом вапна».

Зв'язаним оксидом CaO називають ту частину оксиду кальцію, яка вступила у взаємодію із домішками і утворила нові хімічні сполуки, також відноситься і нерозкладений CaCO<sub>3</sub>.

Якість вапна за ГОСТ 9179–77 і ТУ 48-0113-3-77 визначається такими параметрами:

- а) активність (вміст активних CaO + MgO);
- б) вміст непогашених зерен (н. з.);
- в) залишковий вміст CO<sub>2</sub>, ступінь декарбонізації;
- г) час і температура гасіння.

Крім того, при виробництві вапна в печах на газовому паливі важливі такі

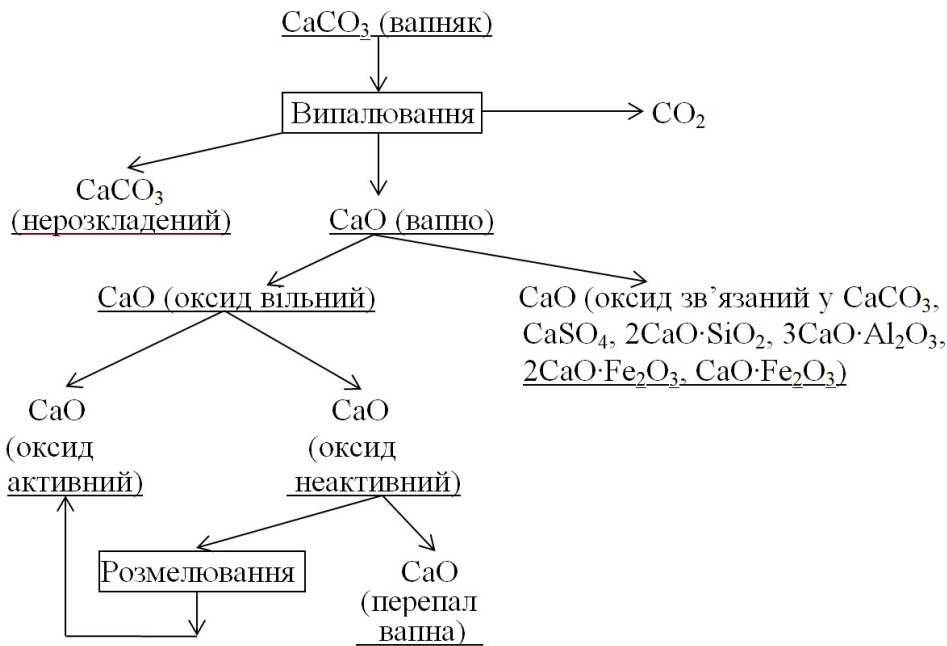


Рисунок 1.1 – Види оксиду кальцію у складі вапна

економічні показники:

- витрата палива (природного газу);
- витрата електроенергії;
- вартість видобутку і підготовки сировини (вапняку, крейди);
- капітальні витрати;
- витрати на обслуговування і ремонт.

Аналіз собівартості вапна показує, що основні ( $\approx 70$  %) витрати припадають на сировину і паливо, причому витрати на технологічне паливо можуть становити 50 % і більше, 15-20 % складають амортизаційні відрахування і витрати на ремонт обладнання, всі інші витрати не перевищують 10-15 % собівартості [8-11]. Отже, зниження вартості сировини і витрати палива є найбільш важливими завданнями при випалюванні вапняку та виробництві вапна.

Для зменшення собівартості вапна процес випалу слід проводити так, щоб отримувати якомога більше активного оксиду CaO. Досягається це хорошою підготовкою та дозуванням шихти, а також оптимізацією витрати палива.

Головна вимога до випаленого вапна – воно повинно гаситися водою протягом 10-15 хвилин, при цьому температура вапняного молока має становити 85-90 °С.

Вапно для технологічних потреб виробництва глинозему отримують шляхом випалювання вапняку в шахтних випалювальних печах. Активність випаленого вапна становить не більше 85 %. Неактивне вапно є недопалом, містить  $\text{CaCO}_3$  і  $\text{CaSO}_4$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Для виключення можливості потрапляння неактивного вапна в оборотний розчин добавляють вапняне молоко – суспензію гідроксиду кальцію  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , яку отримують гасінням вапна водою. Найменший вміст активного  $\text{CaO}$  спостерігається в дрібних часточках вапна.

## 1.2 Характеристика і властивості вапняку

Вимоги до якості вапняку, який використовується в промисловості України, регламентовані різними стандартами (ДСТУ, ТУ, СТП). За цими стандартами вапняк повинен мати такий хімічний склад: не менше 93 %  $\text{CaCO}_3$ ; до 2,5 %  $\text{MgCO}_3$ ; до 1,5 % ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ); до 0,4 %  $\text{CaSO}_4$ ; до 3 %  $\text{SiO}_2$ ; до 0,25 % ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ); до 3 % домішок (глина та інші). Насипна щільність від  $1300 \text{ кг/м}^3$  до  $1500 \text{ кг/м}^3$ .

Слід зазначити, що промислові стандарти України значно відрізняється в гірший бік від європейських стандартів. Порівняння основних вимог до вапняку, що використовується в Україні та країнах ЄС надано в таблиці (табл.1.1.).

Так, за ТУ 48-0123-77 на вапняки для виробництва вапна у глиноземному виробництві допускається масова частка шматків більше і менше встановленого розміру до 7 %. За ОСТ 14-64-80 для виробництва вапна в сталеплавильному виробництві допускаються шматки вапняку більше максимального розміру на

15 % і менше мінімального на 10 %. Тому такі вимоги негативно впливають на роботу них печей випалювання вапняку.

Через низьку міцність вапняку, яка супроводжується низькою морозостійкістю, під час вантажно-вивантажувальних робіт, складування й

Таблиця 1.1 – Характеристика вапняку за стандартами України та ЄС

Найменування показника	Значення параметрів	
	Україна	ЄС
Вміст $\text{CaCO}_3$ , не менше % маси сухих речовин	93	96
Вміст $\text{MgCO}_3$ , не більше % маси сухих речовин	2,5	1
Сторонні домішки (глина та ін.), не більше % маси сухих речовин	3	–
Речовини, що не розчиняються у соляній кислоті, не більше % маси сухих речовин	3	1
Межа міцності на стиск, МПа	10	80
Розміри шматків вапняку, мм	30-80	80-120
	50-150	100-150
	80-150	120-180

зберігання на відкритих майданчиках камінь додатково дробиться. Тому виникає потреба у попередньому його пересіванні до завантаження в печі випалювання вапняку, що приводить до втрат, які можуть досягати 40 % від маси завезеного каменю.

Проте, незважаючи на попереднє пересівання, у вапняку, що завантажують в піч, залишається підвищений вміст дрібних фракцій. Крім того, під час випалювання вапняк продовжує дробитися. З дрібних фракцій утворюється недопал вапна, який майже не гаситься, перевантажує очисне обладнання вапняних ділянок і утворює до 70 % дрібних відходів вапняних ділянок. Оскільки, найчастіше, технологічна схема очищення вапняного молока не в змозі видалити всі домішки, то виникають проблеми на ділянках виробництва глинозему, а також підвищений знос обладнання.

До того ж, дрібна фракція вапняку, утворюючи більш щільне пакування з більш великими за розміром шматками вапняку, навіть при незначному передозуванні палива може привести до утворення рідкої фази і зварювання

шихти, налипання до футеровки. Внаслідок таких явищ в печі утворюються «козли» [12].

Незважаючи на неприпустимість завантаження в піч випалювання вапняку розміром до 50 мм [8], стандарти України до тепер дозволяють випалювати вапняк розміром 30-80 мм. На переважній більшості підприємств розмір отворів на ситах відсіву вапняку становить 25-40 мм. Тому якість вапняку є основою успішного перебігу процесу отримання вапна.

Таким чином, на роботу печей випалювання вапняку впливає якість вихідного вапняку. Низька якість вапняку, що використовується для випалювання в печах, є однією з основних причин низьких показників роботи багатьох вапняних ділянок. Отже, в першу чергу необхідно покращити гранулометричний склад вапняку.

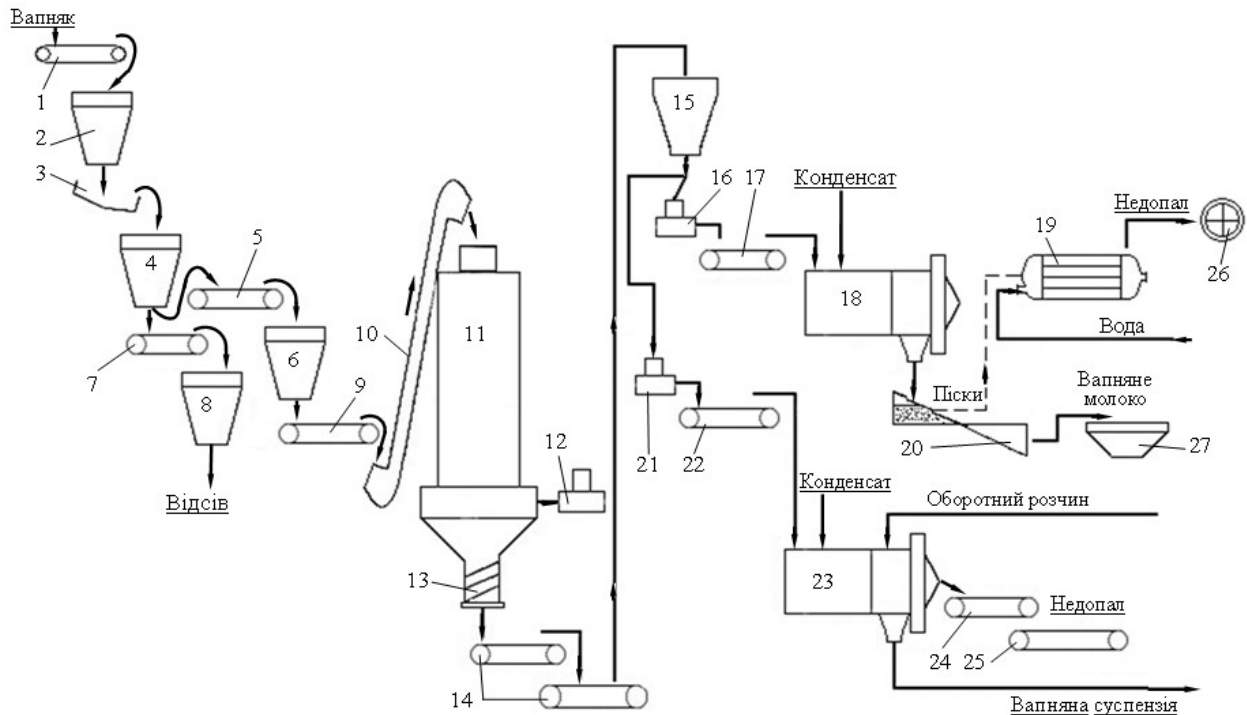
### **1.3 Технологічний процес випалювання вапняку та приготування вапновмісних розчинів**

#### **1.3.1 Технологічний процес випалювання вапняку**

Після вивантаження вапняку із залізничних вагонів вапняк грейферним краном подається в приймальний бункер вапняку (рис.1.2). З приймального бункера вапняку за допомогою лоткового живильника вапняк подається на сітку інерційного гуркоту де відбувається поділ вапняку по фракціям. Вапняк з розмірами більше 40 мм за допомогою стрічкового конвеєра надходить в видатковий бункер. Вапняк з розмірами менше 40 мм за допомогою стрічкового конвеєра транспортується в бункер відсіву звідки автотранспортом вивозиться на базисний склад бокситу [13].

Просіваний матеріал з видаткових бункерів пластинчастими живильниками подається в ковші скіпових підйомників. Скиповий підйомник по температурі газів, що відходять, автоматично завантажує матеріал в

механізм завантаження печі, який рівномірно розподіляє вапняк по її поперечному перерізі. Постійний рівень матеріалу в печі підтримується регулюванням вивантаження обпаленої вапна. Рівень матеріалу в печі контролюється за допомогою радіоізотопних датчиків і механічного рівня, сигнал яких виведений на пульт управління.



1 – грейферний кран; 2 – бункер вапняку; 3 – лотковий живильник;  
 4 – інерційний гуркіт; 5, 7, 22, 24 – стрічковий конвеєр; 6 – витратний бункер; 8 – бункер для відсіву; 9, 17 – пластинчастий живильник;  
 10 – скіповий підйомник; 11 – піч випалювання; 12 – механізм вивантаження; 13 – шлюзовий затвор; 14 – пластинчастий конвеєр;  
 15 – силос вапна; 16, 21 – дисковий живильник; 18, 23 – гаситель-репульпатор; 19 – кульовий млин; 20 – спіральний класифікатор;  
 26 – млин; 27 – збірник вапняного молока

Рисунок 1.2 – Апаратурно-технологічна схема випалювання вапняку та приготування вапновмісних розчинів

Вапняк, завантажений в піч випалювання, проходить зверху вниз через три умовно розділені технологічні зони: підігріву, випалу та охолодження.



У зоні підігріву (у верхній частині шахти) шматки вапняку, опускаючись, зустрічаються з гарячими газоподібними продуктами випалу і нагріваються ними, відбираючи теплоту відхідних газів, які охолоджуються, віддають теплоту. У зоні підігріву поперечний переріз шахти кругле, діаметром 4,3 м.

Далі вапняк надходить в зону випалювання, де відбувається реакція дисоціації за рахунок теплоти, що виділяється при спалюванні природного газу. Отримані продукти неповного згорання по жаровим каналах керна надходять в шахту печі, де зустрічаються з потоком повітря (вторинне повітря) спрямованим на охолодження вапна. Маючи чималий об'єм, ці продукти проникають глибоко в шар матеріалу і перемішуються з повітрям по всьому перетину шахти. Це призводить до згорання горючого газу по всьому об'єму зони випалювання, до усереднення температури по перетину шахти і отримання вапна з високою реакційною здатністю.

Продукти неповного згорання природного газу подаються в зону випалювання з восьми циклонних топок на двох рівнях.

Між циклонними топками встановлені периферійні пальники: на нижньому ярусі - 4 і на верхньому - 8. Природний газ надходить через сопла периферійних пальників і повністю згорає в шарі матеріалу за рахунок повітря, що надходить із зони охолодження.

Охолодження вапна здійснюється за допомогою подачі повітря в простір над кареткою механізму вивантаження вентилятором. Розрядженням, створюваним вентилятором, повітря витягується вгору назустріч матеріалу, в результаті чого матеріал охолоджується, а повітря підходить до зони випалу вже підігрітим і бере участь в реакції горіння. Чим більше нагріто це повітря, тим повніше відбувається згорання палива, що зменшує його питому витрату і покращує якість вапна, що випалюють. Продукти горіння в газоподібному вигляді, які утворилися в зоні випалу, піднімаючись, догорають, проходячи зону підігріву, і по газоходу направляються на очищення від частинок вапняку в циклони, потім потрапляють безпосередньо в димосос і видаляються в атмо-

сферу.

З печі охолоджена вапно вивантажується за допомогою вивантажувального механізму, який складається з механізму вивантаження вапна, проміжного бункера і пристрою для герметизації печей - трешлюзового затвора. Механізм вивантаження є колосниковим ґратами, укріпленими на зварений каретці, яка зворотно-поступально переміщується за допомогою опорних ковзанок. Колосники розташовані на каретці похило, мають клиноподібну форму, тому відстань між ними в напрямку від центру до країв каретки збільшується. Опорами для ковзанок є рейкові балки. По осі печі, над ґратами встановлена порожниста балка - розсікатель трикутного перетину, який сприймає частину тиску стовпа матеріалу і симетрично розподіляє його на обидві сторони решітки. Механізм вивантаження укладений в металевий кожух, забезпечений з протилежних сторін люками, які дають можливість обслуговувати і ремонтувати механізм. При зворотно-поступальному русі каретки дрібні шматки вапна провалюються в щілини між колосниками, а великі, ковзаючи по похилих колосників, зсипаються по обидві сторони решітки і через перехідну течку і шлюзовий затвор надходять на одну з двох ниток конвеєрів для транспортування вапна.

Після шлюзового затвора вапно потрапляє на два послідовних конвеєра, які подають її в залізобетонний силос ємністю 800 м<sup>3</sup> (1200 т).

### **1.3.2 Технологічний процес приготування вапняного молока**

З накопичувального силосу вапно за допомогою двох пластинчастих конвеєрів і двох дискових живильників надходить на дві технологічні нитки обладнання гасіння вапна і класифікації вапняного молока. Дисковий живильник подає вапно на пластинчастий конвеєр, далі безперервно в апарат трубчастого типу. Разом з вапном, в гаситель подається конденсат (рис.1.2). Швидкість реакції гідратації оксидів кальцію і магнію залежить від хімічного і

мінералогічного складу вапняку, якості вапна і температури конденсату.

Енергійне перемішування вапна при гасінні сприяє видаленню з поверхні зерен вапна тістоподібного шару гідрату кальцію, що перешкоджає проникненню води до внутрішніх, які не погасилися шарам. Конструкція гасителя така, що вапняне молоко через сортувальний барабан зливається в мішалку, а необпалені шматки вапняку надходять в кульовий млин, де піддаються мокрому розмелу на підшлямовій воді і відкачуються в ємність недопалу об'ємом 470 м<sup>3</sup>.

Вапняне молоко з гасителя направляється на вузол класифікації, де виробляється відокремлення піскової фракції на спіральних класифікаторах.

Вапняне молоко (злив класифікаторів) через систему мішалок і насосів відкачується в ємність вапняного молока, де усереднене вапняне молоко через розподільну гребінку відкачується споживачам.

### **1.3.3 Технологічний процес приготування вапняної суспензії**

З накопичувального силосу вапно за допомогою дискового живильника і стрічкового конвеєра через ваговий пристрій подається в гаситель-репульпатор, поділений на дві частини (рис.1.2).

У завантажувальну частину гасителя одночасно з вапном подається конденсат для отримання сухого гідратного вапна (пушонки). За допомогою витяжної системи в завантажувальній частині гасителя підтримується задане розрідження, необхідне для видалення надлишку тепла, що утворюється при гідратації вапна.

У другій частині гасителя пушонка розпулюється оборотним розчином. Новоутворена вапняна суспензія надходить в мішалку, звідки відкачується на ділянку мокрого розмелювання.

Недовипалений вапняк промивається в сортувальному барабані гасителя і двома стрічковими конвеєрами транспортується в склад вапняку, звідки

грейферним краном відвантажується на автомашину і вивозиться на базисний склад. Новоутворена після промивання слабка вапняна суспензія надходить в мішалку, а потім насосами відкачується в ємність недопалу.

#### 1.4 Фізико-хімічні основи випалювання карбонатної сировини

Розкладання карбонату кальцію (декарбонізація), що міститься у вапняку або крейді, відбувається за ендотермічною реакцією:



Теоретично на декарбонізацію 1 моля  $\text{CaCO}_3$  витрачається 179 кДж теплоти [8,9]. Для зміщення реакції вправо слід забезпечити підведення теплоти протягом всього процесу розкладання  $\text{CaCO}_3$ .

Тривалість процесу визначається також розміром шматків випалюваного вапняку. Для збільшення продуктивності печей випалювання і зниження перевитрати поверхневих шарів шматків бажано в припустимих межах зменшити їх розміри. При випалюванні шматків різних розмірів режим процесу визначають за часом, необхідним для випалювання шматків середнього розміру.

На рис.1.3 наведено залежність рівноважного тиску вуглекислого газу ( $P_{\text{CO}_2}$ ) над поверхнею  $\text{CaCO}_3$  від температури, з якої видно, що до температури 600-900 °С тиск збільшується незначно, а потім починає різко зростати.

В умовах печей випалювання вапняку максимальний середній парціальний тиск  $\text{CO}_2$  досягає в пічних газах 0,04 МПа. Рівноважний тиск  $\text{CO}_2$  досягає такої величини за температури близько 800 °С. Ця температура відповідає початку термічного розкладання  $\text{CaCO}_3$  (на поверхні шматків вапняку та при малих інтенсивностях випалювання). Однак для досягнення необхідної інтенсивності процесу і високого ступеню дисоціації температуру випалювання вапна в печах підтримують в інтервалі 1100-1200 °С.

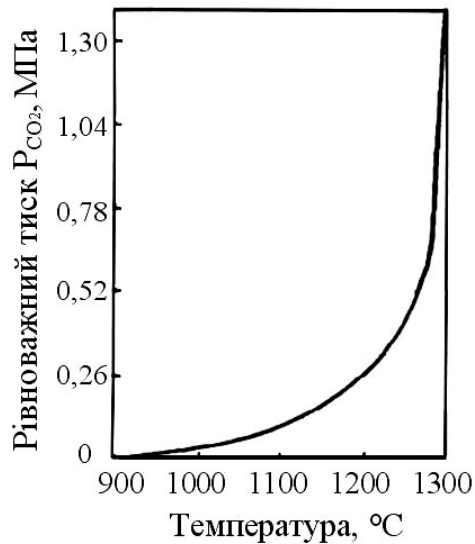
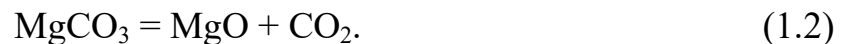


Рисунок 1.3 – Залежність рівноважного тиску вуглекислого газу над поверхнею CaCO<sub>3</sub> від температури

Залежно від ступеня дисперсності кристалів CaO і CaCO<sub>3</sub> тиск CO<sub>2</sub> може змінюватися. Великі кристали CaO прагнуть до зростання за рахунок дрібних, тому при різних співвідношеннях розмірів кристалів CaO і CaCO<sub>3</sub> можна отримати кілька залежностей  $P_{CO_2} = f(T)$ . Тонкодисперсні зразки розкладаються за температури 882-895 °C, крупнокристалічні зразки – при температурі 911-921 °C. Вапняки, зазвичай розкладаються при температурі 890-916 °C [8,9].

В процесі випалювання карбонатної сировини розкладається також і карбонат магнію, який зазвичай міститься у вапняках та крейді в кількості 0,5-3 %:



Однак, розкладання протікає при більш низькій температурі, ніж дисоціація карбонату кальцію, в інтервалі 402-480 °C [9]. Розкладання MgCO<sub>3</sub> посилюється при нагріванні сировини приблизно до 700 °C. Оксид магнію менш активний порівняно з оксидом кальцію, тому в умовах роботи вапняних печей MgO мало взаємодіє з домішками шихти, золою палива і футеровкою.

Кінетика процесу дисоціації CaCO<sub>3</sub> залежить від температури і ступеню зміщення системи від рівноважного стану. Лімітуючою стадією процесу

дисоціації є утворення кристалічних зародків CaO [8]. На швидкість дисоціації шматків карбонату кальцію істотно впливає процес теплопередачі, оскільки теплота фазового переходу за температури 900 °C становить 2,93 МДж/кг CaO.

Встановлено, що температура газового середовища  $t_r$  і вміст діоксиду вуглецю  $C_{CO_2}$  (% (об.)) впливають на температуру  $t_{дис}$  дисоціації CaCO<sub>3</sub>. Цей вплив описується рівняннями:

– при випалюванні крейди в інтервалі  $924 < t_r < 1213$  °C і при  $CO_2 < 35$  %:

$$t_r = 618 + 0,235t_r + 0,67C_{CO_2}, \quad (1.3)$$

– при випалюванні вапняку в інтервалі  $1025 < t_r < 1214$  °C і при  $CO_2 < 100$  %:

$$t_{дис} = 740 + 0,148t_r + 0,13C_{CO_2}, \quad (1.4)$$

Зміну середньої швидкості просування фронту дисоціації при випалюванні шматків крейди циліндричної форми (радіус = висота = 80 мм, лінія 1) і шматків вапняку неправильної форми (еквівалентний діаметр від 30 мм до 70 мм, лінія 2) показано на рис.1.4.

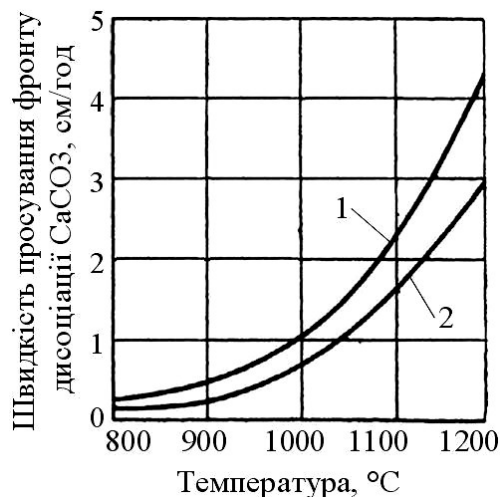


Рисунок 1.4 – Швидкість просування фронту дисоціації карбонату кальцію під час випалювання крейди (1) і вапняку (2) за різних температур

З цих даних випливає, швидкість просування фронту дисоціації у крейди вища, ніж у вапняку. Це можна пояснити тим, що крейда більш пориста, а

також тим, що температурний перепад між газовим потоком і реакційною зоною для карбонатних порід різного ступеня дисперсності неоднаковий.

При випалюванні карбонатної сировини одночасно з реакціями розкладання карбонатів кальцію і магнію протікає ряд побічних шкідливих реакцій: взаємодія утворення сполук оксиду кальцію з оксидами силіцію, алюмінію, заліза. Останні містяться у вигляді домішок у сировині, а також входять до складу золи палива та вогнетривкої цегли, яка застосовується для футеровки печі. Утворюються побічні сполуки, які не можуть бути використані для отримання вапнякового молока і знижують ефективність випалювання.

Сульфат кальцію  $\text{CaSO}_4$  в основному впливає на процес випалу вапна, зменшуючи температуру утворення рідкої фази. Домішка сульфату кальцію негативно впливає також і на процес гідратації вапна, сильно сповільнюючи його.

Оксид магнію добре розчиняється в розплаві і помітно знижує температуру плавлення рідкої фази, що підвищує вірогідність конгломератів випаленого вапна та «козлів».

Водяні пари впливають на процес дисоціації  $\text{CaCO}_3$  понижених температурах (650-750 °C). Водяна пара адсорбується на поверхні кристалів, полегшуючи вихід активованих іонів за межі кристалічної решітки. При високих температурах випалу (понад 1000 °C) присутність водяної пари не надає каталітичної дії на процес дисоціації.

Оксид кальцію, що входить до складу вапна, може бути у вигляді вільного (активного чи неактивного) або зв'язаного, тобто такого, який вступив у взаємодію із домішками і утворив нові сполуки – це безповоротні втрати  $\text{CaO}$ .

Неактивний  $\text{CaO}$  утворюється внаслідок структурних змін під впливом високих температур, а також за рахунок обволікання зерен  $\text{CaO}$  плівкою плава, який з'являється при взаємодії  $\text{CaO}$  з домішками. При цьому посилюється хімічна взаємодія  $\text{CaO}$  з футеровкою печі, що прискорює її руйнування. При підвищенні температури вище допустимої може статися утворення більш або

менш великих мас спікшихся шматків вапна («козли»), що порушує режим роботи печі.

В табл.1.2 наведено розрахункові величини виходу вільного вапна залежно від якості вапняку.

Таблиця 1.2 – Розрахункові величини виходу вільного вапна залежно від якості вапняку

Найменування показника	Вид вапняку	
	стандартний	«дешевий»
Вміст CaCO <sub>3</sub> , не менше % маси сухих речовин	93	75
Вміст MgCO <sub>3</sub> , не більше % маси сухих речовин	2,5	2,5
Ступінь випалювання, %	95	90
Питома витрата палива, кг/кг CaO	0,175	0,175
Зольність палива, %	10	30
Механічний недопал, %	8	8
Розрахунковий вихід вільного CaO, %	80,67	52,96

Із даних таблиці 1.2 випливає, що використання більш дешевого вапняку із меншим вмістом карбонату кальцію та більшою кількістю домішок може призвести до значного, майже в 1,5 рази падіння фактичної продуктивності печі за величиною вільного вапна. При цьому витрати такого «дешевого» вапняку зростають в 1,5-2 рази, а в той же час активного вапна може не вистачати для технологічних потреб.

Умовно можна вважати, що кожен 1 кг домішок, що завантажується в піч як забруднення, так і у складі компонентів вапняку або палива зв'язує 1 кг випаленого вапна.

### 1.5 Печі для випалювання вапняку

Вапняк і крейду випалюють в шахтних або обертових печах. Вибір типу печі для випалювання визначається продуктивністю ділянки випалювання, фізико-хімічними властивостями і хімічним складом вапняних або вапняно-магнезійних карбонатних порід, видом палива і потрібною якістю вапна.



### 1.5.1 Шахтні печі для випалювання вапняку

У шахтних печах випалюють тверді породи вапняку вузької за розмірами шматків фракції. Міцність вапняку повинна бути не менше 30 МПа. В шахтних печах не випалюють карбонатні породи, що схильні до розтріскування при нагріванні, а також вапняки, що схильні до утворення в печі спеків.

Перевагами шахтних печей є відносно низька витрата палива; компактне розміщення печі на невеликій площі; високий ступінь випалювання (95-98 %); тривалий термін роботи футеровки (до 8 років). До недоліків слід віднести необхідність використання вузької фракції вапняку; підвищені вимоги до якості вапняку. Шахтні печі мають продуктивність від 40 т/добу до 250 т/добу [7-9].

Більшість виробників раніше випускали вапно III сорту з активністю 70-75 % і залишковим вмістом  $\text{CO}_2$  6-10 %. Проте тепер вимоги до якості вапна підвищилися. Багато зарубіжних виробників пропонують економічні шахтні печі, що дозволяють отримати вапно I і II сортів із залишковим вмістом  $\text{CO}_2$  1,5-2,5 % (активність 85-95 %). Крім того, для різних споживачів потрібен різний час гасіння. Тому можливість регулювати повноту випалювання і час гасіння (реактивність) вапна є важливою перевагою сучасних печей випалювання (табл.1.3).

За останні десятиліття деякі виробники вапна придбали сучасні шахтні печі західних компаній, таких як Maerz, Cimprogetti, SiC, Terruzzi Fercalx і ін. [11,14-16]. Ці печі характеризуються низькою витратою палива, високою якістю продукції. Однак вартість зведення таких печей в кілька разів перевищує номінальну вартість сучасних шахтних печей російського виробництва. Багато підприємств пішли по шляху реконструкції існуючих шахтних печей і отримали результати, які можна порівняти із західними технологіями при значно менших витратах.

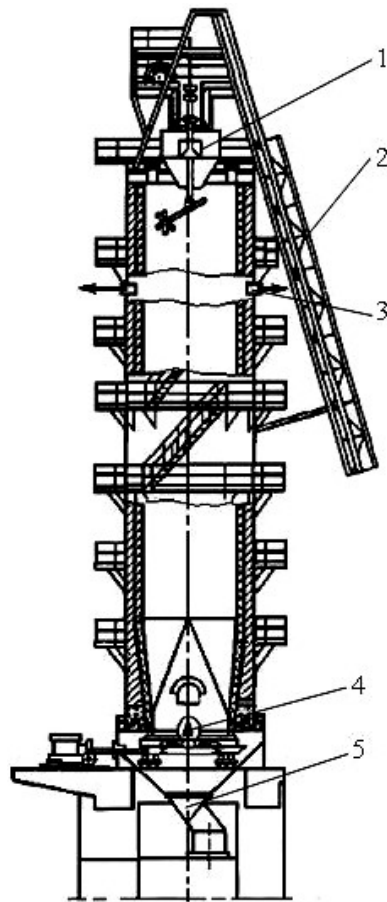
Шахтна піч випалювання вапняку являє собою вертикальну шахту із сталевим кожухом, в якому розміщено багат шарова футеровка. Піч має

завантажувально-розподільні та вивантажувальні пристрої. Вапняк подається у завантажувально-розподільний пристрій, розташований у верхній частині шахти печі, за допомогою скіпового підйомника (рис.1.5).

Таблиця 1.3 – Характеристика шахтних вертикальних печей випалювання [15]

Характеристики	Продуктивність, т/доб.			
	50	100	150	200
Діаметр печі, м:				
зовнішній	3,2	4,5	,8	5,7
внутрішній	2,0	3,2	3,6	4,4
Висота шахти печі, м:				
загальна	20-22	20-22	20-24	22-24
від розвантажувального квадрата до нижнього яруса	4-6	4-6	4-6	4-6
між нижнім і верхнім ярусами ПГ	–	2-3	2-3	2-3
від верхнього яруса ПГ до нижнього зрізу газовідводу	8-10	10-12	10-12	10-12
від газовідводу до верхньої кришки печі	3-4	2,5-3	2,5-4	2,5-4
Будівельна висота печі, м	34	37	37	37-40
Питома витрата газу, м <sup>3</sup> /т	115-130	110-125	120-130	120-130
Температура вапна на вивантаженні, °С	80	120	120	120
Температура газів, що відходять, °С	180-200	180-230	180-230	180-230
Активність вапна (СаО + МgО), %	87-91	86-89* 82-84**	–	–
Остаточний вміст СО <sub>2</sub>	2,5-3,0	3,0-3,5	–	–
Примітка: * Вапняк родовища 1 ** Вапняк родовища 2				

Завантажувально-розподільний пристрій повинен забезпечувати надійну герметизацію шахти і рівномірність розподілу вапняку та палива по її горизонтальному перетину. Пічний газ відбирається з верхньої частини печі, в результаті створюється розрідження, необхідне для підсосу повітря через вивантажувальний пристрій в кількості, необхідній для згоряння при заданій продуктивності печі. Процес випалювання вапняку протікає при температурі 1000-1200 °С, тому шахту печі футерують вогнетривкою цеглою, а для зменшення втрат тепла між сталевим кожухом печі і вогнетривкою футеровкою розміщується шар теплоізоляції.



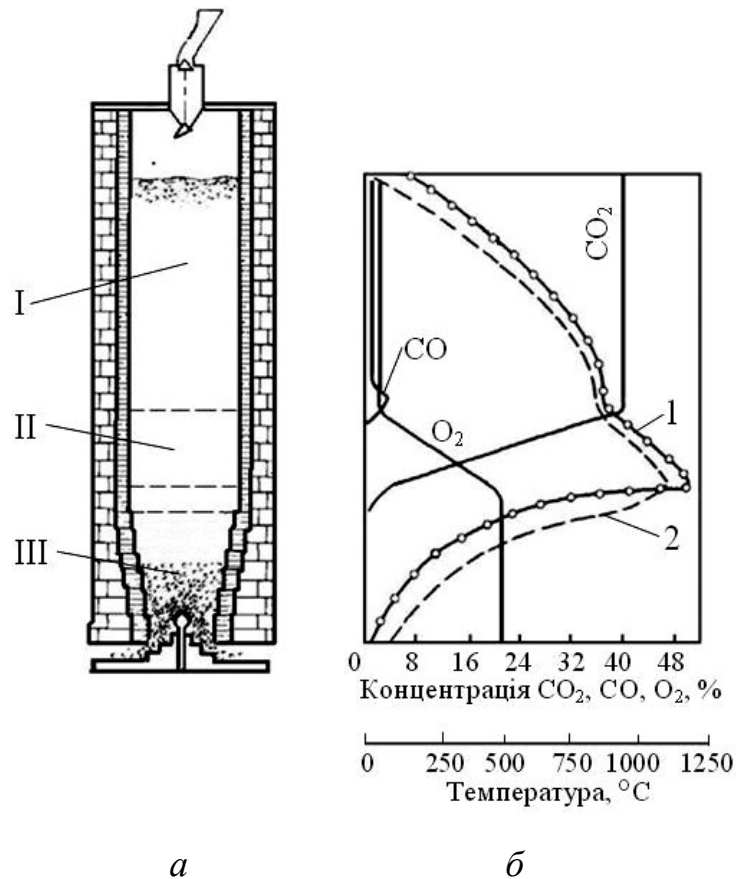
1 – завантажувальний пристрій; 2 – скіпова дорога; 3 – димовідвод;  
4 – центральна пальник; 5 – вивантажувальний пристрій

Рисунок 1.5 – Шахтна піч випалювання вапняку

До конструкції вивантажувального пристрою висувають вимоги рівномірності відбору вапна по всьому перетину печі. При цьому необхідно витримувати заданий темп як за часом, так і за перерізом шахти, а також забезпечуватися рівномірність введення повітря по перерізу шахти.

Завантаження вапняку в піч здійснюється автоматично за спеціальним алгоритмом, що дозволяє підтримувати постійний рівень матеріалу в печі і витримувати рівномірне завантаження вапняку. У печі вапняк повільно проходить через різні зони шахти, поступово перетворюючись в вапно. Умовно можна виділити три зони (рис.1.6, а): зона завантаження і попереднього нагріву вапняку; зона випалювання вапняку; зона охолодження і вивантаження вапна.

У верхній частині завантажувальної зони розміщений димовідвод, через який з осової зони печі віддаляються відпрацьовані гази. Завдяки спеціальній конструкції димоходу дотримується симетричний профіль руху димових газів і зменшується вплив пристенного ефекту. Тому гарячі відпрацьовані гази рівномірно піднімаються по всьому поперечним перерізом печі, забезпечуючи рівномірний випал вапняку.



*a* – схема розташування теплообмінних зон в шахтній печі; *б* – температура і склад газу по висоті печі

Рисунок 1.6 – Змінення температури газу (1) і матеріалу (2), складу газу по висоті печі [7]

У зоні попереднього нагріву, розташованої вгорі печі, вапняк нагрівається від висхідного потоку гарячих газів і надходить в зону випалу нагрітим до 900-950 °С. Температура димових газів залежно від випалюваної фракції і висоти шахти становить 180-230 °С.

У зоні випалювання встановлено два яруси периферійних пальників по 8-12 пальників в кожному ярусі, захищених фурмами і винесеними всередину печі. Через пальники паливо і повітря для горіння подаються в шар вапняку. Повітря подається в недостатній кількості, необхідній тільки для охолодження фурм, тому повне згоряння палива відбувається всередині шару вапняку.

Усередині футерування встановлені датчики розрідження і температури, які реєструють інтенсивність випалу і забезпечують безпеку управління піччю.

Після проходження зони кальцинації вапно надходить в зону охолодження, в якій холодне повітря, що йде знизу печі, охолоджує вапно.

Вивантаження вапна здійснюється за рахунок зворотно-поступального руху колосникових грат. Живий перетин решітки і розміри вивантажувальних вікон підбираються виходячи з фракції вапняку і гранулометричного складу виробленого вапна. Вапно вивантажується в приймальний бункер, який розвантажується автоматично або оператором у міру його заповнення.

Однак експлуатація шатної печі випалювання вапняку вимагає від персоналу строго слідувати технологічній інструкції, не порушувати режим. Основні помилки при експлуатації шахтних печей:

- подача повітря в піч в надмірній кількості;
- незадовільна якість матеріалу, що завантажується, що сприяє утворенню зварити в печі (велика кількість дрібниці, піску в сировину, відсутність розподілу вапняку при завантаженні);
- неправильний розподіл газу по пальникових пристроїв;
- несиметрична вивантаження матеріалу з печі.

Правильна експлуатація печі дозволяє випускати вапно високої якості при мінімальній витраті палива.

Шахтні печі з балочними пальниками, а також печі з встановленим всередині шахти керном [17] дозволяють домогтися більш рівномірного розподілу температури по перетину печі і отримати вапно більш високої якості. Конструкція цих печей є предметом окремого розгляду.

### 1.5.2 Обертові печі для випалювання вапняку

Обертові (роторні) печі дозволяють випалювати карбонатні породи, які неможливо випалити в шахтних печах. Безперечною перевагою обертових печей є можливість отримання вапна зі стабільною і високою якістю (активність 92-96 %, залишковий  $\text{CO}_2$  у вапні менше 2 %).

Залежно від властивостей вихідної сировини використовуються довгі або короткі обертові печі. Довгі обертові печі мають відношення довжини барабана  $L$  до діаметру  $D$  (в світлі) в межах 35-40. Короткі печі працюють з запеченими теплообмінниками і мають відношення  $L / D = 14-20$ . У табл.1.4 надано розміри і характеристики коротких печей, забезпечених теплообмінниками.

Таблиця 1.4 – Характеристика коротких обертових печей [15]

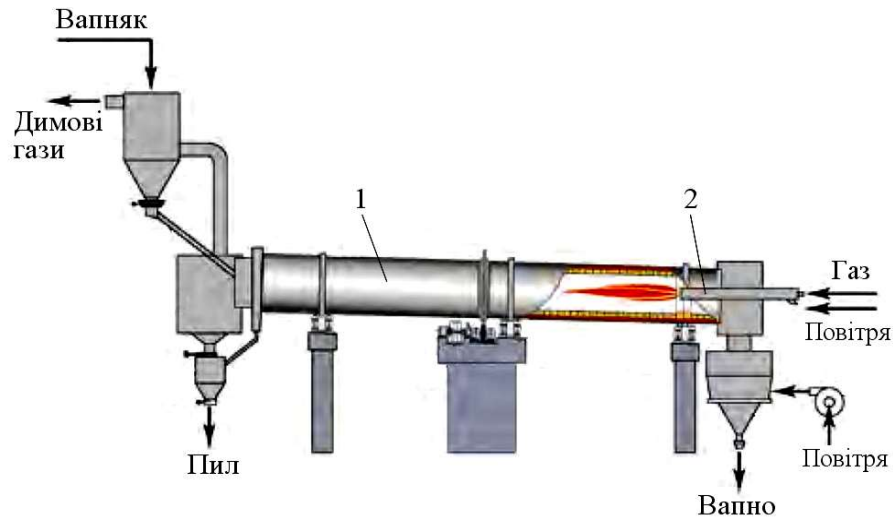
Характеристика	Показник					
	150	250	350	600	800	1000
Продуктивність печі, т/доб.						
Розміри барабана, м:						
діаметр	2,5	3,0	3,5	4,0	4,3	4,8
довжина	40	46	54	60	64	68

У довгих печах (довжина 75-150 м) випалюють маломіцну карбонатну сировину, що містить велику кількість дрібних фракцій з вологістю до 40 %. У коротких печах (довжина барабана 40-70 м) обпалюють вапняки у вигляді вузьких фракцій: 0,1-2 мм; 10-20 мм; 20-40 мм з вологістю до 8 % [17-21].

Температура матеріалу в печі не перевищує 1200 °С і залежить від виду випалюваної сировини. Температура газового середовища вище температури випалюваного матеріалу на 250-300 °С.

Схема короткої протитечійної обертової печі [15] надана на рис.1.7. Піч складається з обертового барабана, шахтного теплообмінника для підігріву сировини і охолоджувача вапна, газового пальника, газоочисного устаткування (циклонів, фільтра для очищення димових газів), димососа і дуттєвих вентиляторів для охолодження вапна і обладнання.

Надана на рис.1.7 піч призначена для випалу фракціонованого вапняку.



1 – барабан; 2 – пальник

Рисунок 1.7 – Коротка протитечійна обертова піч [15]

Підготовлений вапняк фракції 20-50 мм з бункера завантажується в протитечійний шахтний підігрівач. Гази, що відходять з печі з температурою 850-950 °С, надходять в пилову камеру і далі в підігрівач, де нагрівають шар вапняку до температури 700-800 °С. Теплообмін здійснюється в протитечії між вапняком і газами. Після підігрівача гази з температурою 360-370 °С надходять на газоочищення. Далі нагрітий вапняк по похилій тічці самопливом надходить в завантажувальний вузол обертової печі. У тічці є вузол відсіву, при проходженні якого з потоку видаляється пил, що утворився в підігрівачі, і дрібний (до 5 мм) вапняк. За відвідною тічкою відсіву надходить в пилову камеру і далі через клапан-мигалку в бункер, з якого автотранспортом відправляється на утилізацію або споживачеві. У обертовій печі вапняк рухається в протитечії з димовими газами, перетворюючись в вапно. Випалене вапно з печі через гарячу головку вивантажується в шахтний охолоджувач, де охолоджується до температури 50-80 °С. При горінні палива утворюються димові гази з температурою 370 °С, яка істотно вища, ніж у шахтних печах. Крім того, втрати тепла в обертових печах через корпус барабана в 10 разів вищі, ніж у шахтних, і складають приблизно 8-12 кВт/м<sup>2</sup>, а температура обичайки може досягати 320-370 °С в зоні випалювання.

У довгих обертових печах, незважаючи на розміщення всередині барабана теплообмінних пристроїв, втрати тепла з димовими газами і через корпус печі ще вищі. Тому питома витрата тепла в таких печах найвища. Однак високі витрати на паливо в довгих печах частково компенсуються низькою вартістю сировини.

*Висновки.* На підставі теоретичних досліджень для випалювання вапняку в виробництві глинозему доцільно використовувати шахтні печі. Визначено, що низька якість вапняку, що використовується для випалювання в печах, є однією з основних причин низьких показників роботи багатьох вапняних ділянок. Використання більш дешевого вапняку із меншим вмістом карбонату кальцію та більшою кількістю домішок може призвести до значного, майже в 1,5 рази падіння фактичної продуктивності печі за величиною вільного вапна. Отже, в першу чергу необхідно покращити гранулометричний склад вапняку.

Завдання експериментального дослідження:

1. Дослідити термодинаміку і механізм випалювання карбонатної сировини.
2. Дослідити термодинаміку і механізм гасіння вапна
3. Дослідити конструкції завантажувальних і вивантажувальних пристроїв шахтних печей випалювання та вибрати напрями реконструкції діючих у виробництві печей випалювання вапняку.
4. Дослідити вплив умов випалювання вапняку на якість отриманого вапна і вапняного молока.
5. Вибрати напрями реконструкції діючих у виробництві глинозему печей випалювання вапняку і вдосконалення технології випалювання вапняку.



## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Характеристики вихідних матеріалів і обладнання

Для досліджень використано вапняк, гранулометричний склад якого наведено в табл. 2.1. Хімічний склад вапняку, %: 54,2 CaO; 0,5 MgO; 1,32 SiO<sub>2</sub>; 0,39 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,65 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,04 Na<sub>2</sub>O; 0,03 K<sub>2</sub>O; 0,04 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; 42,7 в.п.п.

Таблиця 2.1 – Гранулометричний склад вапняку

Показник	Величина				
Діапазон розмірів частинок фракцій вапняку, мм	понад 100	80-100	60-80	40-60	до 40
Масова частка фракції, %	6,0	16,7	34,7	33,2	9,4

На розмелювання бокситу в оборотний розчин додають 3-5 % випаленого вапна, активність якого не перевищує 85 %. Неактивне вапно в основному представлено недопалом у вигляді CaCO<sub>3</sub> і продуктами реакції взаємодії вапна з компонентами, присутніми в вапні: CaSO<sub>4</sub>, 2CaO·SiO<sub>2</sub>, CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Для підготовки вапняку і проведення випалювання використовуються шахтна електропіч; сушильна шафа; спектрометр Mastersizer (рис.2.1); лабораторна дробарка; набір сит; ступка; набір плавильного інструмента; конічна колба місткістю 250 мл; 1% спиртовий розчин фенолфталеїна; 1 н. розчин соляної кислоти. Ваги лабораторні електронні ТВЕ-3-0,05 за ТУ У 29.2-32126739-003:2005 з похибкою зважування до ± 0,01 г.

### 2.2 Методика випалювання вапняку та гасіння вапна

Підготовка матеріалу до випалу. Вихідну сировину (вапняк) подрібнюють у ступці і просівають на ситах. Для випалювання відбирають частинки розміром від 40 мм до 80 мм.



Рисунок 2.1 – Сушильна шафа (а) і спектрометр Mastersizer (б)

*Випалення вапна.* Наважку 200 г поміщають у тигель і опускають у шахтну піч. Випал проводять при температурі 1300 °С протягом 60 хв. По завершенні процесу піч відключають і охолоджують. Після охолодження печі виймаємо тигель з випаленим вапном. Зважуємо випалене вапно.

*Гашення вапна.* Гашення вапна відбувається додаванням до випаленого вапна води у співвідношенні 1:2 за реакцією:



Для визначення густини вапняного тіста при гашенні порцелянову чашку з гашеним вапном поставити в піч і випарювати до появи тріщин на поверхні суміші. По закінченні процесу випарювання зважити і обчислити об'єм отриманого тіста.

Густину одержаного вапняного тіста визначають за формулою:

$$\rho = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 10^{-3}}{V_1}, \quad (2.2)$$

де  $\rho$  – густина вапняного тіста, кг/см<sup>3</sup>;

$m_1$  – маса чашки з гашеним вапном після сушіння, г;

$m_2$  – маса чашки, г;

$V_1$  – об'єм тіста, см<sup>3</sup>.

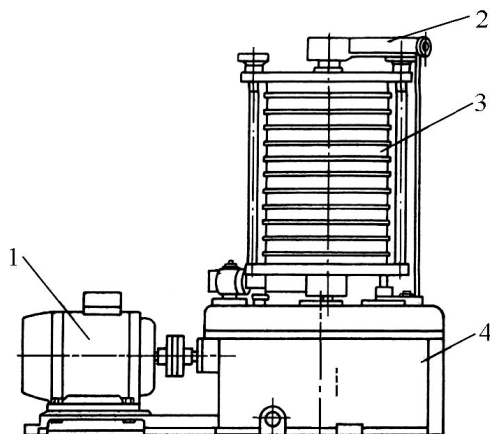
*Визначення кількості зерен, які не погасились.* До таких зерен відносяться домішки піску, залишки CaCO<sub>3</sub> (недопал), оксид кальцію CaO, що осклянів (перепал). Гашене вапно масою 5 г після визначення виходу тіста розбавити



### 2.3 Методика визначення гранулометричного складу частинок вапна

Для визначення гранулометричного складу наважку вапна ( $500 \pm 1$  г) просівають через набір стандартних сит (з піддоном), вставлених одне в одне в послідовності, що відповідає зменшенню діаметрів отворів.

Фраціонування проводять на струшуючому пристрої типу “Ротап” (рис.2.2), що працює за принципом обертового руху зі швидкістю обертання  $300 \pm 15$  хв<sup>-1</sup> при одночасному струшуванні з рівномірною частотою  $180 \pm 10$  у хвилину. Час закінчення розсіювання досягається в момент, коли кількість вапна, що проходить протягом однієї хвилини через сито, що затримує найбільшу його масу, змінюється менше, ніж на 0,1 % маси проби для дослідження.



- 1 – електродвигун; 2 – куліса; 3 – набір сит;  
4 – корпус з вмонтованим редуктором

Рисунок 2.2 – Пристрій типу “Ротап” для розсіювання порошків на фракції

Після розсіювання кожену фракцію вапна, що знаходиться на ситі з отворами певного розміру (100, 80, 60, 40, 15 мм), висипають із сит, починаючи із сита з найбільшими отворами. Вапно із сита обережно струшують на один бік і пересипають на глясвий папір. Вапно, що пристало до сітки або рамки сита, обережно протирають м’якою щіточкою через сітку в наступне сито з меншими

отворами. Фракцію, висипану на глянсовий папір, зважують із точністю до 0,05 г. Зважування повторюють для кожного сита і піддона. Сума мас всіх фракцій вапна повинна складати не менше 98 % маси проби для випробування.

Масову частку фракцій, що залишилися на кожному ситі, і фракції, яка залишилася на піддоні,  $X$  (%) обчислюють із точністю до 0,1 % за формулою:

$$X = (m_n / m) \cdot 100, \quad (2.5)$$

де  $m_n$  – маса даної фракції вапна, г;

$m$  – сума мас всіх фракцій вапна, г.

Результати аналізу записують у табл. 2.2, причому масову частку фракцій до 0,1 %, записують словом “сліди”.

Таблиця 2.2 – Гранулометричний склад вапна

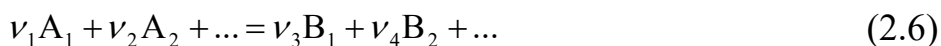
Номер сита	Діапазон розмірів частинок фракцій вапна, мм	Маса фракції вапна, г	Масова частка фракції вапна, %

## 2.4 Методика проведення термодинамічних розрахунків

Хімічна взаємодія супроводжується виділенням або поглинанням теплоти. Кількість теплоти, яка виділяється або поглинається в ході хімічної реакції при заданій температурі початкових речовин і продуктів реакції, називається тепловим ефектом.

Для розрахунку енергії Гіббса запропоновано два методи: ентропійний і розрахунок по рівнянню Гіббса-Гельмгольца. Розрахунок константи рівноваги також можна проводити, використовуючи рівняння нормального хімічного засобу і рівняння ізобари хімічної реакції. У всіх випадках розрахунок може бути точним і наближеним. Допускається три наближення: перше наближення:  $\Delta C_p = 0$ ; друге наближення:  $\Delta C_p = \text{const}$ ; третє наближення:  $\Delta C_p = f(T)$ .

Стандартну зміну ентальпії  $\Delta H_{298}^0$  реакції, що досліджується,



визначають, використовуючи закон Гесса, за стандартними змінами ентальпій речовин  $\Delta H_{298}^0$  [32, 33]:

$$\Delta H_{298}^0 = \sum (v_i \Delta H_{298, B_i}^0)_{\text{кін}} - \sum (v_i \Delta H_{298, A_i}^0)_{\text{поч}}. \quad (2.7)$$

По знаку  $\Delta H_{298}^0$  визначають характер вірогідності хімічної реакції за температури  $T = 298$  К. Якщо  $\Delta H_{298}^0 > 0$ , реакція вважають ендотермічною, якщо  $\Delta H_{298}^0 < 0$ , реакція вважають екзотермічною.

Аналогічно розраховують стандартні зміни ентропії  $\Delta S_{298}^0$  реакції:

$$\Delta S_{298}^0 = \sum (v_i S_{298, B_i}^0)_{\text{кін}} - \sum (v_i S_{298, A_i}^0)_{\text{поч}}. \quad (2.8)$$

Зміну стандартної енергії Гіббса даній хімічній реакції розраховують по ентропийному методу:

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - \Delta S_T^0 \cdot T. \quad (2.9)$$

У першому наближенні, приймаючи, що  $\Delta C_p = 0$ , рівняння (2.6) приймає вид:

$$\Delta G_{298}^0 = \Delta H_{298}^0 - \Delta S_{298}^0 \cdot T, \quad (2.10)$$

де  $T = 298$  К.

По знаку  $\Delta G_{298}^0$  визначають напрям хімічної реакції при  $T=298$  К і  $P=10^2$  кПа. Якщо  $\Delta G_{298}^0 < 0$ , то реакція протікає мимовольно зліва направо; якщо  $\Delta G_{298}^0 > 0$ , напрям реакції зворотній. Якщо  $\Delta G_{298}^0 = 0$ , реакція знаходиться в стані рівноваги.

Абсолютна величина  $\Delta G_{298}^0$  показує ступінь видалення реакції від стану рівноваги за стандартних умов.

Залежність ізобарної теплоємності від температури в довідниках термодинамічних величин звичайно задається рівняннями типу для неорганічних речовин:

$$C_p^0 = a + v \cdot 10^{-3} T + c \cdot 10^{-5} T^{-2}, \quad (2.11)$$

для органічних речовин

$$C_p^0 = a + v \cdot 10^{-3} T + q \cdot 10^{-6} T^2. \quad (2.12)$$

Зміну теплоємності речовин в хімічній реакції розраховують, використовуючи закон Гесса:

$$\Delta C_p^0 = \sum (v_i C_{p,B_i})_{\text{кін}} - \sum (v_i C_{p,A_i})_{\text{поч}}, \quad (2.13)$$

яке приймає вид:

$$\Delta C_p^0 = \Delta a + \Delta b \cdot 10^{-3} T + \Delta c \cdot 10^5 T^{-2}$$

або

$$\Delta C_p^0 = \Delta a + \Delta b \cdot 10^{-3} T + \Delta q \cdot 10^{-6} T^2.$$

Підставляючи значення  $T=298$  К, знаходимо стандартну зміну теплоємності для даної хімічної реакції.

Залежність зміни ентальпії і ентропії від температури виражається рівняннями:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^{T_{\text{ф.пер}}} \Delta C_p' dT \pm \Delta H_{\text{ф.пер}} + \int_{T_{\text{ф.пер}}}^T \Delta C_p'' dT; \quad (2.14)$$

$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^{T_{\text{ф.пер}}} \frac{\Delta C_p' dT}{T} \pm \frac{\Delta H_{\text{ф.пер}}}{T_{\text{ф.пер}}} + \int_{T_{\text{ф.пер}}}^T \frac{\Delta C_p'' dT}{T}, \quad (2.15)$$

де  $T_{\text{ф.пер}}$  – температура фазових перетворень, К;

$\Delta H_{\text{ф.пер}}$  – зміна ентальпії при фазових перетвореннях, Дж;

$\Delta C_p'$  та  $\Delta C_p''$  – зміни теплоємності для хімічних реакцій до і після фазових перетворень речовин, що реагують, Дж/(моль·К).

Якщо фазових переходів немає або їх не враховують, ці формули спрощуються, маючи тільки по два перші члени рівнянь.

По другому наближенню, приймаючи, що  $\Delta C_p = \text{const} = \Delta C_{p,298}^0$ , проводимо розрахунок  $\Delta H_T^0$  і  $\Delta S_T^0$  для всіх вказаних в завданні температур;  $\Delta G_T^0$  – розраховуємо для тих же температур; розрахунок  $\lg K_p$  і  $K_p$  – по рівнянню нормальної хімічної спорідненості. Точніші значення величин  $\Delta H_T^0$ ,  $\Delta S_T^0$ ,  $\Delta G_T^0$ , а також  $\lg K_p$  і  $K_p$  одержують при розрахунку по третьому наближенню, коли  $\Delta C_p = f(T)$ . Тоді, в рівняння для розрахунку залежностей  $\Delta H_T^0$  і  $\Delta S_T^0$  від температури підставляють значення:

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot 10^{-3} T + \Delta c \cdot 10^5 T^{-2} \quad (2.16)$$

або

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot 10^{-3} T + \Delta g \cdot 10^{-6} T^2 \quad (2.17)$$

Наближеними і точними методами можна провести розрахунок за рівнянням Гіббса-Гельмгольца:

$$\Delta G_T^0 = -T \int \frac{\Delta H_T^0}{T^2} dT + BT, \quad (2.18)$$

де  $B$  – стала інтегрування.

Для першого наближення ( $\Delta C_p^0 = 0$ ) використовують стандартну зміну ентальпії  $\Delta H_{298}^0$ , енергії Гіббса  $\Delta G_{298}^0$  і стандартну температуру 298 К:

$$\Delta G_{298}^0 = -298 \int \frac{\Delta H_{298}^0}{298^2} dT + B \cdot 298, \quad (2.19)$$

Після визначення постійної інтегрування  $\Delta G_T^0$  розраховують при всіх вказаних в завданні температурах, а також  $\lg K_{p_T}$  і  $K_{p_T}$ .

Для другого наближення в рівняння Гіббса-Гельмгольца вводиться значення, що розраховується за рівнянням:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_{p_{298}}^0 dT = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{p_{298}} (T - 298). \quad (2.20)$$

Розраховують постійну інтеграції, визначають значення  $\Delta G_T^0$  при різних температурах, а потім  $\lg K_{p_T}$  і  $K_{p_T}$ .

Для третього наближення в рівняння залежності ентальпії від температури вводять багаточлен  $\Delta C_p = f(T)$ , а після визначення постійної інтеграції при  $T = 298$  К розраховують  $\Delta G_0$ ,  $\lg K_{p_T}$  и  $K_{p_T}$  відповідно.

Розрахунок можна проводити за рівнянням ізобари хімічної реакції:

$$\ln K = -\frac{\Delta H_T^0}{RT^2} dT + B \quad \text{або} \quad \lg K = -\frac{\Delta H_T^0}{T^2} dT + B.$$

Розрахунки проводять також в першому наближенні ( $\Delta C_p = 0$ ,  $\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0$ ), другому наближенні ( $\Delta C_p = \Delta C_{p,298}$ ,  $\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_p (T - 298)$ ), третьому наближенні, для розрахунку  $\Delta H_T^0$  використовують  $\Delta C_p = f(T)$  [23,24].



### 3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

#### 3.1 Дослідження термодинаміки і механізму випалювання карбонатної сировини і гасіння вапна

В дослідженні розглянуто основні реакції, які відбуваються під час випалювання карбонатної сировини. Розкладання карбонату кальцію (декарбонізація), що міститься у вапняку або крейді, відбувається за ендотермічною реакцією:



В процесі випалювання розкладається також і карбонат магнію, який зазвичай міститься у вапняках та крейді в кількості 0,5-3 %:



Однак, розкладання протікає при більш низькій температурі, ніж дисоціація карбонату кальцію, в інтервалі 402-480 °C [9].

Для дослідження термодинамічних характеристик реакцій випалювання ) вибрано температурний діапазон 273-1573 К з інтервалом в 100 градусів. Розрахунок виконано з використанням електронних таблиць Microsoft Excel та перевірено на програмі HSC. Розрахунок термодинамічних характеристик виконано з урахуванням фазових перетворень речовин за третім наближенням по рівнянню Гіббса-Гельмгольца. За розрахункові данні були прийняті данні із довідників [23-26].

Побудовано графічні залежності  $\Delta G_T^0 = f(T)$ , які зображено на рис.3.1, за якими встановлено, що для зміщення реакції вправо слід забезпечити підведення теплоти протягом всього процесу розкладання  $\text{CaCO}_3$  за температур в інтервалі 273-1173 К і розкладання  $\text{MgCO}_3$  за температур в інтервалі 273-573 К.

Теоретично на декарбонізацію 1 моля  $\text{CaCO}_3$  витрачається 179 кДж теплоти [8,9]. Тривалість процесу визначається також розміром шматків випалюваного

вапняку. Фізико-хімічні основи випалювання карбонатної сировини детально описано в п.1.4.

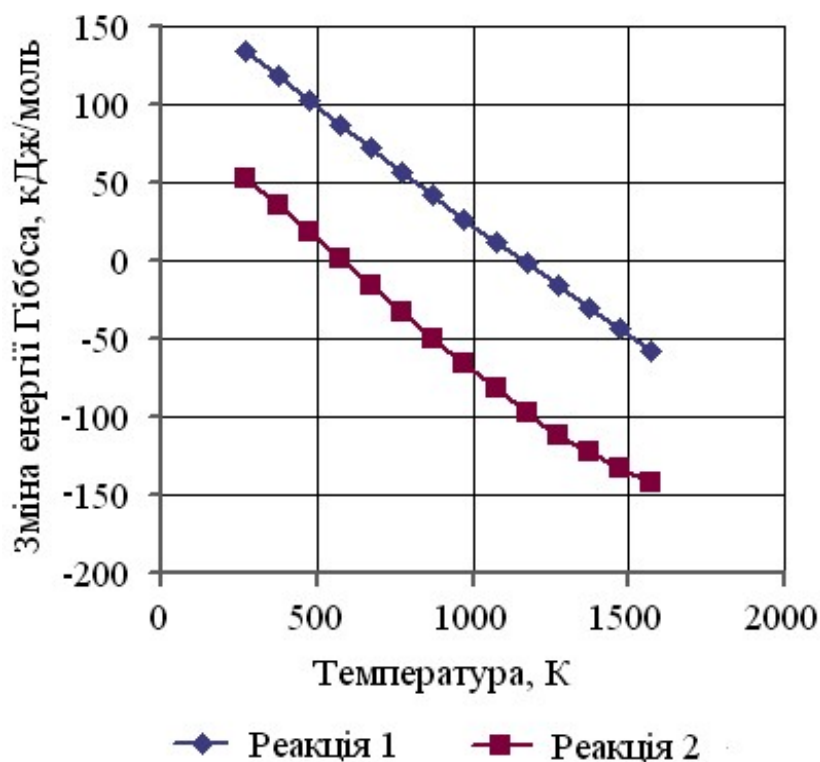


Рисунок 3.1 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакцій (3.1) і реакції (3.2)

Процес гашення полягає у взаємодії карбонату кальцію з водою за реакцією:



Для дослідження термодинамічних характеристик реакції гасіння вибрано температурний діапазон 0-100 °С з інтервалом в 10 градусів. Розрахунок виконано з використанням електронних таблиць Microsoft Excel, перевірено у програмі HSC. За розрахункові данні були прийняті данні із довідників [23-26].

Графічна залежність  $\Delta G_T^0 = f(T)$  для реакції зображено на рис.3.2, за якою встановлено, що реакція (3.3) супроводжується великим екзотермічним ефектом. Гасіння вапна відбувається також зі збільшенням об'єму твердої фази і диспергування вапна.

Гідроксид кальцію не утворює стійких гідратів [26]. Тому зазвичай міс-

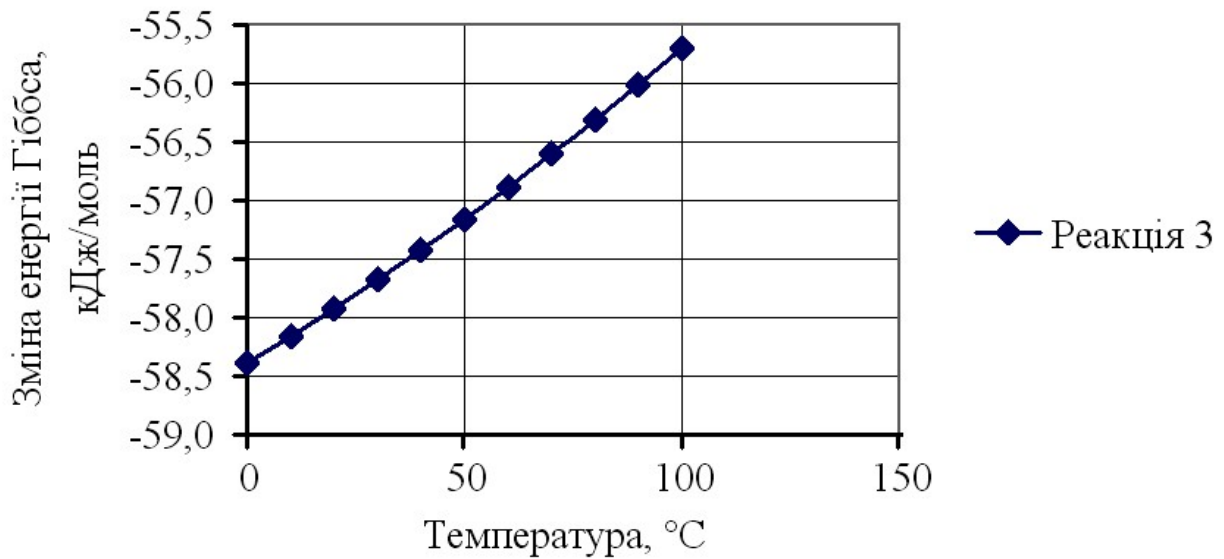


Рисунок 3.2 – Залежність зміни енергії Гіббса від температури для реакцій (3.3)

титься в різних зразках гідроксиду надлишок води (до 1 моль на 1 моль CaO) пов'язаний силами поверхневої адсорбції і залежить від умов протікання реакції гашення, питомої поверхні та терміну зберігання.

Гідроксид кальцію кристалізується у формі пластин або призм (портландит). Кристали схильні до утворення агломератів, що включають частинки негашеного вапна і дисперговані інертні домішки.

Розчинність оксиду кальцію  $P_{CaO}$  (%) і гідроксиду кальцію  $P_{Ca(OH)_2}$  (%) обернено пропорційна температурі  $t$  в інтервалі від 0 °C до 100 °C [26]:

$$P_{CaO} = 0,14 - 0,00086t, \quad (3.4)$$

$$P_{Ca(OH)_2} = 0,187 - 0,00119t. \quad (3.5)$$

Процес гідратації вапна складається з таких стадій, які в практичних умовах можуть накладатися або заміщати одна одну:

- абсорбція і капілярне проникнення води вглиб частинок вапна;
- розчинення оксиду кальцію;
- утворення і дисоціація проміжної сполуки;
- утворення «зародків» (центрів кристалізації) і кристалізація  $Ca(OH)_2$ ;
- агломерація твердої фази і структурування суспензії.

В реальних умовах будь-яка з перших чотирьох стадій може виявитися лімітуючою. Так, найбільший вплив на першу і другу стадії процесу гідратації мають вид, структура та хімічний склад вихідної карбонатної породи, а також умови її випалювання. Тому для кожної конкретної карбонатної сировини потрібно встановлювати оптимальні температуру і тривалість випалювання, вид палива, коефіцієнт надлишку повітря, розміри шматків вапняку та ін.

При підвищенні температури випалювання прискорюється процес формування кристалів оксиду кальцію, що супроводжується усадкою пор з одночасним збільшенням їх середнього розміру. Загальний об'єм пор при цьому зменшується. При збільшенні тривалості ізотермічного випалу пори набувають монодисперсний характер.

При цьому розмір кристалів оксиду кальцію збільшується незначно, особливо при температурі випалу нижче 1250 °С. Характер кривих мокрого гашення свідчить про переважний вплив пористості, а не середнього розміру кристалів оксиду кальцію.

Отримане при низьких температурах (м'яко випалене) вапно має велику поверхневу активність і внутрішню змочуваність завдяки великій пористості. Процес гашення в цьому разі протікає з високою швидкістю і характеризується швидким темпом зростання температури.

Загальне збільшення швидкості гетерогенного процесу неминуче викликає зміну співвідношення швидкостей окремих стадій. З підвищенням ступеню подрібнення і пористості вапна зростає пересичення розчину гідроксиду кальцію. Це призводить до збільшення швидкості процесу утворення зародків і зниження швидкості росту окремих кристалів, що обумовлює утворення дрібнодисперсних первинних кристалів гідроксиду кальцію і стійкість вапновмісної суспензії. Оскільки дрібні кристали  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  утворюють міцні агломерати, перевищення певного ступеня подрібнення, наприклад, м'якого випаленого вапна призводить до погіршення якості суспензії. Це свідчить про лімітування реакції гашіння дифузійними процесами.

Деякі дослідники вважають, що початковий період процесу гідратації протікає в кінетичній області. Однак з підвищенням температури води, що подається на гашення, так само, як і з збільшенням ступеня дроблення вапна, помітно збільшуються швидкість процесу гідратації і дисперсність твердої фази одержуваної суспензії при використанні середньо- і жорстко випалене вапно, що додатково вказує на лімітування процесу дифузії.

Домішки, що впливають на процес гашення вапна, можна поділити на дві групи: домішки, що надходять в зону реакції гасіння з твердої фазою (тобто з вапном) і з рідкою фазою. Домішки, що містяться в карбонатній породі, головним чином побічно впливають на процес гашення, впливаючи на ступінь декарбонізації, структуру і активність вапна. При випалюванні карбонатної породи в шахтних печах оксиди Fe, Al, Si, Ti утворюють низькоплавкі сполуки, наприклад ферити і алюмінатоферити кальцію, які сприяють агломеруванню частинок вапняку, перешкоджають його рівномірній декарбонізації та процесу оствальдівського дозрівання пір. Тому вапно, отримане випалюванням великошматкового вапняку, що містить полуторні оксиди, піддається гасінню швидше, ніж вапно, отримане з дрібношматкового вапняку.

З іншого боку, деякі твердофазні домішки безпосередньо впливають на кінетику гідратації і якість вапновмісних розчинів (вапняної суспензії). Так, домішки  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$  сповільнюють гідратацію, а додавання 5 %  $MgO$  зменшує швидкість реакції на 1/3. Домішка  $CaSO_4$  істотно уповільнює гідратацію.

Велике значення має проблема впливу розчинних домішок, що містяться в рідині, що подається на гашення, на процес гашення вапна. Ці домішки впливають на кінетику реакції гасіння, його тепловий ефект, фізико-хімічні властивості вапняної суспензії і навіть на кристалічну модифікацію  $Ca(OH)_2$ .

Прискорення реакції гідратації оксиду кальцію за допомогою добавок (наприклад, електролітів), деякі дослідники пов'язують з підвищенням розчинності гідроксиду кальцію в присутності цих добавок або утворенням

сполук, більш розчинних, ніж  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , що дійсно слід було очікувати при лімітуванні процесу гідратації стадією розчинення.

Швидкість гасіння різко зростає навіть при незначних домішках хлориду кальцію, хоча розчинність  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при цьому ще не помітно підвищується.

Швидкість гасіння вапна залежить від таких факторів:

– температури води, що подається на гашення. Чим вища температура води, тим швидше йде процес. Цей фактор найбільш значимо впливає на швидкість гасіння, тому в експлуатаційних умовах він є найважливішим;

– розміру кристалів  $\text{CaO}$ . Чим вони менші, тим вапно активніше, процес гасіння йде швидше, менше дрібних домішок у вихідному молоці після гасителя. Це другий за значимістю фактор (після температури води), тому випалювання вапна потрібно вести на малих дозах палива, щоб знижувати температуру в зоні випалювання і отримувати високоактивне дрібнокристалічне вапно;

– наявності в продуктах гашення гіпсу ( $\text{MgO}$ ) (при гасінні вапна оборотними розчинами після промивання осаду з вакуум-фільтрів). Всі перераховані речовини знижують швидкість реакції. При обмеженому часі перебування вапна в гасителях (до 15 хвилин) може призвести до зниження концентрації  $\text{CaO}$  в вапновмісному розчині (молоці);

– наявності поверхнево-активних речовин (ПАР), які уповільнюють процес гасіння;

– розміру шматків вапна. Чим вони менші, тим більша поверхня реагування, тим активніше йде процес гашення. Мелене вапно гаситься швидше за кускове;

– від часу і умов зберігання вапна. Свіжовипалене вапно гаситься швидше ніж те, що довго зберігалось.

Якщо процес гасіння лімітується стадією змочування шматкового вапна з утворенням реакційної поверхні розділу фаз, що повинно мати місце при використанні низькопористого, тобто жорстко випаленого вапна, можна

збільшити швидкість процесу шляхом застосування добавок, що знижують поверхневий натяг води.

У вапняної суспензії містяться тверді частки  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  різної дисперсності: від колоїдних розмірів (0,1-0,001 мкм) до декількох міліметрів в поперечнику. В основному тверду фазу суспензії складають частинки колоїдних розмірів. Це кристаліти  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  та їх агрегати, вкриті водною оболонкою. Зі збільшенням відстані від поверхні частинок сила, що утримує воду, зменшується. На поверхні частинок вода знаходиться в дисоційованому стані, тобто у вигляді  $\text{OH}^-$  і  $\text{H}^+$  іонів, а в більш віддалених шарах вона знаходиться у вільному стані – у вигляді молекули  $\text{H}_2\text{O}$ . Кількість шарів води, що утримується на поверхні частинок вапна, залежить від умов утворення  $\text{CaO}$  і його гашення. Між колоїдними частинками, що знаходяться у суспензії, діють сили наближення і відштовхування. Від співвідношення цих сил залежать такі фізичні властивості суспензії, як текучість, в'язкість, об'єм осаду.

На в'язкість суспензії впливає концентрація частинок гідроксиду кальцію: чим вище концентрація, тим більше в'язкість.

Причому, від кількості зв'язаної з вапном води залежать плинність і в'язкість суспензії, тому що на відміну від істинних розчинів вапняна суспензія – колоїднодисперсна система. Такі системи відносяться до пластично-в'язких рідин. Для додання їх плинності потрібно витратити більшу потужність, ніж для істинних розчинів. Тому в'язкість і розтікання суспензії збільшуються при гасінні вапна розчином, отриманим після промивання водою осаду на дискових фільтрах або вакуум-фільтрах.

Вапняне молоко отримують в обертових барабанних гасителях, у які спочатку подається вапно і гаряча вода або оборотні розчини. Оскільки вапновмісні розчини (в тому числі вапняне молоко) повинні мати стабільну і високу густину, то апарати мають бути обладнаними дозаторами подачі вапна і автоматичною системою керування, що забезпечує підтримання оптимального співвідношення «вапно-вода», уникнути забруднення вапняного молока

частинками недопалу (частинки утворюються в результаті стирання вапна при його транспортуванні вздовж апарату), які слід своєчасно видаляти, тобто апарат слід обладнати пристроєм безперервної вивантаження недопалу. Крім того, гаситель повинен мати аспіраційні пристрої.

Реакція взаємодії оксиду кальцію  $\text{CaO}$  з водою супроводжується виділенням теплоти, значна частина якої витрачається на випаровування води. В результаті при гасінні 1 т  $\text{CaO}$  утворюється близько 300 кг пари.

### **3.2 Дослідження конструкції завантажувально-розподільчого пристрою печі випалювання вапняку**

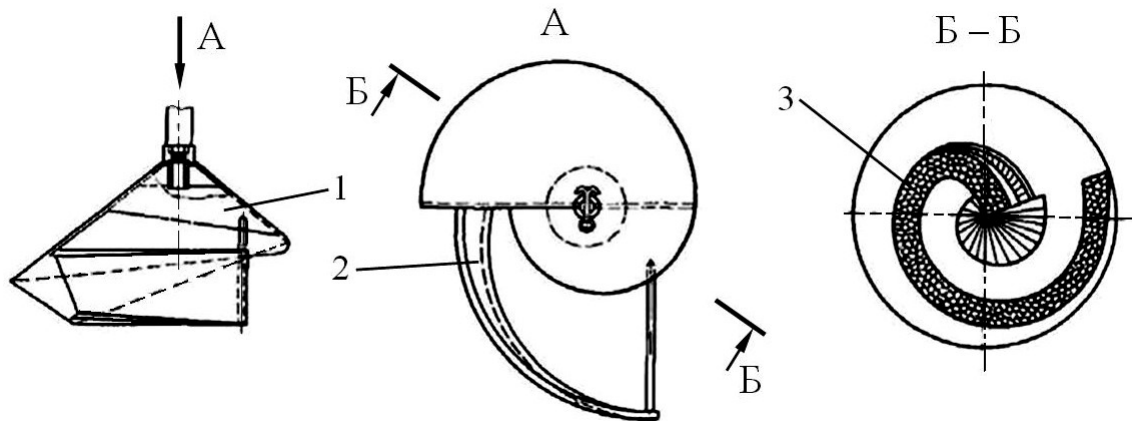
Рівномірність розподілу шихти в печі випалювання вапняку є вирішальним фактором для досягнення найкращих показників її роботи.

У промисловості застосовується велика кількість різних конструкцій завантажувально-розподільчих пристроїв: поворотний конус-розсікач, лоткові.

Поворотний конус-розсікач (рис.3.3) є приймальною лійкою з отвором, який закривається знизу прямим конусом-розсікачем, розташованим всередині печі [9]. Конус-розсікач при завантаженні шихти відкидає її в периферійне кільце. В такому разі біля стін печі утворюється гребінь, а в центральній частині шахти виникає вирва. Наявність лійки викликає сегрегацію матеріалу за рахунок різниці кутів природного укосу в шматках різного розміру. В результаті дрібні шматки накопичуються на гребені, а великі шматки скочується до його основи, тобто до осі шахти. Опір шару шихти вздовж осі стає істотно нижчим, ніж у периферійному кільці. У такій печі спостерігається так званий «центральный хід». При цьому кількість повітря, що проходить через одиницю площі перерізу по осі шахти, більша, ніж за таку ж площу на периферійних ділянках. У такому разі швидкість згоряння палива в приосьовій ділянці буде вища, ніж на периферії, а отже, і зона горіння в приосьовій ділянці буде зміщуватися в верхню частину шахти. У той же час зона горіння біля стін



шахти буде зміщуватися в бік вивантажувальних кареток. Через явну недосконалість конструкції прямий конус замінюється іншими розподільними пристроями.



1 – лійка; 2 – конус-розсікач; 3 – шихта

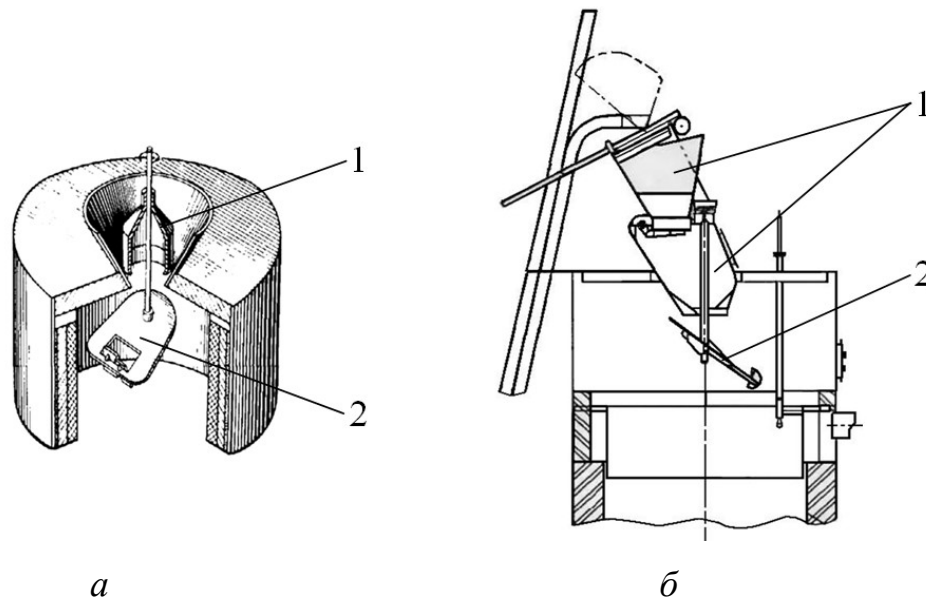
Рисунок 3.3 – Поворотний конус-розсікач

Лотковий завантажувально-розподільчий пристрій (рис.3.4, а) є одноклапанною конструкцією, розташованою вздовж осі шахти. Розподіл шихти по перерізу шахти здійснюється за допомогою похилого лотка з відбійниками, закріпленого на вертикальному валу, який пропущений всередину шахти по осі запірного клапана.

Шихта, що завантажується з приймальну лійку під час руху по лотку поділяється на чотири потоки. Довжина лотка обирається розрахунком, щоб два потоки шихти, що рухаються по краях лотка і не зустрічають на своєму шляху відбійників, потрапляли на периферійні ділянки перерізу шахти. Два інших потоки шихти направляються відбійниками в приосьову і середню кільцеву ділянку шахти печі. Після завантаження кожної порції шихти вал, на якому закріплений лоток, повертається на  $65^\circ$ . Частота обертання валу не перевищує 1 об./хв, що забезпечує його самогальмування після відключення електроприводу.

Лотковий пристрій не поступається кращим зарубіжним зразкам розподільних пристроїв, а по простоті конструкції значно перевершує їх. Він

успішно експлуатується на промислових підприємствах.



*a* – одно клапанний; *б* – двоклапанний

1 – клапан; 2 – лоток з відбійником

Рисунок 3.4 – Лоткові завантажувально-розподільчі пристрої

Подальшим удосконалення лоткового завантажувального пристрою є універсальна двоклапанна конструкція, яка придатна для монтажу на всіх печах шахтного типу (рис.3.4, *б*). Герметичний двохклапанний завантажувальний механізм працює наступним чином: вапняк з скіпового ковша висипається в завантажувальну воронку, потім верхній клапан відкривається і вапняк пересипається в проміжну камеру; після закриття верхнього клапана відкривається нижній клапан і вапняк висипається в піч.

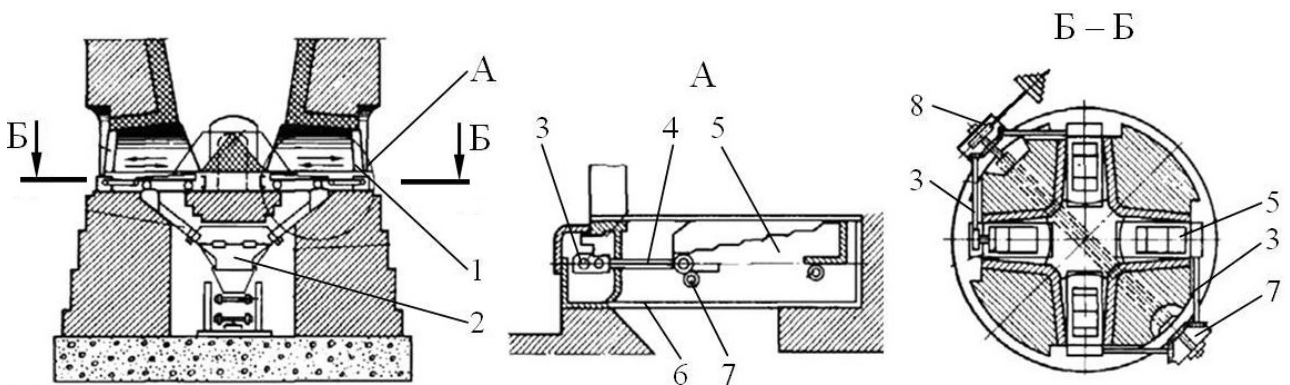
Завантаження вапняку в піч здійснюється автоматично за спеціальним алгоритмом, що дозволяє підтримувати постійний рівень матеріалу в печі і витримувати рівномірне завантаження вапняку.

Перевагою двоклапанного завантажувального пристрою є значне зменшення підсмоктування повітря в піч при завантаженні шихти.

### 3.3 Дослідження конструкції вивантажувального пристрою печі випалювання вапняку

У шахтних печах випалювання знайшли поширення в основному три типи конструкції вивантажувальних пристроїв: каретки системи Антонова, обертовий черень у вигляді равлика і колосниковий черень різних конструкцій.

На рис.3.5 показано чавунні ступінчасті каретки системи Антонова, розташовані в коробках, які вмонтовані в вивантажувальній ніші печі. Каретки попарно з'єднані тягами з приводними кривошипними валами і з приводним валом. Наявність роз'ємних муфт на приводних валах дозволяє зупинити каретку [8,9]. Рух каретки можна також змінювати перестановкою пальця кривошипа. Регулюється і частота обертання приводного валу. Вапно розташовується по довжині каретки під кутом природного укосу. При зворотно-поступальному русі каретка виштовхує своїми виступами шматки вапна до вивантажувальним отворів.



1 – вивантажувальна ніша; 2 – бункер ; 3 – кривошипний вал;  
4 – тяга; 5 – каретка; 6 – коробка; 7 – ролики; 8 – приводний вал

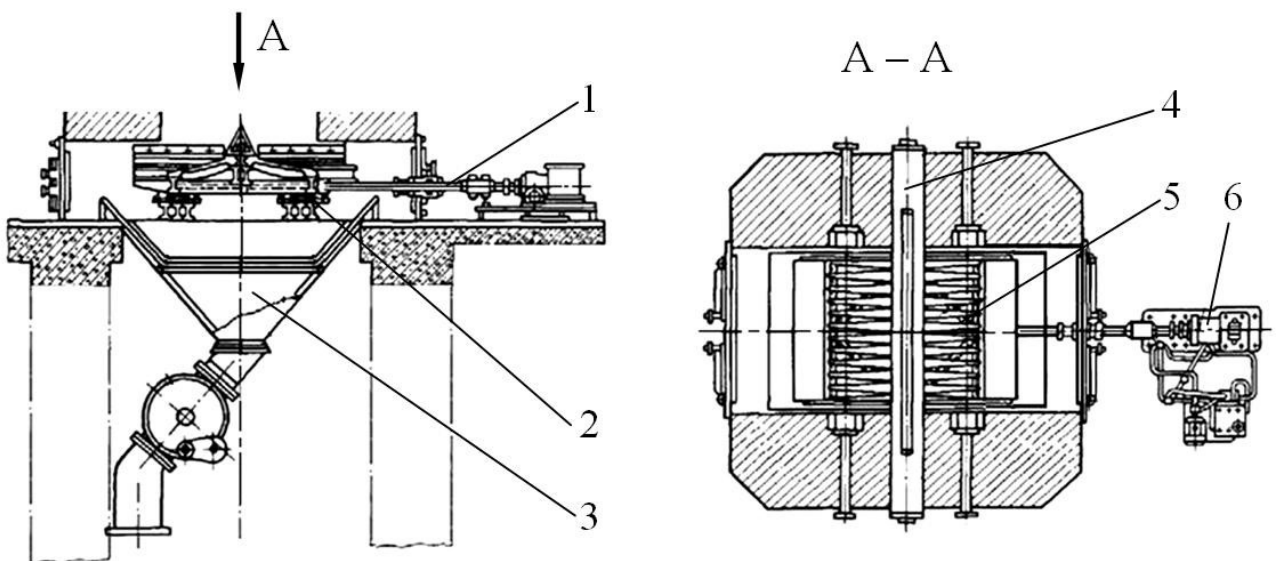
Рисунок 3.5 – Вивантажувальний пристрій з каретками Антонова

Під піччю встановлено приймальний бункер і пристрій для вапна, що транспортує. Вивантаження вапна по перерізу шахти відбувається нерівномірно. Швидкість опускання її над каретками значно перевищує

швидкість опускання в проміжках між ними. Перевагою пристрою є простота конструкції.

Загальним недоліком для кареток Антонова та обертового череня є нерівномірний розподіл повітряного потоку за перетином шахти і утворення внаслідок цього ділянок, в яких охолодження вапна відбувається менш інтенсивно.

Колосниковий черень (рис.3.6) є прямокутною рамою з чавунними колосниками, яка спирається на котки, встановленими у вигляді двосхилого даху. За допомогою механічного або гідравлічного приводу решітка здійснює зворотно-поступальний рух, і дрібні шматки вапна провалюються через зазори між колосниками, а великі шматки пересуваються по похилим колосникам і звалюються в зазор між ґратами і кожухом печі.



1 – шток приводу; 2 – ролики поду; 3 – бункер;

4 – балка-розсікач; 5 – колосники; 6 – гідропривід

Рисунок 3.6 – Колосниковий вивантажувальний пристрій

Над гребенем решітки по діаметру шахти знаходиться охолоджувана водою порожниста балка, що має трикутний перетин. Балка приймає на себе частину тиску стовпа матеріалу і одночасно перешкоджає руху вапна разом з

гратами. Вивантажувальний пристрій укладено в кожух, з люками для обслуговування решітки.

Вапно потрапляє в бункер, розташований під вивантажувальним пристроєм. Для герметизації низу печі на виході вапна з бункера може бути встановлений барабанний затвор – трэфель.

Перевагами пристрою є підведення повітря по всьому поперечному перерізу печі і рівномірність відбору вапна, його недоліком – необхідність застосування шахти складної конфігурації (вимагає підвищення позначки встановлення в печі приблизно на 6-7 м).

Існують інші, більш сучасні пристрої для вивантаження вапна з печі [9,11,15]. Питання про заміну або ремонт існуючого вивантажувального пристрою вирішується з урахуванням економічної доцільності.

Таким чином, протитечійна шахтна піч круглого перетину, побудована знову або існуюча піч, що пройшла реконструкцію, цілком може конкурувати із зарубіжними аналогами шахтних печей. Автоматизація печі дозволить відстежувати всі аварійні ситуації і витримувати заданий технологічний режим.

Однак експлуатація печі вимагає від персоналу слідувати строго технологічній інструкції, не порушувати режим випалювання вапняку.

### **3.4 Дослідження впливу умов випалювання вапняку на якість отриманого вапна і вапняного молока**

У виробництві глинозему на операції розмелювання бокситу в оборотний розчин додають 3-5 % вапна. Активність випаленого вапна не перевищує 85 %. Неактивне вапно в основному представлено недопалом у вигляді  $\text{CaCO}_3$  і продуктами реакції взаємодії вапна з компонентами, присутніми в вапні,  $\text{CaSO}_4$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  [3].

Для зменшення можливого потрапляння неактивного вапна в технологічний процес передбачено подавати його у вигляді вапняного молока,

що містить близько 200 г/л активного оксиду кальцію  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ .

Для уточнення умов приготування вапняного молока на конденсаті і оборотному розчині та для скорочення витрати води на процес проведено серії досліджень.

Для дослідження умов гасіння вапна, що отриманого випалюванням, використано вапняк, який містить 54,2 %  $\text{CaO}$ ; 0,5 %  $\text{MgO}$ ; 1,32 %  $\text{SiO}_2$ ; 0,39 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 0,65 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,04 %  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 0,03 %  $\text{K}_2\text{O}$ ; 0,04 %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ; 42,7 % в.п.п. Гранулометричний склад вапняку наведено в табл. 2.1.

Кремнеземом найбільш збагачена фракція бокситу з розміром частинок до 40 мм, яка містить 2,3 %  $\text{SiO}_2$ . У той час як у фракції бокситу з розміром частинок більше 40 мм міститься 0,7%  $\text{SiO}_2$ .

При температурі 885-930 °С для бокситу з розміром частинок до 40 мм ендотермічний ефект дисоціації вапняку (за даними диференційно-термічного аналізу) зрушує в область більш високих температур, що свідчить про гальмівний вплив глинистих складових на процес випалювання вапняку.

У дослідженнях використана проба вапна, отриманого в промисловій печі випалювання вапняку. Гранулометричний і хімічний склад, масова частка активного оксиду кальцію в кожній фракції вапна наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Гранулометричний і хімічний склад вапна

Діапазон розмірів частинок фракцій вапна, мм	Масова частка фракції, %	Масова частка $\text{CaO}_{\text{акт}}$ , %	Масова частка сполуки, %						
			$\text{CaO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	в.п.п.
80-100	18,2	85,85	90,31	1,42	1,21	0,61	0,15	1,82	4,48
60-80	19,4	81,04	89,09	1,34	1,15	0,57	0,07	3,07	4,71
40-60	23,2	79,63	87,08	1,26	–	–	0,02	4,55	7,09
15-40	30,1	78,70	83,76	2,26	–	–	0,03	5,93	8,02
до 15	9,1	76,41	79,08	2,55	–	–	0,04	8,18	10,15
Середнє		80,33	85,86	1,77	0,47	0,24	0,06	4,71	6,89

З даних табл.3.1 випливає, що найменша масова частка активного оксиду кальцію відповідає фракції розміром менше 15 мм, що обумовлено більш

високою масовою часткою глинистих фракцій (2,55 %  $\text{SiO}_2$ ), а також перепалом.

Для всіх п'яти фракцій уточнювали швидкість гасіння вапна при температурі 20 °С. Максимальна температура гасіння 78-80 °С досягнута для всіх фракцій вапна за 3,5-5 хв, проте для фракції вапнів з розміром частинок до 15 мм температура гасіння досягала лише 64 °С за 8 хв.

Таким чином, всі фракції вапна відносяться за своїми властивостями до високоекзотермічного вапна (температура якого перевищує 70 °С), крім з розміром частинок до 15 мм, які відносяться до перепалу або вапна, зашлакованого домішками.

Вапно, що виходить з печей випалювання вапняку, дробиться до частинок розміром менше 25 мм, транспортується в приймальний силос, з якого надходить в гасителі. Час перебування вапна в гасителів приблизно 20 хв, температура вихідного конденсату становила близько 60 °С.

Недопал вапна, представлений в основному трьома фракціями з розмірами частинок 3-5 мм (26,5 %), 1-3 мм (57,5 %), до 1 мм (16 %), за хімічним і фазовим складом відповідає початковому вапняку, надходить у відвал і придатно для використання в будівництві.

Основним фактором, що визначає якість вапняного молока, є масова частка активного оксиду кальцію  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  і його гранулометричний склад за розміром частинок до 0,3 мм. У вапняному молоці переважає (близько 93 %) фракція з розміром частинок до 0,14 мм при масовій частці  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  близько 200-250 г/л.

За даними хімічного аналізу тверда фаза вапняного молока містить, %: 65  $\text{CaO}$ ; 7  $\text{SiO}_2$ ; 1,0  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 0,7  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 0,1  $\text{Na}_2\text{O}$ ; 24 в.п.п. Наявність масової частки  $\text{CO}_2$  близько 10 % обумовлено адсорбцією з повітря під час аналізу.

Виконано диференційно-термічний аналіз повітряно-висушеної проби вапняного молока і аналогічної вологої проби. В останній пробі в основному міститься  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , фаза  $\text{CO}_2$  практично відсутня.

У лабораторних умовах перевірено швидкість гасіння вапна оборотним розчином при температурі 20 °С і 60 °С (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Результати експериментального визначення температури гасіння вапна

Час гасіння, хв	Температура гасіння вапна (°С) оборотним розчином за температури, °С					
	20			60		
	серія 1	серія 2	середня	серія 1	серія 2	середня
0,5	22	20	21	57	59	58
1,0	24	22	23	60	64	62
1,5	24	24	24	65	67	66
2,0	25	23	24	69	77	73
2,5	25	25	25	84	84	84
3,0	27	25	26	96	100	98
4,0	26	26	26	99	101	100
5,0	28	24	26	99	105	102
6,0	27	25	26	98	104	101
7,0	28	25	26,5	97	99	98
8,0	27	26	26,5	97	97	97

За даними табл.3.2 і рис.3.7 встановлено, що гасіння вапна оборотним розчином при температурі 60 °С відбувається за 5 хв, при цьому досягається температура близько 100 °С. Уявна енергія активації гасіння вапна становить 9,12 кДж/моль. Отже, реакція гасіння вапна водою лімітується дифузійними процесами.

За технологічним регламентом концентрація вихідного оксиду  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  при гасінні оборотним розчином повинна бути 90-120 г/л. У лабораторних умовах перевірено дозування  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  у кількості 110, 130, 140, 170 г/л. Встановлено, що вапняне молоко, отримане при дозуваннях більше 150 г/л  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ , втрачає плинність, оскільки утворюється студнеподібна маса.

Отримані осади проаналізовано диференційно-термічним і рентгенівським методами досліджень. У незначних кількостях присутній  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , причому через годину контакту оборотного розчину з вапном смуги інтенсивності його зменшуються і лінія  $\text{CaCO}_3$  практично відсутня. Аналогічні



закономірності спостерігаються при аналізі осадів за обидва аналізами. Переважним є ендотермічний ефект гідрогранатов при температурі в інтервалі 365-355 °С.

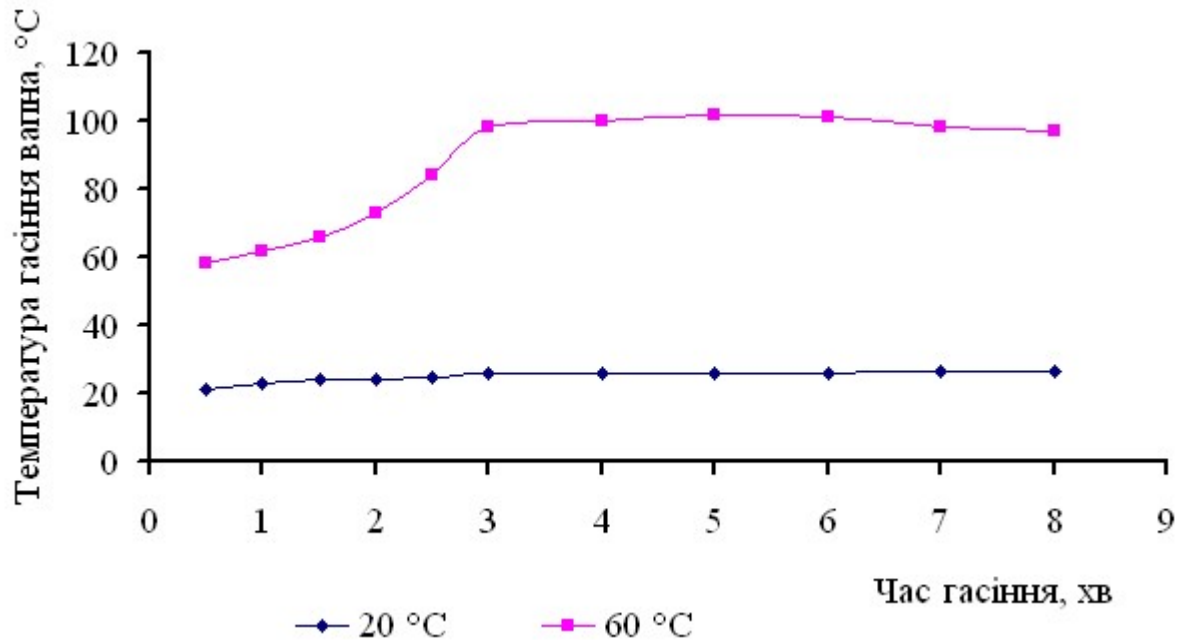


Рисунок 3.7 – Вплив температури оборотного розчину на температуру гасіння вапна

Екзотермічний ефект  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при температурі 530-535 °С зменшується в часі, починаючи з 10 хв контактування вапна з оборотним розчином, і стає найменшим при 60 хв. Карбонат кальцію реєструється ефектами при температурі в межах 750-870 °С.

Таким чином, фазовий і хімічний склад (табл.3.3) осаду і складу розчинів свідчать про інтенсивну взаємодію вапна з розчином під час гасіння з утворенням гідроалюмінатів кальцію і гідрогранатів.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад осадів від гасіння вапна оборотним розчином, що містить 130 г/л  $\text{CaO}_{\text{акт}}$

Час гасіння, хв	Масова частка сполук у складі осадів, %					
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	в.п.п	CO <sub>2</sub>
10	48,5	0,9	20,0	0,17	26,0	4,0
20	46,9	0,8	20,7	0,19	26,8	3,7
30	45,9	0,7	21,3	0,15	26,6	3,1
60	43,8	0,9	24,9	0,12	26,8	1,8

Зміна за часом хімічного складу осадів, що утворюються після гасіння вапна оборотним розчином, який містить 130 г/л  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ , надано на рис.3.8.

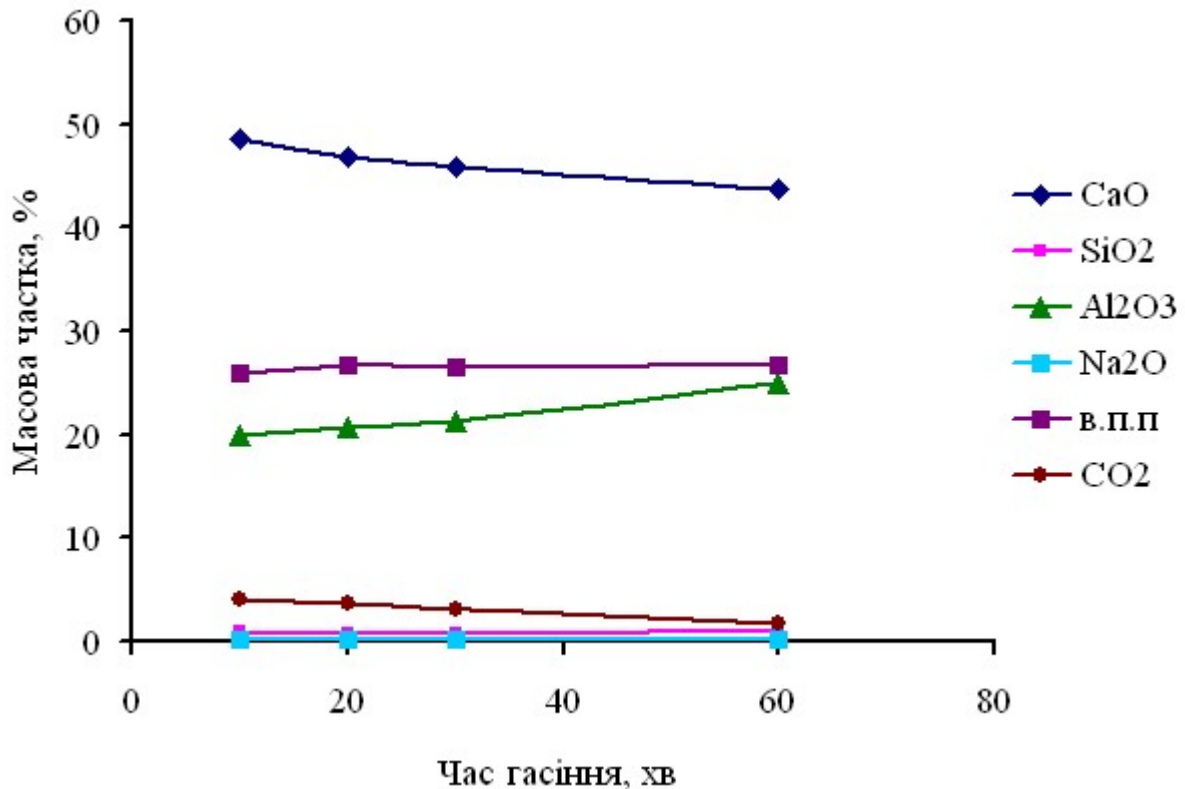


Рисунок 3.8 – Хімічний склад осадів, що утворюються після гасіння вапна оборотним розчином

Проведеними дослідженнями встановлено, що для поліпшення якості одержуваного вапна слід відсівати дрібну фракція вапняку (частинки з розмірами до 40 мм) методом просіювання. Такий захід також створить більш сприятливі умови і поліпшить процес випалювання вапняку в шахтних печах.

Якісне вапняне молоко з хорошим гранулометричним складом можна отримувати гасінням вапна оборотним розчином при дозуванні вапна не більше 130 г/л активного оксиду кальцію.

### 3.5 Про модернізацію газоочисних споруд печей випалювання вапняку для виробництва глинозему

Вловлювання дрібнодисперсного пилу (дріб'язку) оксиду  $\text{CaO}$  з очищенням димових газів, що відходять з печей випалювання вапняку, та повернення цього пилу в технологічний процес підвищує вилучення  $\text{CaO}$  під час випалювання. Тому важливе значення набуває тип і конструкція газоочисних споруд.

Досвід використання циклонів типу СДК-ЦН для очищення від дрібнодисперсного пилу димових газів, що відходять з печей випалювання вапняку в виробництві глинозему, показав їх низьку ефективність (30-60 %).

Для уловлювання дрібнодисперсного пилу з газів, що очищаються, застосовують пилогазоочисні апарати більш високого класу – рукавні фільтри і електрофільтри. Ці апарати забезпечують ефективність очищення 99 % і вище за умови дотримання технологічного режиму їх експлуатації [22].

Зазвичай тканинні рукавні фільтри застосовують для уловлювання дрібнодисперсного пилу з газів з температурою до 250 °С. За температур понад 250 °С починається процес руйнування більшості поширених фільтрувальних тканин або скорочується термін їх можливого використання до економічно не вигідного. Сучасні фільтрувальні тканини, що призначені для експлуатації за температур понад 250 °С, в декілька (до п'яти) раз дорожчі, ніж тканини з температурою експлуатації до 250 °С. Крім того, істотно впливає склад газу, що очищається, і наявність пилових частинок, які можуть руйнувати тканину або погано піддаватися видаленню з поверхні фільтрувальної тканини і з бункерів рукавного фільтра.

Електрофільтри є універсальнішими апаратами для уловлювання пилу серед сучасних. Електрофільтри зазвичай забезпечують ступінь очищення газів від пилу 99,5 % та більше. В електрофільтрах уловлюються пилові частинки розміром від 100 мкм до 0,01 мкм, тобто і субмікронні, при концентрації пилу в

газах  $50 \text{ г/м}^3$  і більшій. Промислові електрофільтри застосовуються в діапазоні температур до  $400\text{-}450^\circ\text{C}$ , в деяких випадках і за більш високих температур, а також в умовах впливу різних корозійних середовищ. Електрофільтри характеризуються найменшим гідравлічним опором порівняно з іншими апаратами, працюють як при атмосферному тиску, так і при тисках вище і нижче атмосферного.

Електрофільтри відрізняються відносно низькими експлуатаційними витратами. Витрати електроенергії становлять зазвичай  $0,36\text{-}1,8 \text{ МДж}$  ( $0,1\text{-}0,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}$ ) на  $1000 \text{ м}^3$  газу. Системи пиловловлення із застосуванням електрофільтрів повністю автоматизовані. Додатковим аргументом щодо доцільності застосування електрофільтра є питомий електричний опір пилу. Питомий електричний опір пилу газів, що відходять з печей випалу вапняку, становить  $0,59 \cdot 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , тобто пил належить до другої групи пилу, питомий електричний опір яких становить  $10^2\text{-}10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

Пил другої групи зазвичай добре уловлюється в електрофільтрах. Під час осадження на електродах частинки пилу розряджаються не миттєво, а через деякий час, достатній для накопичення шару і формування з дрібних частинок, що осаджуються, агломератів під дією електричних і адгезійних сил. Розмір агломератів зазвичай такий, що основна частина пилу при струшуванні електродів потрапляє в бункер електрофільтру і лише невелика кількість виноситься газовим потоком, утворюючи вторинне пилевинесення.

Враховуючи високу температуру ( $260\text{-}305 \text{ }^\circ\text{C}$ ) газів, що підлягають очищенню, наявність у складі пилу оксиду кальцію (основний характер пилу) і позитивний досвід застосування електрофільтра при реконструкції пилогазоочисної установки однієї з печей випалювання вапняку, найбільш прийнятним апаратом для вилучення пилу з димових газів інших печей випалювання вапняку у виробництві глинозему є електрофільтр ЕГУ1-15/400 [22].

### 3.6 Заходи щодо впровадження результатів дослідження

Аналіз конструкцій і роботи конкретних шахтних вапняних печей, а також схем очищення і приготування вапняного молока, які використовують на глиноземних підприємствах, показує, що практично для кожного з підприємств існують можливості зниження витрат палива для випалювання вапняку.

Основні заходи, впровадження яких сприятиме зниженню як питомих, так і загальних витрат палива для випалювання вапняку, є такі: покращення використання і вдосконалення обладнання шляхом встановлення нових завантажувальних і вивантажувальних пристроїв на шахтних печах випалювання вапняку, вдосконалення технології випалювання, підвищення якості карбонатної сировини, інші організаційно-технічні заходи.

1. Реконструкція існуючих печей з встановленням нових завантажувальних і вивантажувальних пристроїв.

Найбільш розповсюдженою причиною підвищення витрат палива на випалювання є перекош зони горіння (випалювання) за висотою шахти печі. В переважній більшості випадків така робота печі є наслідком недосконалості конструкцій або поломки механізмів завантажувально-розподільчого пристрою – вапняк при завантажуванні нерівномірно розподіляється по поперечному перерізу печ. На ділянках розташування великих шматків шихти кількість повітря, що проходить, зростає, і зона горіння на цій ділянці піднімається вгору, а в зоні скупчення більш дрібних шматків опускається на вивантажувальний пристрій.

Встановлення двоклапанового завантажувально-розподільчого пристрою практично повністю усуває цей недолік і дозволяє знизити питомі витрати палива на 15 %.

Шахтні печі продуктивністю 100 т/доб. потребують встановлення додатково другого клапану і частотного перетворювача на приводі вивантажувального пристрою. Найкращі результати роботи цих печей

отримано при встановленні завантажувального пристрою і нового вивантажувального пристрою. Такі реконструйовані шахтні печі можуть забезпечити до 125 т СаО при встановленні хроміто-периклазової футеровки, що дозволяє їх рекомендувати до встановлення на будь-якому з глиноземних підприємств.

## 2. Впровадження автоматизації завантаження печі і процесу випалювання.

При встановленні завантажувально-розподільчого пристрою рекомендованої конструкції важливе значення для рівномірного розподілу шихти набуває дотримання в заданих межах відстані між самим пристроєм і верхнім рівнем шихти.

Суворе дотримання цієї умови найбільш раціонально досягається шляхом впровадження системи автоматизації завантаження за сигналом рівнеміра. Залежно від відхилення рівня шихти, що спостерігається до впровадження схеми автоматизації завантаження, розмір зменшення питомих витрат палива після впровадження такої схеми складає 2-3 % загальних витрат.

Автоматизація процесу випалювання полягає в стабілізації місця розташування зони випалювання шляхом підтримання постійної температури пічного газу ( $110 \pm 10$  °С), що відбирається зі спеціального пристрою, розташованого нижче рівня завантаженої шихти.

Розмір зменшення питомих витрат палива для випалювання від впровадження зазначених схем автоматизації складає 5 %.

## 3. Покращення якості вапняку шляхом його сортування з відокремленням дріб'язку.

Сучасні конструкції шахтних печей випалювання вапняку дозволяють випалювати вапняк, в якому співвідношення розмірів найбільших і найменших шматків знаходиться у межі 1,5:1. Шматки, розміри яких виходять за цю межу, використовувати для випалювання недоцільно, оскільки крупніші шматки будуть містити недопал, а з дрібніших буде отримане жорстко випалене вапно, яке під час приготування і очищення вапняного молока виводиться разом з

відходами. Крім того, найбільша кількість сторонніх домішок, що мають легкоплавкі складові, міститься в дріб'язку. Тому завантаження в піч дріб'язку вапняку приводить до прямих втрат теплоти для його випалення, а, відповідно, до збільшення питомих витрат палива.

Таким чином, у випадку поставки вапняку з підвищенням вмісту дріб'язку варто організувати їх сортування. Таку операцію рекомендуємо здійснювати на віброгрохотах, які обладнати ситами з круглими отворами, діаметр яких рівний меншому розміру шматків вапняку, що вказаний в сертифікаті постачальника, але не менше 40-50 мм для вапняку.

Не варто боятися в цих випадках збільшення кількості відходів, оскільки направлення відходів сортування в піч приводить тільки до перевитрат палива і прямих втрат вапна.

Залежно від вмісту дріб'язку у вапняку ефективність даного заходу може знизити питомі витрати палива на 5-10 %.

4. Приведення гранулометричного складу вапняку у відповідність з корисною висотою шахти печі.

Корисна висота печі (за виключенням висоти зони горіння, що не перевищує звичайно 20-25 % загальної висоти шахти) визначається тепловим розрахунком за умов теплообміну між газом і шматковим матеріалом.

У випадку використання печей з малою корисною висотою шахти для випалювання вапняку крупних розмірів збільшуються втрати теплоти з відхідними газами, а відповідно зростають і питомі витрати палива для випалювання.

Теоретичними розрахунками встановлено і промисловими випробуваннями доведено, що для вапняку розмірами 50-150 мм і 80-130 мм корисна висота шахти печі мусить складати близько 16 м, а для вапняку 30-80 мм – 11-12 м.

Неприпустимим є також використання печей з більшою корисною висотою шахти для випалювання дрібного вапняку. В такому разі в результаті утворення так званої «резервної» зони, що розташується між зонами

випалювання і підігріву, створюються сприятливі умови для відновлювальної реакції  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ , і різко зростають втрати теплоти з оксидом вуглецю.

В тому і в іншому разі збільшення питомих витрат палива може досягнути 9-10 % від його загальних витрат.

5. Дотримання технологічних норм і вимог проведення процесу випалювання.

Шахтна піч випалювання вапняку є тепловим агрегатом з високою інерцією і високим ступенем саморегулювання. Найбільш розповсюдженою причиною порушення режиму випалювання є зміна продуктивності печі – збільшення або зменшення споживання вапна глиноземним підприємством. В цих випадках обслуговуючий персонал зазвичай обмежується відповідним регулюванням продуктивності печі, забуваючи про те, що продуктивність печі в першу чергу визначається кількістю повітря, що потрапляє в піч, або кількістю відхідних пічних газів. При цьому у разі зменшення продуктивності вивантажувального пристрою зона горіння палива зміщується у верхню частину печі, збільшуючи тим самим втрати теплоти з відхідними газами, а при збільшенні продуктивності (вивантаження) – в нижню частину шахти, підвищуючи втрати теплоти з вивантаженим вапном. Крім підвищення втрат теплоти, при таких порушеннях режиму випалювання через деяких час спостерігатиметься підвищення вмісту недопалу у вапні, оскільки встановлена витрата палива, що розрахована на нормальну роботу печі, виявиться недостатньою. Намагання обслуговуючого персоналу виправити становище збільшенням витрати палива, може привести до ще гірших результатів («перепалу») і навіть до сплавлення шихти.

Особливо небезпечне збільшення витрати палива при зниженні зони випалювання в нижню частину шахти – при цьому буде спостерігатися безперервне підвищення кількості розжареного недопалу, що вивантажується з печі, оскільки для спалювання додаткової кількості палива необхідно і додаткова кількість повітря.



Найменш інерційним показником, що дозволяє оперативно здійснювати це регулювання, є значення температури газу на виході з печі, яку і необхідно підтримувати в заданих межах  $110 \pm 10$  °С, що забезпечує можливість експлуатації печі з оптимальним показником випалювання при мінімальних питомих витратах палива.

Питомі витрати палива також є важливим показником, що визначає практично всі техніко-економічні показники роботи печі – не тільки прямі витрати палива, але і якість отриманого вапна. При цьому чим ближчий показник витрати палива до теоретичного (мінімально можливого), тим вища якість вапна.

Витрату палива слід встановлювати на початку виробництва і коригувати в перші 5-10 діб експлуатації печі. Після цього коригування дози палива може здійснюватися тільки у разі різкої зміни температури повітря або зміни виду сировини, що випалюється. Перевірку витрати палива необхідно проводити не менше 1 разу в декаду, а також при відхиленні будь-яких режимних показників роботи печі. Довільна зміна витрати палива бригадирами вапняної ділянки у разі появи недопалу у вапні, що вивантажується, випадання атмосферних опадів, зсув зони випалювання тощо має бути суворо заборонена.

Таким чином, основними експлуатаційними показниками, які потрібно керувати і безперервно підтримувати в заданих межах, є температура газу на виході з печі, рівень завантаження шахти і витрата палива. Відхилення від заданих величин цих показників веде до порушення режиму випалювання і погіршення якості вапна.

Економічний ефект від дотримання технологічних норм і вимог щодо веденню процесу випалювання не може бути розрахований, оскільки недотримання цих вимог може привести не тільки до порушення процесу випалювання, але і до виведення печі з ладу і зупинки виробництва глинозему.

*Висновки.* Досліджено термодинаміку і механізм процесів випалювання карбонатної сировини і гасіння випаленого вапна. Процес гідратації вапна є багатостадійним, стадії якого можуть накладатися або заміщувати одна одну. Експериментально визначено, що реакція гасіння вапна водою лімітується дифузійними процесами.

Найбільший вплив на процес гідратації мають вид, структура та хімічний склад вихідної карбонатної породи, а також умови її випалювання. Тому для кожної конкретної карбонатної сировини потрібно встановлювати оптимальні температуру і тривалість випалювання, вид палива, коефіцієнт надлишку повітря, розміри шматків вапняку та ін

Науково обґрунтованих вимог до ступеня очищення вапняного молока і до його якості, поки немає. Вважається, що чим меншу кількість домішок містить молоко, тим вище його якість. Проте, з іншого боку, чим вищий ступінь очищення, тим вищі витрати на його здійснення і тим більше втрачається активного оксиду CaO з відходами з апаратів тонкого очищення.

Таким чином, на підставі проведених експериментальних дослідів під час приготування вапняного молока (вапновмісних розчинів) рекомендується дотримуватися таких вимог:

- гасити вапно необхідно водою або оборотними розчинами з температурою не менше 80-85 °С;
- час гасіння вапна (перебування вапна в гасителі) не повинен перевищувати 15 хв;
- вапняне молоко слід очищати від від незгашених частинок розміром більше 3 мм;
- вміст домішок (CaSO<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SiO<sub>2</sub>), які негативно впливають на швидкість гасіння повинен бути мінімальним.

Проведеними дослідженнями встановлено, що для поліпшення якості одержуваного вапна слід відсівати дрібну фракція вапняку (частинки з

розмірами до 40 мм). Такий захід також створить більш сприятливі умови і поліпшить процес випалювання вапняку в шахтних печах.

Якісне вапняне молоко з хорошим гранулометричним складом можна отримувати гасінням вапна оборотним розчином при дозуванні вапна не більше 130 г/л активного оксиду кальцію.

На підставі теоретичних досліджень та аналізу роботи печей випалювання вапняку на глиноземному підприємстві запропоновано організаційно-технічні заходи для вдосконалення технології випалювання в печах шахтного типу:

а) модернізація існуючих печей з встановленням нових завантажувально-розподільчих і вивантажувального пристроїв, до складу яких входить додатковий другий клапан і частотний перетворювач на приводі вивантажувального пристрою;

б) впровадження автоматизації завантаження печі і процесу випалювання;

в) покращення якості вапняку і палива шляхом їх сортування з відокремленням дрібних частинок розміром до 40 мм;

г) приведення гранулометричного складу вапняку у відповідність з корисною висотою шахти печі;

д) дотримання технологічних норм і вимог щодо проведення процесу випалювання вапняку.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на дослідника в металургійній лабораторії

Під час роботи в приміщенні металургійної лабораторії на людину можуть негативно впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі чинники за ГОСТ 12.0.003-74 [27]: а) небезпека ураження електричним струмом; б) підвищена або знижена температура повітря; в) надмірна запиленість і загазованість повітря; г) підвищена або знижена вологість повітря; д) підвищений рівень тепловиділення; е) небезпека отруєння парами хімічних речовин; є) недостатня освітленість робочого місця.

При роботі в металургійній лабораторії [38] слід важати, що всі хімічні речовини в тому чи іншому ступеню є отруйними. За ступенем впливу на організм шкідливі речовини поділяються на чотири класи безпеки. При роботі з хімічними речовинами слід запобігти можливості їх проникнення в організм людини через легені, шкіру та рот.

Робота з скляним посудом є також небезпечним чинником. Нещасні випадків при роботі зі склом, а саме порізи рук, призводять до мікротравм (після яких можна продовжувати роботу) і легких травм (втрата працездатності на один або кілька днів), а також опіки рук при перенесенні скляного посуду з киплячою рідиною.

Основними шкідливими чинниками в приміщенні металургійній лабораторії [28] є отруєння хімічними речовинами та їх сполуками в разі аварії та небезпека ураження електричним струмом.

Металургійна лабораторія є приміщенням легкої категорії (виконуються легкі фізичні роботи), тому повинні дотримуватися такі вимоги:

- оптимальна температура повітря – 22 °С (допустима – 20–24 °С);
- оптимальна відносна вологість повітря – 40–60 % (допустима – не більше 75 %);

– швидкість руху повітря не більше 0,1 м/с.

Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів та карта умов праці для робочого місця дослідника щодо гашення вапна надано в табл. 4.1 [28-30].

Таблиця 4.1 – Оцінка чинників виробничого та трудового процесу

№	Чинники виробничого середовища і процесу праці	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови			Тривалість дії чинників за зміну, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> 3-4 клас безпеки:						
	вапняк	6,0	2,0	–	–	–	30
	вапно	6,0	2,1	–	–	–	30
	гашене вапно	6,0	0,32	–	–	–	30
2	Неіонізуючі випромінювання: - діапазон промислової частоти, кВ/м	20	10	–	–	–	35
3	Мікроклімат в приміщенні:						
	- температура повітря, °С	21-25	22	–	6	–	100
	- швидкість руху повітря, м/с	до 0,2	0,1	–	–	–	90
	- відносна вологість повітря, %	до 75	60	–	–	–	100
4	Категорія важкості і напруженість праці	Категорія праці – легка, категорія напруженості праці – мало напружена					

Таким чином, проведений аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в металургійній лабораторії під час дослідження гасіння вапна, отриманого після випалювання вапняку, характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

## 4.2 Заходи з поліпшення умов праці

Для поліпшення умов праці та очищення повітря металургійну лабораторію потрібно обладнати загальнообмінною примусовою вентиляцією, а місця можливого накопичення шкідливих хімічних речовин – витяжними шафами.

Всі роботи з хімічними газоподібними речовинами, а також леткими рідинами або тими, які димлять слід проводити тільки у витяжних шафах. Під тягою слід розмістити також сушильні шафи, в яких проводять сушіння речовин від органічних розчинників. Для створення достатнього освітлення витяжні шафи повинні бути обладнані світильниками у вибухобезпечному виконанні. Штепсельні розетки і вимикачі повинні бути розташовані поза витяжною шафою. Постійно діюча вентиляція повинна забезпечувати п'ятиразовий повітрообмін.

Для створення безпечної роботи зі скляним посудом і приладами слід переконатися у цілісності посуду (повинно бути без тріщин і інших ушкоджень), не класти на край столу, краї стола забезпечити захисною смугою, щоб зачіпливий ліктями чи рукавами халату скляний посуд не перекинувся. При складанні приладів не слід застосовувати великих зусиль. Нагрівати на електроплитці потрібно тільки термостійкі склянки і колби, простеживши попередньо, щоб зовнішня поверхня судини була сухою.

Для створення і автоматичної підтримки оптимальних значень температури, вологості і швидкості руху повітря в холодну пору року в лабораторії потрібно використовувати водяне опалення, в теплу пору року застосовувати для охолодження повітря кондиціонери, які за допомогою приладів автоматичного регулювання підтримують в приміщенні задані параметри повітряного середовища.

Для того щоб поліпшити природне освітлення лабораторії, що здійснюється через віконні отвори і є дуже слабким, на робочому місці слід

застосовувати також й штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають за потреби, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість.

Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які трапляються при проведенні дослідження особливостей гашення вапна, надано в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Найменування шкідливого виробничого фактору	Параметр (норма)	Значення параметра на робочому місці	Характер дії на організм людини	Засоби захисту
Електричний струм	0,01А	Опір заземлення має бути не більше 10 Ом, опір ізоляції по паспорту на устаткування	Електрошок, електротравма, електроудар, термічні опіки тіла, зупинка роботи серця і дихання	Діелектричні рукавиці
<p>Джерело: Електрична піч опору, муфільна електропіч.            Заходи запобігання: Корпуси печей мають бути надійно заземленими.            Строго стежити за станом електроізоляції і заземлення устаткування.            Всі поверхні устаткування мають бути чистими і сухими.</p>				

Для захисту і попередження шкідливої дії хімічних речовин слід застосовувати засоби індивідуального захисту (халат, нарукавники, рукавиці гумові, рукавиці бавовняні, захисні окуляри), виконувати правила гігієни і працювати під витяжною шафою.

### 4.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат визначається сукупністю фізичних параметрів повітряного середовища, таких як температура, швидкість руху, вологість і барометричний тиск повітря, температура поверхонь, що оточують людину, та інтенсивність інфрачервоного випромінювання. Кількість тепла, що утворюється в організмі

людини, залежить від фізичних навантажень, а рівень тепловіддачі – від мікрокліматичних умов, переважно температури повітря.

Згідно з категорії виконуваних робіт, важкості та характеристикою приміщення стосовно надлишку тепловипромінювання, з урахуванням періоду року встановлюють значення показників мікроклімату, базуючись на вимогах санітарних норм зведених в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Нормовані величини температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура, °C					Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима				Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних, не більш	Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних
			верхня межа		нижня межа					
			на робочих місцях							
постійних	непостійних	постійних	непостійних							
Холодний	Легка	21-23	24	25	20	17	40-60	75	0,1	не більше 0
Теплий	Легка	22-24	28	30	21	19	40-60	60 (при 27 °C)	0,2	0,1-0,3

Освітлення виробничих приміщень. Вплив світла спостерігається на функцію зору та на діяльність організму в цілому (посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу). Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад гостроти зору; світлові відблиски – тимчасове засліплення.



Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути природним, штучним і суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним [29]. Для створення сприятливих умов зорової роботи для виконання роботи середньої точності використовуємо такі норми освітлення, які зазначені в табл. 4.4 і табл. 4.5.

Таблиця 4.4 – Нормовані значення природного освітлення для виробничих процесів за СНіП І-4-79

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкту для розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Коефіцієнт природного освітлення $e_n$ , %	
			При верхньому і комбінованому освітленні	При звичайному освітленні
Середньої точності	0,5-0,1	IV	3,6	1,4

Таблиця 4.5 – Норми освітлення штучним світлом за СНіП ІІ-4-79

Характеристика роботи	Розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд роботи	Під-розряд роботи	Контраст об'єкта з фоном	Фон	Найменше освітлення, Лк			
						При газорозрядних		При лампах розжарювання	
						Комбіноване	Загальне	Комбіноване	Загальне
Середньої точності	0,5-1	IV	Г	Великий	Світлий	300	150	300	100

Вентиляція є сукупністю заходів і пристроїв, необхідних для забезпечення заданої якості повітряного середовища в робочих приміщеннях. В умовах виробництва вентиляція може бути: природна та механічна (за способом переміщення повітря), місцева та загальна (за формою організації повітрообміну). Вентиляційні установки можуть бути витяжними, що призначені для видалення повітря, та припливними, які здійснюють подачу повітря [28].

Повітрообмін при природній вентиляції відбувається за рахунок різниці температур, а отже, і питомої маси повітря всередині виробничого приміщення

і поза ним. Природна вентиляція виробничих приміщень може бути неорганізованою (провітрювання) і організованою (аерація). На відміну від природної механічна дозволяє виробляти попередню обробку припливного повітря (зволоження, нагрів або охолодження і очищення). Загальна вентиляція застосовується коли шкідливі речовини, надлишкове тепло і волога виділяються розосереджено по всьому робочому приміщенню і видалити їх за допомогою місцевих відсмоктувань технічно не можливо, а також в тих випадках, коли необхідно розбавити до ГДК залишки повітря, що не видаляється місцевими відсмоктуваннями. Рециркуляція повітря в системах припливно-витяжної вентиляції застосовується в холодну і перехідну пору року. При рециркуляції частина повітря, що видаляється з приміщення після відповідного очищення від шкідливих речовин, знову прямує в приміщення.

Висновки. Проведений аналіз шкідливих і небезпечних факторів в металургійній лабораторії дозволяє зробити висновок, що умови праці під час дослідження гасіння вапна, отриманого після випалювання вапняку, характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

## 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

### 5.1 Організація виконання науково-дослідницької роботи

#### 5.1.1 Планування етапів науково-дослідницької роботи

Планування науково-дослідницької роботи (НДР) включає визначення складу та послідовності виконання етапів і робіт по них, їх трудомісткості, тривалості і календарних строків виконання [31,32].

У проведенні дослідження щодо випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему, можна виділити наступні етапи, наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Етапи НДР з дослідження випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему

Номер етапу	Етап НДР	Зміст етапу
1	Літературний огляд і постановка задачі	1.1 Видача завдання. 1.2 Збір, вивчення, аналіз інформації по вітчизняним й закордонним джерелам. 1.3 Узгодження й твердження мети й завдання дослідження. 1.4 Виявлення можливих напрямків дослідження. 1.5 Затвердження програми дослідження. 1.6 Вибір состава виконавців.
2	Теоретичні дослідження	Розробка методики дослідження
3	Експериментальні дослідження	Проведення досліджень з випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему
4	Узагальнення й оцінка результатів дослідження	4.1 Аналіз й обробка експериментальних даних 4.2 Виконання графічної частини
5	Завершальний	5.1 Приймання дослідницької роботи 5.2 Захист дослідницької роботи

### 5.1.2 Визначення трудомісткості виконання НДР

Для визначення трудомісткості запланованих робіт найбільш часто застосовується метод імовірних оцінок. Його суть полягає в тому, що безпосередній виконавець робіт оцінює максимальну  $T_{\max i}$  і мінімальну  $T_{\min i}$  трудомісткість роботи. На основі цих оцінок визначається очікувана трудомісткість  $T_{\text{оч}i}$  (чол·днів) робіт за формулою [31]:

$$T_{\text{оч}i} = \frac{3T_{\min i} + 2T_{\max i}}{5}, \quad (5.1)$$

де  $T_{\max i}$  – максимальна трудомісткість роботи;

$T_{\min i}$  – мінімальна трудомісткість роботи;

$T_{\text{оч}i}$  – очікувана трудомісткість.

Визначаємо трудомісткість першого етапу:

$$T_{\text{оч}1} = \frac{3 \cdot 7 + 2 \cdot 10}{5} = 8 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість другого етапу:

$$T_{\text{оч}2} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 8}{5} = 7 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість третього етапу:

$$T_{\text{оч}3} = \frac{3 \cdot 22 + 2 \cdot 26}{5} = 24 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість четвертого етапу:

$$T_{\text{оч}4} = \frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 10}{5} = 9 \text{ чол.·днів.}$$

Визначаємо трудомісткість п'ятого етапу:

$$T_{\text{оч}5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 7}{5} = 5 \text{ чол.} \cdot \text{днів.}$$

### 5.1.3 Визначення числа виконавців НДР

У таблиці 5.2 наведена кількість виконавців необхідних для виконання НДР.

Таблиця 5.2 – Кількість виконавців НДР

Номер етапу	Виконавець НДР	Кількість виконавців
1	Дослідник	1
2	Дослідник, провідний інженер	2
3	Дослідник, провідний інженер, старший науковий співробітник, лаборант-вимірник	4
4	Дослідник, провідний інженер	2
5	Дослідник	1

### 5.1.4 Розрахунок тривалості етапів НДР

Тривалість етапів дослідження  $t_{\text{оч}i}$  розраховується за формулою:

$$t_{\text{оч}i} = \frac{T_{\text{оч}i}}{P_i \cdot K_{\text{вн}}}, \quad (5.2)$$

де  $T_{\text{оч}i}$  – очікувана трудомісткість виконання даної роботи, чол.-днів;

$P_i$  – кількість виконавців, чол.;

$K_{\text{вн}}$  – коефіцієнт виконання норми,  $K_{\text{вн}}=0,95$ .

Тривалість 1 етапу:

$$t_{\text{оч1}} = \frac{8}{1 \cdot 0,95} = 8,42 \approx 8 \text{ дн.}$$

Тривалість 2 етапу:

$$t_{\text{оч2}} = \frac{7}{2 \cdot 0,95} = 3,68 \approx 4 \text{ дн.}$$

Тривалість 3 етапу:

$$t_{\text{оч3}} = \frac{24}{4 \cdot 0,95} = 6,32 \approx 6 \text{ дн.}$$

Тривалість 4 етапу:

$$t_{\text{оч4}} = \frac{9}{2 \cdot 0,95} = 4,74 \approx 5 \text{ дн.}$$

Тривалість 5 етапу:

$$t_{\text{оч5}} = \frac{5}{1 \cdot 0,95} = 5,26 \approx 5 \text{ дн.}$$

### **5.1.5 Побудова стрічкового графіка проведення науково-дослідної роботи**

При невеликій кількості робіт з етапів і виконавців, основним документом планування виконання НДР є стрічковий графік.

Відрізком горизонтальної прямої показується тривалість етапу роботи від першого до останнього дня роботи. За розрахованими даними будемо стрічковий графік, що наведений у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Стрічковий графік проведення науково-дослідної роботи

Етапи	Трудомісткість, чол. днів	Кількість виконавців, чол.	Тривалість етапів, днів	Виконання робіт у робочі дні																											
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	8	1	8	■																											
2	7	2	4		■																										
3	24	4	6							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■											
4	9	2	5																		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5	3	1	3																												■

Загальна тривалість робіт склала 28 днів.

## 5.2 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження

Кошторисну калькуляцію складають на весь обсяг робіт по темі. Для визначення витрат для проведення дослідження необхідно розрахувати:

- витрати на основні матеріали;
- витрати на заробітну плату;
- витрати на амортизацію використаного обладнання;
- витрати на електроенергію;
- накладні витрати.

### 5.2.1 Розрахунок витрат на основні матеріали

У дану статтю включаються всі витрати на придбання матеріалів, покупних виробів і напівфабрикатів, необхідних для безпосереднього виконання роботи.

Витрати на основні матеріали при виконанні НДР показано в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Розрахунок вартості матеріалів по НДР

Найменування матеріалів	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за кг, грн	Усього витрат, грн
Вапняк	кг	20,0	45,00	900,00
Вапно	кг	10,0	100,00	1000,00
Технічна вода	м <sup>3</sup>	0,08	500,00	40,09
Разом				1940,00

### 5.2.2 Розрахунок витрат на амортизацію обладнання

Витрати на амортизацію  $S_{ам}$  використаного при дослідженнях обладнання визначаються за формулою:



$$S_{\text{ам}} = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_{\text{ам}i}}{100} \cdot K_i \cdot \frac{T_{\text{др}}}{T_p}, \quad (5.4)$$

де  $\alpha_{\text{ам}i}$  – норма амортизаційних відрахувань для даного виду обладнання або приладу приймаємо 15%;

$K_i$  – вартість обладнання або приладу  $i$ -го виду, грн;

$T_{\text{др}}$  – тривалість використання даного  $i$ -го виду обладнання або приладу в дослідницькій роботі, години;

$T_p$  – можливе число годин використання обладнання або приладів на протязі року.

При однозмінній роботі  $T_p$  приймається 2000 годин.

Розрахунок витрат на амортизацію обладнання й приладів наведений в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Витрати на амортизацію обладнання

Найменування обладнання	Кількість одиниць	Ціна за одиницю, грн.	Норма амортизації, %	Тривалість використання, год.	Усього, грн.
Сушильна шафа	1	10000	15	20	15,00
Шахтна електропіч	1	58000	15	20	87,00
Спектрометр	1	400000	15	4	120,00
Разом					222,00

### 5.2.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Вартість електроенергії  $S_e$  витраченої на проведення дослідження визначають за формулою:

$$S_e = \sum_{i=1}^N T_e \cdot N_{ci} \cdot T_{vi} \cdot m_i, \quad (5.5)$$

де  $T_e$  – тариф за кожен споживаний кВт/годину, грн;

$N_{ci}$  – середня споживана потужність  $i$ -го виду обладнання, кВт;

$T_{vi}$  – час використання  $i$ -го виду обладнання або приладу, година/цикл;

$m_i$  – кількість обладнання  $i$ -го виду, примірників.

Тариф за 1 кВт електроенергії з урахуванням ПДВ становить 2,40 грн.

Розрахунок витрат на електроенергію наведений у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Кількість одиниць	Потужність, кВт	Число годин використання, година	Тариф за 1кВт-год, грн.	Усього витрат, грн.
Сушильна шафа	1	3,5	20	2,40	168,00
Шахтна електропіч	1	8,2	20	2,40	393,60
Спектрометр	1	1,4	4	2,40	13,44
Разом					575,04

#### 5.2.4 Розрахунок заробітної плати й відрахувань

У розрахунок заробітної плати входять наступні статті: основна заробітна плата наукових, інженерно-технічних і допоміжних працівників, зайнятих виконанням робіт з теми; додаткова заробітна плата, що включає виплати по оплаті чергових і додаткових відпусток, на виконання державних і суспільних доручень, винагороди.

Величина заробітної плати по темі може бути розрахована за формою представленої в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Величина заробітної плати

Виконавець	Кількість, чол.	Оклад, грн.	Тривалість, дні	Оплата праці, грн.
Провідний інженер	1	12500	15	8928,57
Лаборант	1	8100	6	2314,29
Старший науковий співробітник	1	17000	6	4857,14
Разом				16100,00

Заробітна плата виконавців НДР  $Z_{\text{осн}}$  розраховується за формулою:

$$Z_{\text{осн}} = \frac{Z_{\text{окл}}}{T_{\text{міс}}} \cdot T_{\text{ет}}, \quad (5.6)$$

де  $Z_{\text{окл}}$  – посадовий оклад, грн;

$T_{\text{міс}}$  – кількість робочих днів у місяці, днів;

$T_{\text{ет}}$  – тривалість певного етапу, днів.

Заробітна плата провідного інженера  $Z_{\text{осн}}^{\text{і-к}}$  :

$$Z_{\text{осн}}^{\text{і-к}} = \frac{12500}{21} \cdot 15 = 8928,57 \text{ грн.}$$

Заробітна плата лаборанта-технолога  $Z_{\text{осн}}^{\text{л-в}}$  :

$$Z_{\text{осн}}^{\text{л-т}} = \frac{8100}{21} \cdot 6 = 2314,29 \text{ грн.}$$

Заробітна плата старшого наукового співробітника  $Z_{\text{осн}}^{\text{пл.}}$  :

$$Z_{\text{осн}}^{\text{с.н.с.}} = \frac{17000}{21} \cdot 6 = 4857,14 \text{ грн.}$$

Премія  $Z_{\text{пр}}$  становить 20 % від основної заробітної плати і розраховується за формулою:

$$Z_{\text{пр}} = \frac{Z_{\text{осн}} \cdot 20}{100}. \quad (5.7)$$

Премія виконавців НДР:

$$Z_{\text{пр}}^{\text{і-к}} = \frac{8928,57 \cdot 20}{100} = 1785,71 \text{ грн.};$$

$$Z_{\text{пр}}^{\text{л-т}} = \frac{2314,29 \cdot 20}{100} = 462,86 \text{ грн.};$$

$$Z_{\text{пр}}^{\text{с.н.с.}} = \frac{4857,00 \cdot 20}{100} = 971,43 \text{ грн.}$$

Загальна заробітна плата виконавців НДР розраховується по формулі:

$$Z_{\text{заг}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{дод}}, \quad (5.8)$$

де  $Z_{\text{дод}}$  – додаткова заробітна плата виконавців (10 % від  $(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{пр}})$ ).

$$Z_{\text{заг}} = 16100,00 + 1932,00 = 18032,00 \text{ грн.}$$

Нарахування на фонд оплати праці  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФОП}}$  становить 37,5 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФОП}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 37,5}{100}. \quad (5.9)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФОП}} = \frac{18032,00 \cdot 37,5}{100} = 6762,00 \text{ грн.}$$

З них:

– у фонд державного соціального страхування  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФДСС}}$  становить 2,5 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФДСС}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 2,5}{100}. \quad (5.10)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФДСС}} = \frac{18032,00 \cdot 2,5}{100} = 450,80 \text{ грн.};$$

– у пенсійний фонд  $Z_{\text{нар}}^{\text{ПФ}}$  становить 32 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ПФ}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 32,0}{100}. \quad (5.11)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ПФ}} = \frac{18032,00 \cdot 32,0}{100} = 5770,24 \text{ грн.};$$

– у фонд безробіття  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФБ}}$  становить 1,5 %:

$$З_{\text{нар}}^{\text{ФБ}} = \frac{З_{\text{заг}} \cdot 1,5}{100}. \quad (5.12)$$

$$З_{\text{нар}}^{\text{ФБ}} = \frac{18032,00 \cdot 1,5}{100} = 270,48 \text{ грн.};$$

– у фонд соціального страхування від нещасного випадку  $З_{\text{нар}}^{\text{ФНВ}}$  становить 1,5 %:

$$З_{\text{нар}}^{\text{ФНВ}} = \frac{З_{\text{заг}} \cdot 1,5}{100}. \quad (5.13)$$

$$З_{\text{нар}}^{\text{ФНВ}} = \frac{18032,00 \cdot 1,5}{100} = 270,48 \text{ грн.}$$

### 5.2.5 Накладні витрати

Накладні витрати  $H_{\text{в}}$  становлять 40 % від фонду оплати праці:

$$H_{\text{в}} = \frac{З_{\text{заг}} \cdot 40}{100}. \quad (5.14)$$

$$H_{\text{в}} = \frac{18032,00 \cdot 40}{100} = 7212,80 \text{ грн.}$$

### 5.2.6 Зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Кошторис витрат на науково-дослідну роботу визначається на весь обсяг виконаних робіт.

Кошторис витрат наведений у таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Статті витрат	Усього витрат	
	грн.	%
1. Витрати на матеріали	1940,00	5,58
2. Основна заробітна плата	16100,00	46,34
3. Додаткова заробітна плата	1932,00	5,56
4. Нарахування на фонд оплати праці (37,5 %):	6762,00	19,46
– на держ. соцстрах (2,5 %)	450,80	1,29
– пенсійний фонд (32 %)	5770,24	16,61
– у фонд безробіття (1,5 %)	270,48	0,78
– у фонд соц. страхування від нещасного випадку (1,5 %)	270,48	0,78
5. Амортизаційні відрахування	222,00	0,64
6. Витрати на електроенергію	575,04	1,66
7. Накладні витрати	7212,80	20,76
Разом	34743,84	100,00

В результаті проведення науково-дослідної роботи в організаційній частині був побудований стрічковий календарний план. Загальна тривалість виконання науково-дослідної роботи склала 28 днів. В економічній частині розрахований зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідницької роботи. Загальні витрати на проведення роботи склали 34743,84 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі теоретичних досліджень для випалювання вапняку в виробництві глинозему доцільно використовувати шахтні печі. Визначено, що низька якість вапняку, що використовується для випалювання в печах, є однією з основних причин низьких показників роботи багатьох вапняних ділянок глиноземного виробництва.

На підставі обчислення розрахункових величин виходу вільного вапна встановлено, що використання більш дешевого вапняку із меншим вмістом карбонату кальцію та більшою кількістю домішок може призвести до значного, майже в 1,5 рази падіння фактичної продуктивності печі за величиною вільного вапна. Умовно можна вважати, що кожен 1 кг домішок, що завантажується в піч як забруднення, так і у складі компонентів вапняку або палива зв'язує 1 кг випаленого вапна. Отже, в першу чергу необхідно покращити гранулометричний склад вапняку.

Термодинамічним аналізом випалювання карбонатної сировини встановлено, що для зміщення реакції вправо слід забезпечити підведення теплоти протягом всього процесу розкладання  $\text{CaCO}_3$  за температур в інтервалі 273-1173 К і розкладання  $\text{MgCO}_3$  за температур в інтервалі 273-573 К.

Кінетика процесу дисоціації  $\text{CaCO}_3$  залежить від температури і ступеню зміщення системи від рівноважного стану. Лімітуючою стадією процесу дисоціації є утворення кристалічних зародків  $\text{CaO}$ . На температуру дисоціації  $\text{CaCO}_3$  впливають температура газового середовища і вміст діоксиду вуглецю в ньому. Тривалість процесу дисоціації визначається також розміром шматків випалюваного вапняку. Швидкість просування фронту дисоціації у крейді вища, ніж у вапняку. Оскільки крейда більш пориста, а також температурний перепад між газовим потоком і реакційною зоною для карбонатних порід різного ступеня дисперсності є неоднаковим. При підвищенні температури вище допустимої може статися утворення більш або менш великих мас

спікшихся шматків вапна («козлів»), що порушує режим роботи печі випалювання.

Термодинамічним аналізом процесу гасіння вапна встановлено, що цей процес супроводжується великим екзотермічним ефектом.

Процес гідратації вапна є багатостадійним, стадії якого можуть накладатися або заміщувати одна одну. Експериментально визначено, що реакція гасіння вапна водою лімітується дифузійними процесами.

Гасіння вапна відбувається також зі збільшенням об'єму твердої фази і диспергування вапна. Найбільший вплив на процес гідратації мають вид, структура та хімічний склад вихідної карбонатної породи, а також умови її випалювання. Тому для кожної конкретної карбонатної сировини потрібно встановлювати оптимальні температуру і тривалість випалювання, вид палива, коефіцієнт надлишку повітря, розміри шматків вапняку та ін.

На підставі експериментальних досліджень розроблено рекомендації щодо вдосконалення технології випалювання вапняку і гасіння вапна в виробництві глинозему.

Для поліпшення якості одержуваного вапна слід відсівати дрібну фракція вапняку (частинки з розмірами до 40 мм). Такий захід також створить більш сприятливі умови і поліпшить процес випалювання вапняку в шахтних печах.

Якісне вапняне молоко з хорошим гранулометричним складом можна отримувати гасінням вапна оборотним розчином при дозуванні вапна не більше 130 г/л активного оксиду кальцію.

На підставі теоретичних досліджень та аналізу роботи діючих печей випалювання вапняку на глиноземному підприємстві запропоновано організаційно-технічні заходи для вдосконалення технології випалювання в печах шахтного типу:

а) модернізація діючих шахтних печей з встановленням нових завантажувально-розподільчих і вивантажувального пристроїв, до складу яких



входить додатковий другий клапан і частотний перетворювач на приводі вивантажувального пристрою;

б) впровадження автоматизації завантаження печі і процесу випалювання;

в) покращення якості вапняку і палива шляхом їх сортування з відокремленням дрібних частинок розміром до 40 мм;

г) приведення гранулометричного складу вапняку у відповідність з корисною висотою шахти печі;

д) дотримання технологічних норм і вимог щодо проведення процесу випалювання вапняку.

Впровадження схеми автоматизації завантажування і вирівнювання рівня шихти в шахтних печах випалювання вапняку дозволить зменшити питомі витрати палива на 2-3 % від загальних витрат.

Проведений аналіз шкідливих і небезпечних факторів в металургійній лабораторії дозволяє зробити висновок, що умови праці під час дослідження гасіння вапна, отриманого після випалювання вапняку, характеризуються наявністю нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

В результаті проведення науково-дослідної роботи в організаційній частині побудований стрічковий календарний план. Загальна тривалість виконання науково-дослідної роботи склала 28 днів. В економічній частині розрахований зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідницької роботи. Загальні витрати на проведення роботи склали 34743,84 грн.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Насекан Ю. П. Виробництво глинозему : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 190 с.
2. Иванов А. И., Насекан Ю. П., Иванова Л. П. Технология производства глинозема : монография. Запорожье : ЗГИА, 2005 . 262 с.
3. Москвитин В. И., Николаев И. В., Фомин Б. А. Металлургия легких металлов : учебник. Москва : Интермет Инжиниринг, 2005. 416 с. URL: [http:// www.twirpx.com/file/65688/](http://www.twirpx.com/file/65688/) (дата звернення: 14.09.2020).
4. Металлургия алюминия : учеб. пособие / Ю. В. Борисоглебский и др. Новосибирск : Наука, 1999. 438 с. URL: <http://ebooks.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi12/0009536.djvu> (дата звернення: 14.09.2020).
5. Иванов А. И. Производство глинозема. Николаев : НГЗ, 1998. 140 с.
6. Иванов А. И., Кириченко Р. И., Кожевников Г. Н., Полещук А. А. Бокситы – комплексное сырье. Запорожье : Лана-друк, 2005. 220 с.
7. Бойнтон Р. С. Химия и технология извести / Пер. с англ.; под ред. Б. Н. Виноградова. Москва : Стройиздат, 1972. 240 с.
8. Монастырёв А. В. Производство извести. Москва : Высшая школа, 1971. 272 с.
9. Табунщиков Н. П. Производство извести. Москва : Химия, 1974. 240 с.
10. Дресвянникова Е. А., Готулева Ю. В. Энергосберегающие технологии при производстве строительных материалов. *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 8–2. С. 301–302.
11. Нестеров А. В., Датукашвили Д. О. Производство кальциевой извести в России. *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 52–59.
12. Голота К.О., Нестеренко Т.М. Аналіз та вдосконалення технології випалу вапняку в виробництві глинозему. *Металургія як основа сучасної промисловості* : матеріали XXV наук.-техн. конф. студентів, магістрантів,

- аспірантів, молодих вчених та викладачів, м.Запоріжжя, 24-27 лист. 2020 р.  
Запоріжжя : ІННІ ЗНУ, 2020. С. 5.
13. ТИ 36:2015. Производство извести : Технологическая инструкция ООО «Николаевский глиноземный завод» / В. В. Красноярский, А.А. Пустоводов. [Чинна від 2015-05-10]. Николаев : ООО «НГЗ», 2019. 25 с.
  14. Нестеров А. В., Батыжев Д. З. Новая жизнь шахтных печей. *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 49–52.
  15. Монастырёв А. В., Галиахметов Р. Ф. Печи для производства извести. Воронеж : Истоки, 2011. 392 с.
  16. Патент РФ 2079785. Газовая горелка / Калашников Л. В., Калашников Г. Л. Заявл. 13.04.1995. Опубл. 20.05.1997.
  17. Монастырёв А. В. Проекты эффективных шахтных и вращающихся печей с низким расходом топлива мощностью 200–600 т/сут извести. *Строительные материалы*. 2012. № 2. С. 26–28.
  18. Монастырёв А. В. Пути снижения расхода топлива при обжиге мела с получением извести в длинных вращающихся печах. *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 9–15.
  19. Ансимов А. А., Меркер Э. Э. Теплотехнические особенности производства извести во вращающихся печах обжига известняка. *Черная металлургия*. 2015. №1. С. 66–73.
  20. Гамей А. И., Медведев А. В., Гаврилюк А. И. Освоение технологи обжига известняка во вращающихся печах. *Черная металлургия*. 2002. №6. С. 3–5.
  21. Нехлебаев Ю. П. Экономия топлива при производстве извести. Москва : Металлургия, 1987. 136 с.
  22. Голота К.О., Нестеренко Т.М. Про модернізацію газоочисних споруд печей випалу вапняку для виробництва глинозему. *Металургія як основа сучасної промисловості* : матеріали ХХІV наук.-техн. конф. студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів, м.Запоріжжя, 26-29 лист. 2019 р. Запоріжжя : ІІ ЗНУ, 2019. С. 9–10.

23. Металургійна термодинаміка : методичні вказівки до практичних занять, самостійної роботи та виконання контрольних завдань / І. Ф. Червоний та ін. ; під заг. ред. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 75 с.
24. Волков В. С., Пелькис П. С. Справочник физико-химических характеристик различных веществ. Киев : Наукова думка, 1987. С.73–87.
25. Гурвич, Л. В. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справочное издание в 4-х т. / Л. В. Гурвич и др. ; под ред. Л. В. Гурвич. 3-е изд., перераб. и расширен. Т.IV. Кн. 1. Москва : Наука, 1982. 623 с.
26. Краткий справочник физико-химических величин : справочник / Н. М. Барон и др. ; под ред. А. А. Равделя, А. М. Пономаревой. Ленинград : Химия, 1998. 232 с.
27. Охорона праці : навч. посіб. / Я. І. Бедрій та ін. Львів : Афіша , 1997. 258 с.
28. Гандзюк М. П., Желібо Е. П., Халимовський М. О. Основи охорони праці : підручник. Київ : Каравела, 2005. 393 с.
29. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. Львів : Афіша, 2002. 318 с.
30. Кожемякін Г. Б., Рижков В. Г., Белоконь К. В. Охорона праці та техногенна безпека : метод. вказівки до виконання розділу магістерських робіт. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 48 с.
31. Тюріна Н. М., Ведерніков М. Д., Капінос Г. І. Економіка промислового підприємства : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2008. 311 с.
32. Іващенко О. М. Методичні рекомендації до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту : метод. вказівки. Запоріжжя : ЗДІА, 2004. 31 с.