



**ЦЕНТР  
РЕСУРСОЕФЕКТИВНОГО  
ТА ЧИСТОГО ВИРОБНИЦТВА**

# **ДОВІДНИК З РЕСУРСОЕФЕКТИВНОГО ТА ЧИСТОГО ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТНА ПРОМИСЛОВІСТЬ**

Січень, 2020

**ДОВІДНИК З РЕСУРСОЕФЕКТИВНОГО ТА ЧИСТОГО ВИРОБНИЦТВА.  
ЦЕМЕНТНА ПРОМИСЛОВІСТЬ / С.В. Плашихін. – К.: Центр  
ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. – 96 с.**

Дану публікацію розроблено в рамках проекту «Сприяння адаптації та впровадженню ресурсоефективного та більш чистого виробництва шляхом створення і роботи Центру більш чистого виробництва в Україні», який виконується Організацією Об'єднаних Націй з промислового розвитку (ЮНІДО) та національним Центром ресурсоефективного та чистого виробництва (ЦРЕЧВ). Донорами проекту є уряди Швейцарії та Австрії.

До цієї роботи не застосовувалося офіційне редагування ООН. Використані формулювання та виклад матеріалу не виражають жодної думки Секретаріату ЮНІДО щодо правового статусу тієї чи іншої країни, території, населеного пункту або їхньої влади, або щодо делімітації їхніх кордонів, або економічної системи, або рівня розвитку.

Такі визначення, як «розвинені», «промислово розвинені» і «ті, що розвиваються», призначені для статистичних цілей та не обов'язково виражають судження про стадію розвитку, яка досягнута конкретною країною чи регіоном. Згадування назв фірм або комерційних продуктів не означає їхнього схвалення з боку ЮНІДО.

Вибір проектів для відображення участі ЮНІДО спрямований на демонстрацію їх розмаху та географічного й тематичного різноманіття. Цей вибір не є затвердженим ЮНІДО.



**Організація Об'єднаних Націй з  
промислового розвитку**

Віденський міжнародний центр –  
а/с 300 - А1400 Відень – Австрія  
Тел.: (+43-1) 26026-0  
unido@unido.org  
www.unido.org



**Центр ресурсоефективного та чистого  
виробництва в Україні**

04116, м. Київ, вул. Старокиївська, 10Г,  
Бізнес-центр «Вектор»  
Тел.: (+380) 44-227-83-78  
info@recpc.org  
www.recpc.org

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	<b>6</b>
<b>1. Ресурсоефективне та чисте виробництво</b> .....	<b>7</b>
1.1. Що таке екологічно чисте виробництво? .....	7
1.2. Методологія РЕЧВ .....	9
1.3. Ресурсоефективні заходи та рішення. Загальні підходи .....	11
<b>2. Цементна галузь України. Загальні відомості</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Життєвий цикл та основні способи виробництва цементу</b> <b>17</b>	
3.1. Основні етапи життєвого циклу цементу .....	17
3.2. Основні способи виробництва цементу .....	19
3.3. Переваги та недоліки основних способів виробництва .....	20
<b>4. Загальна характеристика споживання і витрат ресурсів при виробництві цементу</b> .....	<b>24</b>
4.1. Матеріальний баланс процесу виробництва портландцементу .....	24
4.2. Питомі витрати сировинних матеріалів на виробництво 1 т портландцементного клінкеру і портландцементу .....	25
4.3. Питомі витрати палива на випал 1 т портландцементного клінкеру .....	27
4.4. Питомі витрати енергії на виробництво 1 т портландцементу .....	30
<b>5. Викиди шкідливих речовин при виробництві цементу</b> .....	<b>31</b>
5.1. Викиди пилу .....	31
5.1.1. Організовані викиди .....	31
5.1.2. Неорганізовані викиди .....	32
5.2. Викиди оксиду азоту .....	32

5.3. Викиди діоксиду сірки.....	33
5.4. Викиди оксиду та діоксиду вуглецю.....	34
5.5. Викиди металів та їх сполук.....	36
5.6. Викиди газоподібних хлоридів та фторидів .....	38
5.7. Викиди у воду.....	40
<b>6. Найкращі доступні технології при виробництві цементу ..</b>	<b>41</b>
6.1. Зниження питомих витрат сировинних матеріалів на виробництво 1 т портландцементного клінкеру і портландцементу.....	41
6.1.1. Використання відходів виробництва в ролі сировинних матеріалів при виробництві портландцементного клінкеру і цементу.....	43
6.2. Зниження питомих витрат палива на випал 1 т портландцементного клінкеру .....	45
6.2.1. Використання відходів як альтернативного палива .....	53
6.3. Зниження питомих витрат енергії на виробництво 1 т портландцементу .....	57
6.4. Зниження викидів шкідливих речовин при виробництві цементу .....	59
6.4.1. Зниження викидів пилу .....	59
6.4.1.1. Зниження викидів пилу з організованих джерел....	59
6.4.1.2. Зниження викидів пилу з неорганізованих джерел.....	60
6.4.2. Зниження викидів оксидів азоту NO <sub>x</sub> .....	62
6.4.3. Зниження викидів діоксиду сірки SO <sub>2</sub> .....	69
6.4.4. Зниження викидів монооксиду вуглецю CO .....	70

6.5. Моніторинг .....	72
<b>7. Економічні аспекти реалізації найкращих доступних технологій при виробництві цементу .....</b>	<b>74</b>
7.1. Вибір способу виробництва .....	74
7.2. Рекуперація енергії з печі та холодильника/додаткова генерація енергії .....	74
7.3. Оптимізація контролю технологічного процесу .....	74
7.4. Використання відходів як палива .....	75
7.5. Зниження викидів пилу.....	75
7.6. Зниження викидів NO <sub>x</sub> .....	80
7.7. Зниження викидів SO <sub>2</sub> .....	88
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>92</b>

## ВСТУП

Цей матеріал розроблено в рамках проекту Організації Об'єднаних Націй з промислового розвитку (ЮНІДО) щодо впровадження на підприємствах України методики з підвищення ефективності використання ресурсів – методики ресурсоефективного та чистого виробництва (РЕЧВ). Про низьку ефективність використання ресурсів на українських підприємствах багато разів наголошувалося на всіх інформаційних заходах та в публікаціях, присвячених цій темі. Але досі суттєвих зрушень у бік покращення ситуації немає. Центр ресурсоефективного та чистого виробництва (ЦРЕЧВ), аналізуючи ефективність використання ресурсів на підприємствах різних галузей виробництва в Україні, виконуючи технічний аудит підприємств та розробляючи пропозиції з підвищення ресурсоефективності, накопичив власний досвід із зазначених питань, а також вивчив світові практики у цій галузі.

Хоча методика більш чистого виробництва є універсальною, кожна галузь виробництва має свої особливості в питанні ресурсоефективності. У цьому керівному посібнику розглянуто практики з можливого підвищення ефективності використання ресурсів на підприємствах машинобудівних галузей виробництва.

Посібник призначений для працівників підприємств цементної промисловості – технологів, інженерів, керівництва, а також для експертів і консультантів, що займаються питаннями ресурсозбереження та екологічного менеджменту, працівників проектних організацій, співробітників галузевих асоціацій, державних службовців, які зацікавлені в підвищенні ефективності роботи підприємств галузі.

## 1. РЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ ТА ЧИСТЕ ВИРОБНИЦТВО

### 1.1. Що таке екологічно чисте виробництво?

Протягом життя людина використовує велику кількість речей і продуктів. Попит на товари та послуги стимулює виробництво, яке, відповідно, збільшує пропозицію. На задоволення потреб людей витрачаються значні ресурси, а також продукується велика кількість відходів. Така діяльність призводить здебільшого до негативних змін у довкіллі, від яких страждає і людина.



Рисунок 1.1 – Взаємний вплив довкілля, виробництва та споживача

Протягом багатьох років промислово розвинені країни поступово змінювали підходи до вирішення проблем деградації та забруднення довкілля [1]. Вони рухалися від ігнорування проблеми до розсіювання забруднення, щоб його наслідки були менш шкідливими або очевидними; далі до контролю забруднення із застосуванням очищення в місці викиду шкідливих речовин (без зміни технології виробництва); і, наприкінці, до профілактики забруднень та відходів у місці їх

утворення шляхом застосування підходу ресурсоефективного та чистого виробництва (РЕЧВ).

Поступовий перехід від «ігнорування» до «профілактики» завершився усвідомленням того, що можна досягти економії різноманітних ресурсів для промисловості одночасно із покращенням умов довкілля для суспільства.

Це, власне, і є метою РЕЧВ. **РЕЧВ** визначається як *безперервне застосування комплексної превентивної екологічної стратегії, що застосовується до процесів, продукції та послуг підприємства з метою підвищення загальної ефективності та зменшення ризиків для людей і навколишнього середовища [1].*

Для виробничих процесів РЕЧВ передбачає зменшення витрат сировини та енергії, усунення токсичної сировини та зменшення кількості й токсичності відходів і викидів. Для розробки продукції РЕЧВ застосовує зменшення несприятливого впливу за рахунок розгляду життєвого циклу продукту: від видобутку сировини до переробки та кінцевої утилізації непридатних для переробки відходів. Для сфери послуг РЕЧВ-концепція пропонує включати екологічні чинники у процес розробки та надання послуг.

Основна відмінність між контролем за забрудненням та РЕЧВ лежить у площині часу. Контроль за забрудненням – це підхід постфактум – «реагування та дію», тоді як РЕЧВ відображає проактивну філософію «передбачення та профілактики». Профілактика завжди краща за лікування. Однак це не означає, що технології «очищення у місці викиду шкідливих речовин» ніколи не будуть потрібні. Використовуючи філософію РЕЧВ для вирішення проблем забруднення та відходів, можна зменшити залежність від рішень «очищення у місці викиду шкідливих речовин» або, в деяких випадках, повністю усунути.

Методологію РЕЧВ можна застосовувати (і вона вже застосовується) до видобутку сировини, різноманітних виробництв, сільського господарства, рибальства, транспортних перевезень, туризму, охорони здоров'я, енергетики та інформаційних систем. Важливо підкреслити, що РЕЧВ стосується як організаційних, так і технологічних змін. У багатьох випадках найважливіші результати РЕЧВ можна досягнути за рахунок всебічного нестандартного мислення без впровадження технологічних рішень. Зміна ставлення з боку керівників, менеджерів і співробітників підприємства є критично важливою для отримання найбільших переваг від РЕЧВ [1].

**Переваги чистого виробництва:**

- окупність;
- інноваційність;
- мотивація співробітників;
- дружність до навколишнього середовища;
- відповідність правовим нормам;
- сприяння покращенню якості.

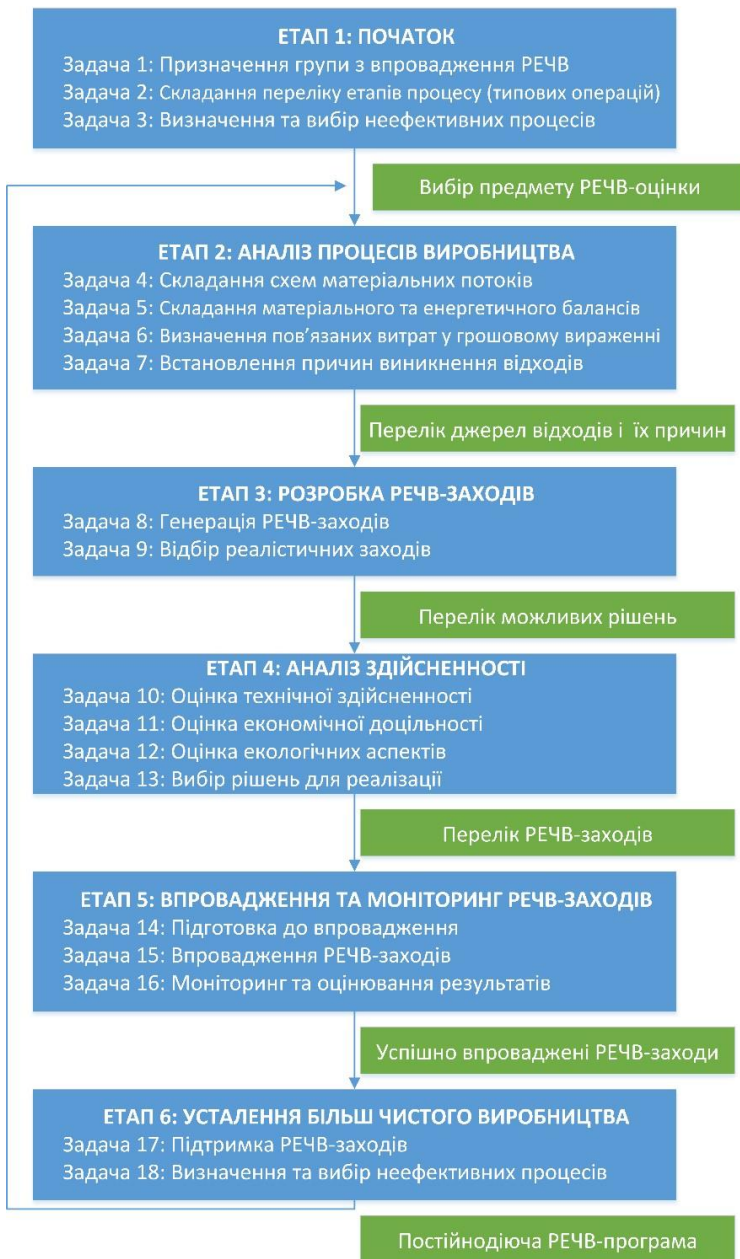
Слід також пам'ятати, що відходи – це, зрештою, втрачені матеріальні ресурси.

## **1.2. Методологія РЕЧВ**

Поетапну методологію проведення РЕЧВ-обстежень (або РЕЧВ-оцінок) на підприємстві показано на рис. 1.2 [2].

РЕЧВ є безперервним процесом. Завершивши одну оцінку РЕЧВ, слід розпочинати іншу з метою подальшого вдосконалення, або ж продовжувати роботу з іншим пріоритетним напрямом.

За підтримкою у впровадженні РЕЧВ на виробництві доцільно звертатися до Центру ресурсоефективного та чистого виробництва. В Україні він був створений у 2013 році та виконав РЕЧВ-обстеження уже понад 150 підприємств у різних галузях.



**Рисунок 1.2 – Методологія реалізації РЕЧВ на підприємстві**

### 1.3. Ресурсоефективні заходи та рішення. Загальні підходи

Найпоширенішим розумінням про управління відходами на виробничих підприємствах є пошук найдешевших шляхів, аби їх позбутися (викинути). Таке відношення до відходів є традиційним і, на перший погляд, найпростішим.

Проте у концепції чистого виробництва ідея відходів сприймається в іншому ракурсі: звідки вони беруться і що можна зробити, щоб уникнути чи мінімізувати утворення відходів?

Щоб дати відповіді на ці запитання, необхідно проаналізувати стан підприємства, взявши до уваги весь виробничий цикл, зокрема:

- сировину;
- основні та допоміжні матеріали;
- наявні технології;
- параметри процесів;
- відходи виробництва;
- персонал;
- постачальників та готову продукцію.



**Рисунок 1.3 – Схема перетворення вхідної сировини в кінцеву продукцію та відходи**

Виробничі вдосконалення можна реалізувати кількома способами, які є типовими для різних видів підприємств:

- зміна виробничих процесів та технології;
- зміна характеру вхідних ресурсів (матеріалів, компонентів, джерел енергії, води тощо);
- зміна готового продукту або розробка альтернативної продукції;
- повторне використання відходів та побічних продуктів на місці.

Зазвичай впроваджують такі види РЕЧВ-заходів:

- організація виробництва та управління підприємством;
- вдосконалення робочих практик та їх належна підтримка може забезпечити значні переваги (ці опції переважно низьковитратні);
- оптимізація виробничого процесу;
- оптимізація існуючих процесів може зменшити споживання ресурсів (ці опції здебільшого низьковитратні або середньовитратні);
- заміна сировини.

Екологічних проблем можна уникнути шляхом заміни небезпечних матеріалів на більш екологічно чисті. Ці опції можуть вимагати змін технологічних операцій та обладнання.

## **Нова технологія**

Впровадження нових технологій може скоротити споживання ресурсів та звести до мінімуму утворення відходів за рахунок підвищення ефективності операцій. Ці опції зазвичай дуже витратні, але періоди окупності можуть бути досить короткими.

## **Розробка нової продукції**

Зміна процесу розробки продукції може забезпечити переваги впродовж усього її життєвого циклу, включно зі зменшенням використання небезпечних речовин, зменшенням обсягу утилізації відходів, скороченням енергоспоживання та більш ефективними виробничими процесами. Розробка нової продукції – це довготривала стратегія, що може вимагати нового виробничого обладнання та заходів із маркетингу, але окупність у кінцевому підсумку може бути дуже високою.

## 2. ЦЕМЕНТНА ГАЛУЗЬ УКРАЇНИ. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Цементна промисловість є однією з найважливіших галузей матеріального виробництва. Значення цієї галузі в народному господарстві визначається передусім нерозривним зв'язком із ходом капітального будівництва.

Цемент – один із найголовніших будівельних матеріалів, який застосовується для виготовлення бетонів, залізобетонних виробів, а також для скріплення окремих деталей будівельних конструкцій, гідроізоляції. Цемент – загальна назва мінеральних в'язучих порошкоподібних матеріалів. Після взаємодії з водою вони утворюють пластичну масу, яка потім з рідкого або тістоподібного стану переходить у твердий каменеподібний при звичайній температурі і використовується для зв'язування з іншими матеріалами.

Цементна промисловість – матеріаломістка галузь, тому цементні заводи розміщують у районах видобування сировини. При виробництві 1 т клінкеру (напівфабрикату цементу) витрачається 1,5 т карбонатних порід (мергелю, доломіту, вапняків, крейди) і майже 0,5 т глини.

Перший цементний завод в Україні споруджено в 1896 р. на Донбасі (Амвросіївка). У 1913 р. в Україні вже працювало 12 цементних заводів, які виробляли 269 тис. т цементу. У 1995 р. виробництво цементу становило 7,6 млн т.

На даний момент цементна галузь в Україні презентована 5 основними гравцями (рис. 2.1).

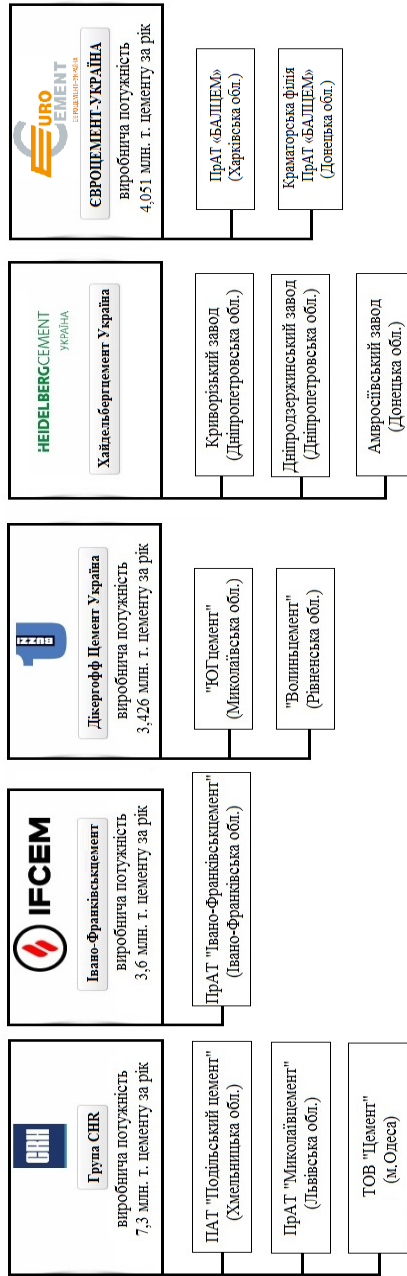
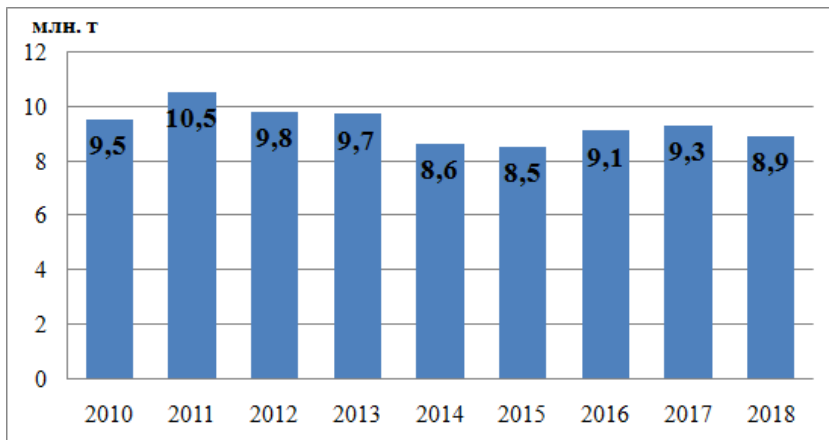


Рисунок 2.1 – Основні виробники цементу в Україні [3]

Обсяги виробництва цементу в Україні за 2010-2018 рр. наведено на рис. 2.2



**Рисунок 2.2 – Виробництво цементу в Україні за 2010-2018 рр. [3]**

У 2018 р. працювали 5 із 7 установок з виробництва клінкеру сухим способом та 5 із 17 установок з виробництва мокрим способом – разом 10 із 24. Приріст виробництва клінкеру склав 4,3%, до 7,428 млн т. При цьому випуск готової продукції – цементу – скоротився на 4,5%, до 8,926 млн т. Із 53 цементних млинів у виробництві в 2018 році були задіяні 43.

### **3. ЖИТТЄВИЙ ЦИКЛ ТА ОСНОВНІ СПОСОБИ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ**

Аналіз життєвого циклу (англ.: LCA-Life Cycle Analysis) – це оцінювання навантаження будь-якого продукту протягом його життя на довкілля – від зародження до завершення експлуатації продукту та/або його утилізації. В аналізі, який виконують за методикою міжнародних стандартів серії ISO 14040, враховують всі основні процеси життєвого циклу продукту/послуги.

#### **3.1. Основні етапи життєвого циклу цементу**

Життєвий цикл цементу розпочинається з отримання сировини (мергель, вапняк, крейда, глина) у кар'єрах, які розташовані переважно поблизу цементного заводу. Після видобутку сировина подрібнюється безпосередньо в кар'єрі і транспортується на цементний завод для проміжного зберігання, гомогенізації і подальшої переробки. На наступному етапі сировина сушиться і перетирається в певних і добре контрольованих пропорціях у млинах, в результаті чого виходить сировинна мука для сухого (і напівсухого) процесу. При мокрому процесі сировина подрібнюється з певною кількістю води для отримання рідкого цементного тіста. Добутий проміжний продукт – тобто сировинне борошно або рідке цементне тісто (або їх похідні) – зберігається і далі гомогенізується в бункерах сировинної суміші або шламових басейнах, в результаті чого досягається і підтримується необхідний однорідний хімічний склад перед відправленням у піч. Далі готова сировина надходить у печі, де піддається тепловому обробленню, яка складається з послідовних етапів висихання/підігріву, прожарювання і спікання. Спечений продукт «клінкер» охолоджується потоком повітря до 100-200°C і транспортується до місця зберігання. На наступному етапі відбувається помол клінкеру з додаванням різних добавок. Після цього отриманий цемент пакується і транспортується до кінцевого споживача.

Завершення життєвого циклу цементу – використання цементу людиною.

Межі життєвого циклу та ключові етапи/процеси виробництва товарного цементу показано на рис. 3.1 та рис. 3.2, відповідно.

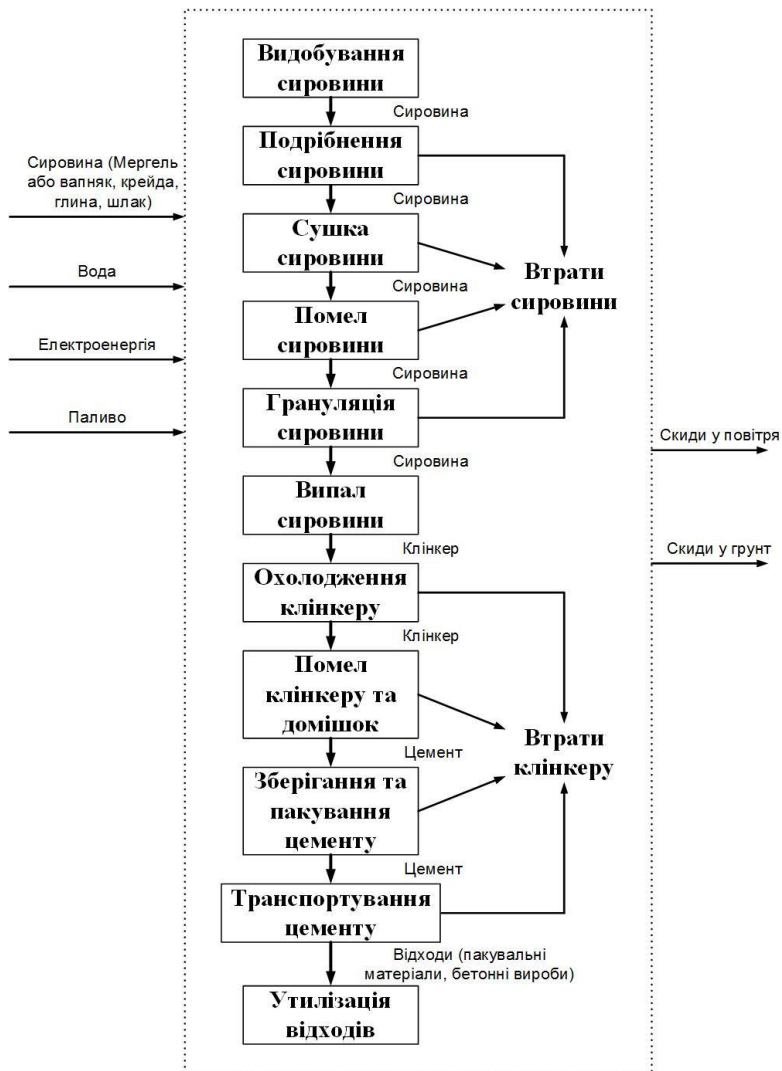
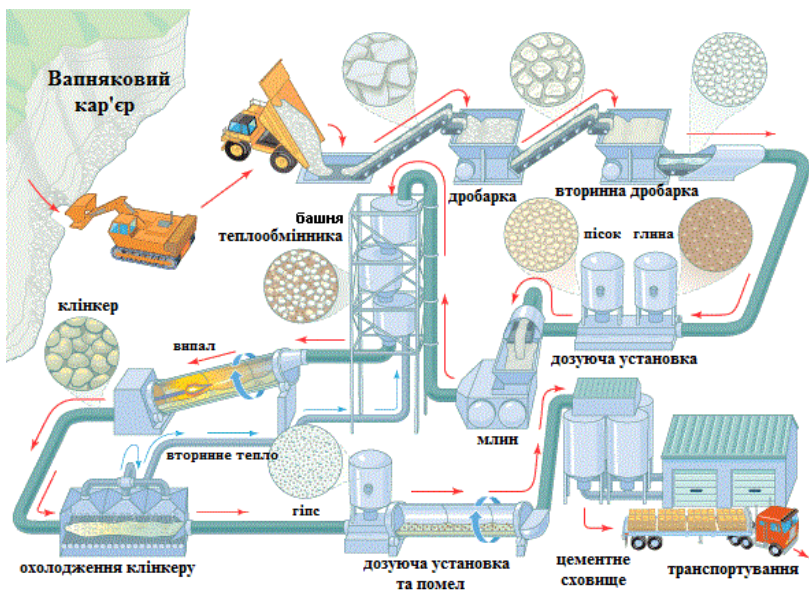


Рисунок 3.1 – Життєвий цикл виробництва товарного цементу



**Рисунок 3.2 – Ключові етапи/процеси виробництва товарного цементу [4]**

Повний цикл виробництва товарного цементу впливає на всі критичні процеси земної системи, які загрожують екологічній стійкості планети, – на глобальне потепління (через викиди парникових газів), підкислення Світового океану (переважно, через викиди оксидів вуглецю, азоту, сірки), деградацію земель (через забруднення земель важкими металами).

### 3.2. Основні способи виробництва цементу

У виробництві цементу використовують переважно мокрий, сухий, напівсухий та комбінований способи. Перелічені технології різняться за способам приготування сировинної суміші та випалу клінкеру [5].

При сухому способі сировинні матеріали подрібнюються і сушаться в сировинному млині у вигляді рухомого порошка. Суха сировинна шихта використовується для живлення печі з

циклонним теплообмінником або кальцинатором, або, рідше, довгої сухої печі.

При напівсухому способі суха сировинна шихта гранулюється з водою і подається перед піччю в колосниковий підігрівач або довгу піч, обладнану комірковим теплообмінником.

При напівсухому способі шлам попередньо зневоднюється фільтрацією. Утворений на фільтрі кек гранулюється методом екструзії і подається або в колосниковий підігрівач, або безпосередньо в сушарку сировинного кеку для отримання сировинної шихти.

При мокрому способі сировинні матеріали подрібнюються з водою до утворення сировинного шламу. Шлам подається або безпосередньо в обертову піч, або попередньо в сушарку шламу.

Вибір способу виробництва значною мірою визначається станом сировинних матеріалів (сухий або вологий). Значна частина світового виробництва клінкеру базується на мокрому способі. Однак у Європі понад 75% клінкеру виробляється сухим способом завдяки наявності сухих сировинних матеріалів. Мокрий спосіб є більш енергоємним, а тому витратнішим. Заводи, які використовують напівсухий спосіб, зазвичай переходять на сухий спосіб, якщо потрібна їх істотна реконструкція і розширення. Заводи мокрого або напівсухого способу зазвичай використовують тільки вологі сировинні матеріали.

### **3.3. Переваги та недоліки основних способів виробництва**

У кожного способу є свої переваги і недоліки. Так, наприклад, наявність води полегшує подрібнення матеріалів і простіше досягається однорідність суміші, але витрати тепла на випал сировинної суміші при мокрому способі на 30%-40% більші, ніж при сухому. Крім того, значно зростає необхідний об'єм печі при випалюванні вологої сировинної суміші, оскільки значна частина печі виконує функції випарника води.

Вибір способів виробництва клінкеру визначається рядом факторів технологічного і техніко-економічного характеру, властивостями сировини, її однорідністю та вологістю, наявністю достатньої паливної бази в районі будівництва заводу.

За умови природної вологості сировини понад 18%-20% і нестабільного хімічного складу сировини кращим є мокрий спосіб. Його вигідно застосовувати також при використанні двох м'яких компонентів (глини і крейди), бо їхнє подрібнення легко досягається розбовтуванням у воді. Проте при сучасному рівні технічного оснащення вищевказані фактори не є серйозною перешкодою для застосування сухого способу виробництва.

Сухий спосіб раціонально застосовувати, якщо сировина однорідна і її вологість не перевищує 18%-20%. На практиці існують приклади успішного функціонування підприємств, де використовуються крейда і мергель з вологістю до 26% (ВАТ «Білоруський цементний завод» працює з такою сировиною з кінця минулого століття). Напівсухий спосіб дає хороші результати при виготовленні клінкеру з досить пластичних сировинних матеріалів, коли при грануляції суміші утворюються міцні й термостійкі гранули. За умови хорошої фільтрації сировинних шламів перевагу слід віддавати комбінованому способу.

При сухому способі виробництва вапняк і глину після виходу з дробарки висушують до вологості приблизно 1% і подрібнюють у сировинне борошно. Після подрібнення його дозують, усереднюють і коригують у спеціальних змішувальних силосах, а потім подають у циклонні теплообмінники.

#### **Головні переваги сухого способу виробництва клінкеру:**

- вихід клінкеру з 1 м<sup>2</sup> пічного агрегату вищий, ніж при мокрому способі виробництва;
- економічність способу (зниження витрат палива, енергетичних витрат, собівартості 1 т цементу).

При технології мокрого способу виробництва витрати електроенергії на подрібнення сировинної шихти зазвичай нижчі, порівнюючи з іншими способами, а такі компоненти, як крейда і глина, диспергують шляхом розмочування. Витрати електроенергії при цьому становлять близько половини показника при подрібненні шихти, якщо карбонатним компонентом є тверді породи (вапняк, мергель, мармур).

При приготуванні сировинного шламу необхідно додатково вводити 30%-50% води. В результаті питома витрата палива на випал при сухому способі складає 100-125 кг у.п. на тонну клінкеру, а при мокрому – 185-230 кг у.п. на тонну клінкеру, що забезпечує зниження собівартості продукції при сухому способі виробництва.

При сухому способі приготування шихти сушка сировини відбувається перед подрібненням, або в процесі подрібнення у дробарках, або в млинах з одночасною сушкою. При мокрому способі виробництва шлам переміщується гідротранспортом – самопливом або за допомогою відцентрових насосів. При сухому ж способі застосовують пневмотранспорт, конвеєри та елеватори, що підвищує забруднення пилом повітря в цехах і на території заводу, а також потребує установки додаткового обладнання для знепилювання аспіраційного повітря.

Обсяг пічних газів при сухому способі на 35%-40% менший, ніж при мокрому за умови однакової продуктивності печей. У результаті при сухому способі виробництва знижується вартість знепилювання пічних газів, існують ширші можливості використання тепла відхідних газів з печі для сушки сировини, що дозволяє знизити загальні витрати палива на виробництво клінкеру, але викликає ускладнення технології виробництва.

Далі наводяться орієнтовні показники роботи печей для різних способів виробництва цементу (табл. 3.1) [6].

Таблиця 3.1

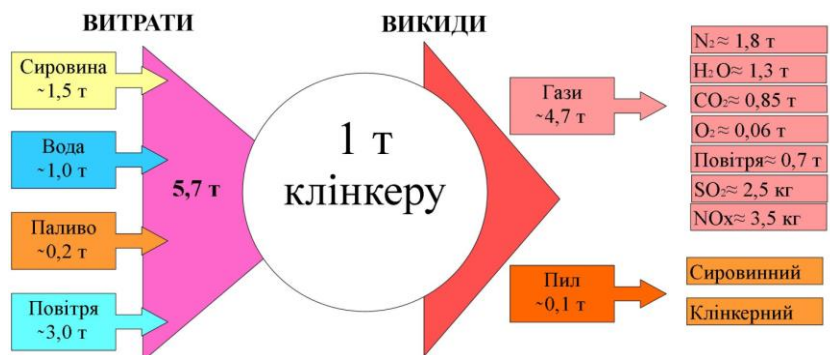
## Орієнтовні показники різних способів виробництва цементу

Параметри	Розмірність	Спосіб виробництва		
		Мокрий	Комбінований	Сухий
Максимальна потужність печі в світі	т/добу	3000	6000	12000
Витрати умовного палива	кг у.п./т клінкеру	215±15	140±10	120±8
Витрати електроенергії:				
– м'яка волога сировина	кВт·год/т цементу	90±6	105±7	115±8
– тверда сировина низької вологості	кВт·год/т цементу	120±8	–	110±7
Витрати сировини, палива та повітря	т/т клінкеру	5,0±0,35	3,5±0,25	3,1±0,2
Витрати вогнетривів у зоні спікання	кг/т клінкеру	1,0±0,07	0,5±0,04	0,3±0,02
Вихід відхідних газів	т/т клінкеру	4,0±0,3	2,5±0,18	2,1±0,15
Вихід CO <sub>2</sub>	кг/т клінкеру	850±60	710±50	710±50
NO <sub>x</sub> в факелі при газовому паливі	мг/нм <sup>3</sup>	1000±70	2000±140	2500±175
NO <sub>x</sub> у відхідних газах	мг/нм <sup>3</sup>	1000±70	500±35	500±35
	кг/т клінкеру	3,5±0,25	1,1±0,01	0,9±0,06
Якість клінкеру	%	100	105	90
Технологія	-	проста	складна	складна
Керування процесом	-	складне	просте	просте
Ступінь автоматизації	-	низька	висока	висока

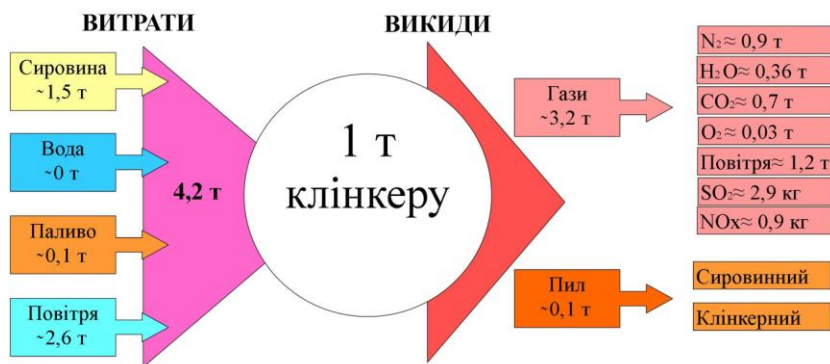
#### 4. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СПОЖИВАННЯ І ВИТРАТ РЕСУРСІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТУ

##### 4.1. Матеріальний баланс процесу виробництва портландцементу

Матеріальні баланси процесу виробництва 1 т портландцементного клінкеру мокрим та сухим способами виробництва показано на рис. 4.1



а)



б)

Рисунок 4.1 – Матеріальний баланс процесу виробництва портландцементного клінкеру мокрим (а) та сухим (б) способами виробництва [7]

В екологічному аспекті мокрий спосіб має найбільший негативний вплив на довкілля з урахуванням витрат матеріальних ресурсів і викидів забруднюючих речовин [8]. Споживання матеріальних ресурсів і викидів збільшується на 1,5 т/т клінкеру. Виробництво портландцементного клінкеру мокрим способом, порівняно з сухим, вимагає майже вдвічі більших витрат палива. Тепло, що виділяється при спалюванні технологічного палива, витрачається на теплові процеси клінкероутворення, випаровування води, а також втрачається з газами, що відходять, з повітрям з клінкерного холодильника, з гарячим клінкером і на прямі втрати у довкілля.

#### 4.2. Питомі витрати сировинних матеріалів на виробництво 1 т портландцементного клінкеру і портландцементу

Виробництво портландцементу є матеріаломістким процесом. У табл. 4.1 показано середнє споживання сировинних матеріалів для виробництва цементу. Цифри в останній колонці є зразковими показниками для заводу потужністю 3000 т/добу або 1 млн т/рік відносно клінкера, що відповідає 1,23 млн т цементу на рік та за умови, що частка мінеральної добавки в цементі становить 14%.

Таблиця 4.1

##### Споживання сировинних матеріалів при виробництві цементу

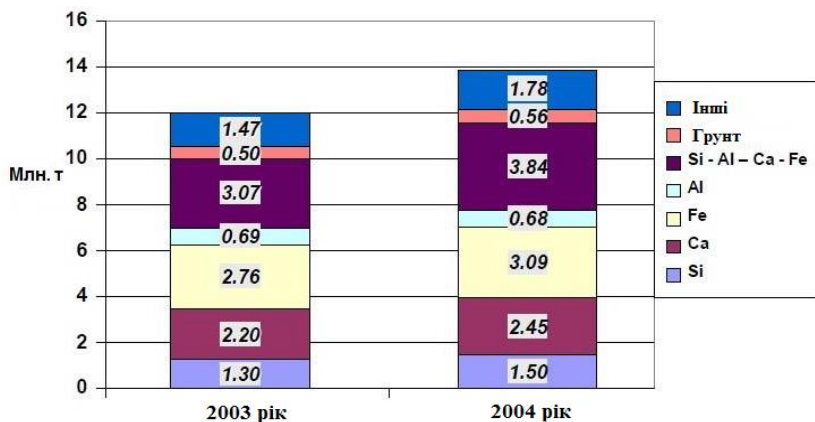
Матеріал (у сухому стані)	На 1 т клінкеру	На 1 т цементу	На 1 млн т клінкеру в рік
Вапняк, глина, сланець, мергель та ін.	1,57 т	1,27 т	1 568 000 т
Гіпс, ангідрит	–	0,05 т	61 000 т
Мінеральні домішки	–	0,14 т	172 000 т

Промислові відходи різного походження можуть заміщувати значну кількість сировинних матеріалів при випалюванні портландцементного клінкеру (рис. 4.2).



**Рисунок 4.2 – Альтернативні матеріали, що застосовуються на заводі комбінованого способу в Lägerdorf (Німеччина)**

Даних за загальним обсягом промислових відходів, використаних як сировинних матеріалів на цементних заводах України, немає. Що стосується країн ЄС, то з 2001 по 2004 роки використання таких відходів збільшилося у понад 2 рази, що дозволило в 2004 році заощадити майже 14 млн т природної сировини, а це приблизно 6,5% від загального обсягу сировинних матеріалів, використаних для випалу портландцементного клінкеру (рис.4.3) [8].



**Рисунок 4.3 – Використання різних відходів у країнах ЄС у ролі сировинних матеріалів при виробництві цементу**

Також постійно збільшується використання промислових відходів в якості мінеральних добавок при помолі портландцементу. Так, наприклад, використання сланцевої золи в країнах ЄС за період з 2000 по 2005 рр. збільшилося вдвічі і становить 100 000 т/рік [8].

Використання промислових відходів як сировини при виробництві цементу зазвичай дозволяє знизити питомі витрати тепла на випал 1 т портландцементного клінкеру і підвищити продуктивність обертової печі.

Постійний контроль за вмістом шкідливих речовин у відходах і використання правильного способу їхнього введення до складу сировинної суміші або цементу запобігає збільшенню шкідливих викидів в атмосферу при випалюванні портландцементного клінкеру або помолу портландцементу і не впливає на якість виробленого цементу.

#### **4.3. Питомі витрати палива на випал 1 т портландцементного клінкеру**

Питома витрата палива на випал 1 т портландцементного клінкеру залежить переважно від способу виробництва

портландцементу, типу і конструкції обертової печі, хімічних і фізичних (вологість) властивостей сировинних компонентів та сировинної суміші, що використовуються для виробництва клінкеру.

Практика показала, що питома витрата палива при використанні печей сухого способу з циклонними теплообмінниками і декарбонізатора становить 3000-3800 МДж/т клінкеру як середньорічне значення, а мінливість показника пов'язана з пуском і зупинкою печей, з властивостями сировинних матеріалів. Середні питомі витрати палива і тепла при використанні печей різного типу наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

**Питомі витрати палива і тепла на випал клінкеру для печей різного розміру і способів виробництва**

<b>Тип печі, спосіб виробництва</b>	<b>Питомі витрати тепла, МДж/т клінкеру</b>	<b>Питомі витрати палива, кг у.п. т/т клінкеру</b>
Печі сухого способу з циклонними теплообмінниками і декарбонізатором	3000-4000	100-135
Печі сухого способу з циклонними теплообмінниками	3100-4200	105-145
Комбінований (напівсухий/напівмокрый спосіб) виробництва, піч Леполь	3300-5400	115-185
Довгі печі сухого способу виробництва	До 5000	До 170
Довгі печі мокрого способу виробництва	5000-6400	170-220
Печі для виробництва спеціальних цементів	3100–6500 і більше	105–225

Паливомісткі відходи різного походження можуть заміщувати значну кількість палива при випалюванні портландцементного клінкеру.

Дані про використання паливовмісних відходів на цементних заводах країн ЄС у 2003-2004 роках надано в табл. 4.3 [8.]

Таблиця 4.3

**Використання паливовмісних відходів у цементних печах країн ЄС**

Види відходів	Споживання, тис. т			
	2003 рік		2004 рік	
	Небезпечні	Безпечні	Небезпечні	Безпечні
Дерево, папір, картон	0,000	214,991	1,077	302,138
Текстиль	0,000	19,301	0,000	8,660
Полімери	0,000	354,070	0,000	464,199
Промислові відходи	4,992	570,068	1,554	734,296
Гума/шини	0,000	699,388	0,000	810,320
Промислові опади	52,080	161,660	49,597	197,720
Міські опади стічних вод	0,000	174,801	0,000	264,489
Тваринні, харчові відходи та жири	0,000	1313,094	0,000	1285,074
Відходи вуглезбагачення	1,890	137,213	7,489	137,013
Сільськогосподарські відходи	0,000	73,861	0,000	69,058
Тверді відходи (просочена деревна тирса)	164,931	271,453	149,916	305,558
Розчинники і пов'язані з ними відходи	425,410	131,090	517,125	145,465
Відходи нафтопереробки	325,265	181,743	313,489	196,383
Інші	0,551	199,705	0,000	212,380
Загальне споживання	975,119	4502,435	1040,247	5133,353

Найвищий ступінь заміщення основного технологічного палива паливовмісними відходами спостерігається в Німеччині (43,6% для безпечних і 5,2% для небезпечних відходів), Чехії (відповідно, 37% і 15%) і Австрії (відповідно, 35% і 12%) [8].

#### 4.4. Питомі витрати енергії на виробництво 1 т портландцементу

Оскільки основні технологічні стадії виробництва цементу пов'язані з тонким подрібненням сировинних матеріалів і цементу, то головними споживачами електроенергії при виробництві цементу є помольні агрегати – сировинні і цементні млини, а також вентилятори і димососи, що сумарно споживають до 80% всієї енергії на 1 т виробленого цементу.

Питомі витрати електроенергії на виробництво 1 т цементу становлять 90-150 кВт·год. Питомі витрати електроенергії при мокрому способі виробництва цементу трохи вищі, ніж при сухому або комбінованому.

Витрати електроенергії на тонке подрібнення сировинних матеріалів та цементу визначаються природою і особливостями структури матеріалу, що подрібнюється. Найбільші витрати спостерігаються при подрібненні добре спеченого портландцементного клінкеру, гранульованого доменного шлаку, твердих вапняків, піску, кварцитів, найменший – при подрібненні крейди та глини. При мокрому способі виробництва глина подрібнюється в результаті мимовільної диспергації у воді в ємностях для перемішування глини та у млинах самороздрібнювання з подальшим подрібненням матеріалів.

## 5. ВИКИДИ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТУ

### 5.1. Викиди пилу

#### 5.1.1. Організовані викиди

Головними джерелами викидів пилу при виробництві цементу є: процес приготування сировинних матеріалів, установки подрібнення та сушки, процес обпалу клінкеру (печі та холодильники), підготовка палива та установки для помолу клінкеру (млини). Допоміжні процеси на цементному заводі також можуть призвести до виділення пилу незалежно від використання або не використання відходів. До них відносяться такі процеси, як: подрібнення сировинних матеріалів, транспортування матеріалів транспортером або елеватором, складування сировинних матеріалів та цементу, помол сировини, цементу та вугілля, складування палива, відвантаження цементу.

У всіх цих процесах значний об'єм газів проходить через матеріал, що виділяє пил. У таких випадках як подрібнення, помол та відвантаження, обладнання працює під невеликим розрядженням і тому організовані джерела викидів пилу зазвичай обладнані рукавними фільтрами. Конструкція та надійність сучасних електрофільтрів та рукавних фільтрів забезпечують зниження пиловиділення до рівня, при якому вони не є значущими. Рівень викидів нижче  $10 \text{ мг/нм}^3$  (середньодобова величина) досягається для 37% установок. Більша частина викидів пилу знаходиться в межах 0,27 і менше  $30 \text{ мг/нм}^3$ . Вміст пилу в газі (середньодобова величина) на обертових печах, обладнаних електрофільтрами, складає менше  $10\text{-}30 \text{ мг/нм}^3$ . При використанні рукавних фільтрів величина середньодобових викидів пилу складає  $10\text{-}20 \text{ мг/нм}^3$ .

### 5.1.2. Неорганізовані викиди

Неорганізовані викиди пилу можуть з'явитися при складуванні та переробці матеріалів і твердого палива з відкритих складів, транспортерів сировинних матеріалів, а також із дорожніх покриттів, що спричиняються рухом дорожнього транспорту. Виділення пилу при пакуванні та відвантаженні клінкеру/цементу може бути також досить значущим. Вплив неорганізованих викидів може призвести до загального збільшення викидів пилу, бо процес викиду пилу здійснюється із великої поверхні.

### 5.2. Викиди оксиду азоту

Випал клінкеру є високотемпературним процесом, в результаті якого утворюються оксиди азоту. Ці оксиди є одними з ключових забруднювачів, що викидаються цементними заводами в повітря. Вони утворюються в процесі обпалу зв'язуванням азоту палива з киснем у полум'ї або зв'язуванням атмосферного азоту та кисню повітря, що подається на горіння.

Існує два джерела для появи  $\text{NO}_x$ :

- 1) теплові  $\text{NO}_x$ : частина азоту в повітрі під час горіння взаємодіє з киснем з утворенням оксидів азоту;
- 2) паливні  $\text{NO}_x$ : сполуки, які містять азот, хімічно зв'язані в паливі, реагують з киснем повітря з утворенням різних оксидів азоту.

За даними [8], середньорічне виділення  $\text{NO}_x$  з цементних печей у країнах ЄС в 2004 році становило приблизно  $785 \text{ мг/м}^3$  (у перерахунку на  $\text{NO}_2$ ) з мінімальним значенням  $145 \text{ мг/м}^3$  і максимальним –  $2040 \text{ мг/м}^3$ .

В Австрії, де всі цементні заводи використовували форсунки з низьким утворенням  $\text{NO}_x$  і охолодження полум'я, середньорічні викиди  $\text{NO}_x$  становили  $645 \text{ мг/м}^3$  з діапазоном від 313 до  $795 \text{ мг/м}^3$ .

У Німеччині, де в 2006 році на 8 цементних печах використовували багатоточкове спалювання палива і на 34 печах – технологію селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту, середньорічні викиди  $\text{NO}_x$  коливалися в межах 200 ... 800  $\text{мг/м}^3$ .

У Фінляндії викиди  $\text{NO}_x$  на цементних заводах були зафіксовані в межах 500-1200  $\text{мг/м}^3$ , в Чехії – 400-800  $\text{мг/м}^3$ , у Франції – 666  $\text{мг/м}^3$ , що є середньорічним значенням для 33 цементних заводів.

У більшості країн ЄС концентрація  $\text{NO}_x$  в газах цементних печей обмежена законодавчо. Для печей сухого способу з циклонними теплообмінниками вона становить 200-450  $\text{мг/м}^3$ , для довгих печей мокрого способу виробництва – 400-800  $\text{мг/м}^3$ .

### 5.3. Викиди діоксиду сірки

Викиди  $\text{SO}_2$  на цементних заводах залежать від загальної кількості сульфатних сполук, способу виробництва і передусім визначаються вмістом легкої сірки в сировинних матеріалах і паливі. Потенційні викиди  $\text{SO}_2$  залежать від циркуляції сірки в печі. Сірка викидається з печей у вигляді  $\text{SO}_2$  у вихідних газах,  $\text{CaSO}_4$  та інших компонентах клінкеру і пилу. Однак значна частина сірки залишається у клінкері або вивантажується з системи.

Залежно від родовища сировинні матеріали можуть містити сірку у вигляді сульфатів і сульфідів. Сульфати – це стабільні сполуки, які тільки частково розкладаються термічно при високій температурі в зоні спікання обертової печі, але розкладання може збільшитися за наявності місцевого відновлювального середовища при горінні палива і відходів. Отже, сірка у формі сульфату більш-менш повністю виходить з печі з клінкером, зберігаючи його властивості. Сульфіди, навпаки, окислюються ще в теплообміннику і частково виділяються у формі діоксиду сірки.

Сірка, що надходить у піч з паливом, окислюється до  $\text{SO}_2$  і не спричинює значного збільшення викидів завдяки наявності сильних лугів у зоні спікання, зоні кальцинування і на стадії підігріву. Сірка вступає у зону кальцинування разом з невеликою кількістю  $\text{SO}_2$ , утвореної в результаті часткового розкладання сульфатів у зоні випалу. У зоні кальцинування  $\text{SO}_2$  реагує з лугами і лужними сульфатами, що містяться у сировинних матеріалах. При контакті з частково декарбонізованою сировинною сумішшю надлишок  $\text{SO}_2$  реагує спочатку з утворенням  $\text{CaSO}_3$ , а потім –  $\text{CaSO}_4$ . Ці сульфати знову надходять в обортову піч. Створюється кругообіг сірки в печі, яка перебуває у рівновазі з виходом сірки з клінкером.

Велика площа зони декарбонізації в обортовій печі створює ідеальні умови для захоплення сірки з відхідних пічних газів. Виділення  $\text{SO}_2$  бувають тоді, коли концентрація кисню в обортовій печі не оптимальна для зв'язування  $\text{SO}_2$ .

Крім того, різні фактори можуть впливати на ефективність реакції: температура, вміст вологи, час перебування газу, концентрація оксидів у газовій фазі тощо.

У європейських довідкових документах («Довідковий документ про найкращі доступні технології. Виробництво цементу, вапна та оксиду магнію») надано приклад рівня викидів на основі найкращих доступних технологій у діапазоні 50-400 мг/м<sup>3</sup>.

#### 5.4. Викиди оксиду та діоксиду вуглецю

Підраховано, що викиди  $\text{CO}_2$  становлять 900-1000 кг/т сірого клінкеру при споживанні тепла 3500-5000 кДж/т клінкеру. Однак ця величина залежить від типу палива, що споживається. Завдяки подрібненню цементу з мінеральними домішками кількість виділеного  $\text{CO}_2$  знижується у перерахунку на тону цементу. Близько 62% від загальної кількості  $\text{CO}_2$  виділяється у процесі декарбонізації вапняку сировинної суміші, а ті, що

залишилися 38%, – при горінні палива. Виділення  $\text{CO}_2$  при згорянні палива прямо пропорційні питомій витраті тепла на випал клінкеру і співвідношенню вмісту в ньому вуглецю до його теплотворної здатності. За останні 25 років виділення  $\text{CO}_2$  при згорянні палива знизилися приблизно на 30% у зв'язку з постійним збільшенням ефективності процесів його спалювання в печі.

Виділення  $\text{CO}$  і вуглецю, зв'язаного в органічні сполуки, в процесі випалу клінкеру в печі пояснюється наявністю невеликої кількості органічних сполук у природних сировинних матеріалах (залишки організмів і рослин, що містяться у гірських породах у процесі геологічних відкладень). Перебуваючи в теплообміннику, матеріали окислюються з утворенням  $\text{CO}$  і  $\text{CO}_2$ . У цьому процесі з органічного вуглецю також може утворитися невеликий обсяг (сліди) органічних газів. Отже, вміст  $\text{CO}$  у газах, а також слідів органічних газів, не дозволяє зробити жодних висновків про умови горіння палива в самій обертовій печі.

Додаткові викиди  $\text{CO}$  можуть бути результатом неповного спалювання палива або неправильно підібраних умов горіння у декарбонізаторах. Однак таке збільшення викидів  $\text{CO}$  зазвичай збігається зі зниженням викидів оксидів азоту  $\text{NO}_x$ . В той же час такі відновлювальні умови горіння можуть сприяти утворенню та збільшенню  $\text{SO}_2$ .

На теплоелектростанціях концентрація  $\text{CO}$  та органічно пов'язаних вуглеців у відхідних димових газах є критерієм недопалу палива. На відміну від цього процес випалу клінкеру є процесом перетворення матеріалу, який може відбуватися з надлишком повітря для поліпшення якості клінкеру. У поєднанні з тривалим перебуванням при високій температурі це сприяє повному спалюванню палива.

Залежно від родовища сировинного матеріалу від 1,5 до 6 г органічного вуглецю на кг клінкеру додається у процес з природним матеріалом. Дослідження різних сировинних сумішей показали, що 85-95% органічних сполук у сировинному

матеріалі перетворюються в  $\text{CO}_2$  в присутності 3% кисню, але, в той же час, 5-15% перетворюється в  $\text{CO}$ . Кількість органічних вуглецевих сполук в цих умовах значно нижче 1%. Концентрація  $\text{CO}$  може бути вище  $1000 \text{ мг/м}^3$ , перевищуючи  $2000 \text{ мг/м}^3$  або навіть, у деяких випадках, вище  $5000 \text{ мг/м}^3$ . Хороший дизайн системи подачі палива забезпечує стійкий рівень живлення твердим паливом з мінімальним піком викидів. В іншому випадку при нестехіометрії горіння можуть з'явитися короткі піки викидів  $\text{CO}$  понад 0,5%. Це створює додаткові проблеми з електрофільтрами, які змушені автоматично вимикатися для уникнення вибуху.

### 5.5. Викиди металів та їх сполук

Метали та їхні сполуки надходять у піч для випалу клінкеру з сировинними матеріалами і з технологічним паливом. Їхня концентрація може змінюватися в широких межах. Рівень емісії металів в атмосферу визначається складними механізмами.

Залежно від леткості металів та їхніх сполук усі метали можуть бути поділені на 4 класи:

1) Метали, які в чистому вигляді або у вигляді сполук з іншими елементами є тугоплавкими, нелеткими речовинами. До них відносяться  $\text{Ba}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Cu}$  і  $\text{Ag}$ . У процесі випалу ці метали повністю адсорбуються клінкером і виводяться з печі разом з ним. У газах вони можуть бути присутніми тільки у вигляді пилу, а рівень їхньої емісії в атмосферу залежить тільки від ефективності роботи пиловловлюючого обладнання.

2) Метали, які у вигляді сполук є частково леткими:  $\text{Sb}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Se}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{K}$  і  $\text{Na}$ . У вигляді сульфатів або хлоридів ці метали здатні сублімувати в інтервалі температур  $1000\text{-}1300^\circ\text{C}$  і конденсуватися при  $700\text{-}900^\circ\text{C}$ , що призводить до явища внутрішньої рециркуляції і їхнього накопичення у нижніх щаблях циклонного теплообмінника і в зоні твердофазових реакцій. Вони також практично повністю виводяться з печі з клінкером, а

рівень їхньої емісії в атмосферу залежить від ефективності роботи пиловловлюючого обладнання.

3) Талій (Tl) у вигляді металу або у вигляді сполук має високу леткість. Так, наприклад, конденсація TlCl відбувається в температурному інтервалі 450-550°C, тобто у верхніх щаблях циклонного теплообмінника, що призводить до накопичення і поступового зростання його концентрації в складі пилу.

4) Ртуть (Hg) є вкрай легкою сполукою. Вона майже повністю видаляється з печі з відхідними газами і лише незначна її частина адсорбується пилом з подальшим осадженням у пиловловлюючих установках.

Згідно [9], металами або їхніми сполуками, що відносяться до 1 класу небезпеки, є: Ba, Be, V, Hg, Cd, Ni, Pb, Tl, Te і Se. Серед цих металів часткову і високу леткість мають Hg, Cd, Tl, Pb.

Поведінка і рівень емісії окремих металів залежить від їхньої леткості, способу введення у піч, концентрації металу в сировинних матеріалах і паливі або паливовмісних відходах, виникнення явища рециркуляції та акумулювання металів і від ефективності осадження пилу в пиловловлюючій системі.

Нелеткі метали майже повністю виходять з печі з портландцементного клінкеру. Концентрація цих металів в пилу, що викидається в атмосферу після очищення газів у пиловловлюючих установках, незначна. Багаторічні дослідження продемонстрували, що з портландцементного клінкеру виділяються наступні важкі елементи: As ( $\approx 92\%$ ), Ni ( $\approx 97\%$ ), Zn ( $\approx 88\%$ ), Be ( $\approx 96\%$ ).

Частково леткі і високолеткі метали та їхні сполуки мають тенденцію до організації кругообігу (рециклу) всередині пічної системи і циклонного теплообмінника. У процесі кругообігу їхня концентрація в певних зонах печі і теплообмінника поступово збільшується, що призводить до деякого збільшення емісії даних металів і їхніх сполук в атмосферу разом з пилом. Значна частина Cd ( $\approx 88\%$ ) і Pb ( $\approx 77\%$ ) видаляється разом з безповоротним

пиловиносом. Одночасно збільшується їх вихід з печі разом з портландцементним клінкером.

Особливе місце серед металів завдяки своїй високій леткості займає ртуть. В інтервалі температур, що дорівнюють температурі відхідних з печі газів, майже вся ртуть знаходиться у газоподібному стані і повністю видаляється з печі в атмосферу. Лише незначна частина ртуті при різкому зниженні температури газів, що відходять, може конденсуватися на частинках пилу і, таким чином, вловлюватися в системі пиловловлення. Високолеткі Hg ( $\approx 98\%$ ) і Tl ( $\approx 42\%$ ) видаляються з обертової печі з газами, що відходять.

Токсичні властивості важких металів проявляються при вдиханні їхнього пилу або парів, або контакті цих же речовин із шкірою людини.

У країнах Європи допустимі викиди важких металів регламентуються Шведським (LRV) і Німецьким (TA-Luft) Міжнародними угодами про чистоту повітря. Відповідно до цих угод важкі метали поділені на класи токсичності.

Найбільшу небезпеку становлять Cd, Hg, Tl, які входять до I класу токсичності. Максимальна допустима концентрація цих металів у газових викидах сумарно не повинна перевищувати  $0,20 \text{ мг/м}^3$ .

До II класу входять As, Co, Ni, Se, Ti з максимальною допустимою концентрацією  $1,00 \text{ мг/м}^3$ .

До III класу токсичності входять Cr, Cu, Pb, Pd, Pt, Rh, Sb, Sn, V з максимальною допустимою концентрацією в газових викидах  $5,00 \text{ мг/м}^3$ .

## 5.6. Викиди газоподібних хлоридів та фторидів

Неорганічні сполуки хлору і фтору є компонентами портландцементного клінкеру: їхній вміст у клінкері зазвичай не перевищує  $0,05\text{-}0,1 \text{ мас. \%}$  в перерахунку на іон хлору Cl-.

Хлориди і фториди потрапляють у систему обертової печі двома способами: з сировинними матеріалами як домішки або, в деяких випадках, як спеціальна добавка з метою інтенсифікації процесу клінкероутворення і зниження температури випалу портландцементного клінкеру. В процесі випалу хлориди і фториди взаємодіють з лужними компонентами сировинної суміші (Ca, Na, K та ін.) з утворенням легкоплавких і летких сполук. Завдяки своїй високій леткості лужні хлориди і фториди сублімуються (випаровуються) в гарячих зонах печі (декарбонізації, твердофазних реакціях, спікання) і потоком димових газів переносяться у більш холодні зони, де при температурах 600-900°C знову переходять у твердий стан (конденсуються), осідаючи на поверхні частинок сировинної суміші і пилу та знову спрямовуються у більш гарячі зони печі. В результаті всередині печі, і частково в циклонному теплообміннику, утворюється стійкий кругообіг лужних сполук хлору і фтору, що призводить до багаторазового локального підвищення концентрації цих сполук. У присутності значної кількості легкоплавких лужних сполук хлору і фтору спостерігається неконтрольоване налипання пекучого матеріалу на стінках циклонів, газоходів, футеровки печі, що призводить до порушення газодинамічного режиму роботи пічного агрегату. Крім того, збільшується концентрація сполук хлору і фтору в клінкері і пиловиносі.

Для розриву циклічного кругообігу легкоплавких сполук хлору і фтору в печі використовується система байпасування пічних газів. Принцип роботи системи байпасу полягає у відборі з відповідної зони печі або теплообмінника невеликої кількості (5-15 об.%) димових газів з температурою 900-1000°C, які містять сполуки хлору і фтору в газоподібному стані, з подальшим різким охолодженням цих газів до 400-550°C шляхом розбавлення повітрям або вприскуванням води; при цьому газоподібні сполуки хлору і фтору конденсуються на поверхні пилоподібних частинок в газовому потоці з наступним вловлюванням цих частинок у циклоні або рукавному фільтрі. Знепилені димові гази

з температурою до 400-500°C повертаються у пічну систему, а пил з осілими на ньому сполуками хлору і фтору направляєтся у відвал або утилізується шляхом використання як допоміжного компонента під час помолу портландцементу. Завдяки розриву циклічного кругообігу концентрація сполук хлору і фтору в печі поступово знижується до допустимого рівня.

Негативним явищем при використанні байпасу є незначне збільшення питомої витрати тепла на випал клінкеру і утворення додаткової кількості важко утилізованого відходу виробництва.

Оскільки сполуки хлору і фтору видаляються з печі разом з пилом, то викиди цих сполук значною мірою залежать від ефективності функціонування системи пиловловлювання, особливо щодо пилу дрібної фракції з розміром частинок менше 10 мкм.

Періодичні вимірювання, виконані на цементних заводах країн ЄС, показали середнє значення викидів HCl 3,63-4,23 мг/м<sup>3</sup>. Середнє значення викидів HF становило 0,32-0,61 мг/м<sup>3</sup>; при цьому більше половини значень опинилися за межею виявлення [8].

## 5.7. Викиди у воду

У цементній промисловості загалом відсутні виробничі стічні води. Сухий або напівсухий спосіб передбачає використання води у невеликій кількості тільки для процесу очищення. Фактично, скидів у воду не відбувається, тому що вода повертається у виробничий процес.

У напівмокрому способі шлам зневоднюється у фільтрпресах. У мокрому способі вода використовується для помолу сировинних матеріалів і отримання шламу. Сировинні матеріали часто мають високу вологість. Шлам або використовується для живлення печі, де вода випаровується, або спочатку направляєтся на сушку.

Вода, яка іноді використовується для охолодження клінкеру, безпосередньо випаровується в процесі охолодження при високій температурі клінкеру.

## 6. НАЙКРАЩІ ДОСТУПНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТУ

Найкраща доступна технологія (НДТ) – це технологія виробництва продукції (товарів), виконання робіт, надання послуг, визначається на основі сучасних досягнень науки і техніки та найкращого поєднання критеріїв досягнення цілей охорони довкілля за умови наявності технічної можливості її застосування. При цьому НДТ можна вважати як технологічні процеси, обладнання, технічні засоби, так і інші методи захисту довкілля.

### 6.1. Зниження питомих витрат сировинних матеріалів на виробництво 1 т портландцементного клінкеру і портландцементу

Загальні відомості про сучасні рівні використання сировинних матеріалів для виробництва 1 т портландцементного клінкеру і портландцементу надано в розділі 4.2.

Вимоги до хіміко-мінералогічного складу портландцементного клінкеру не дозволяють відчутно скоротити питому витрату сировинних компонентів для його виробництва.

Значно більший ефект досягається при заміні природних матеріалів на відходи виробництва інших галузей промисловості. Так, шлаки чорної і кольорової металургії, в залежності від свого хімічного складу, можуть замінити до 80% карбонатного або алюмосилікатного компонента в складі сировинної суміші для виробництва портландцементу, золошлакові відходи – до 50% карбонатного і до 70% алюмосилікатного компонента, залізовмісні хвости, шлами і пил чорної металургії – до 100% залізовмісного компонента сировинної суміші.

При помолі цементу добавка доменного гранульованого шлаку може замінити до 80% портландцементного клінкеру, а зола теплових електростанцій, які працюють на вугільному

паливі, – до 40% клінкеру. Відходи виробництва мінеральних добрив – фосфогіпс та гіпс, що утворюються в результаті десульфуризації димових газів теплових електростанцій, можуть замінити до 100% природного гіпсу або ангідриту, використовуюваного під час помолу цементу в ролі регулятора термінів схоплювання. Кількість відходів, які можуть бути введені до складу цементу при його помолі, обмежується тільки вимогами стандартів на конкретний вид цементу, вимогами споживачів до складу цементу і вартістю введеної добавки.

Використання промислових відходів в якості сировинних матеріалів при виробництві цементу здебільшого дає зниження питомої витрати тепла на випал 1 т портландцементного клінкеру, підвищення продуктивності обертової печі, зниження енергоємності одержуваного цементу.

При використанні деяких видів відходів як сировинних матеріалів для випалення портландцементного клінкеру можуть виникнути проблеми підвищеної емісії важких летких металів з печі для випалення клінкеру, або проблеми утворення внутрішнього кругообігу легкоплавких лужних сполук в обертовій печі, що ускладнюють процес випалу і призводять до акумулювання шкідливих компонентів і їхньої підвищеної емісії.

Використовуючи промислові відходи як сировину, необхідно періодично моніторити вміст небажаних компонентів у цих відходах та використовувати систему забезпечення якості відходів для мінімізації вмісту небажаних компонентів.

Весь пил, вловлений у процесі виробництва цементу, повинен бути повернений у технологічний процес. Якщо неможливо повернути пил у місце його утворення (наприклад, пил, вловлений у байпасній системі або високолужний пил пічних електрофільтрів), то його необхідно додавати до складу цементу в ролі допоміжного компонента або технологічної добавки.

НДТ для зниження питомих витрат сировинних матеріалів для виробництва портландцементного клінкеру і цементу надано в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

**НДТ для зниження питомих витрат сировинних матеріалів для виробництва портландцементного клінкеру і цементу**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Заміна природних сировинних компонентів на відходи виробництва	Для всіх підприємств
2	Зниження вмісту частки клінкеру в цементі до максимально допустимого рівня	Для всіх підприємств

### **6.1.1. Використання відходів виробництва в ролі сировинних матеріалів при виробництві портландцементного клінкеру і цементу**

Ретельний вибір і контроль речовин, що входять у піч, можуть знизити кількість викидів. Наприклад, обмеження сірки як у сировинних матеріалах, так і в паливі, знижує викиди  $SO_2$ . Те ж саме стосується інших речовин: азоту, металів, органічних сполук, хлорвмісних матеріалів.

Обмеження хлорвмісних сполук знижує ймовірність утворення хлоридів лужних металів і хлоридів інших металів, що спричиняють заходжування в печі і збій режимів її роботи, а також погіршують роботу електрофільтра а, отже, збільшують викиди пилу. Високий вміст лужних металів у сировині вимагає їхнього частішого видалення з пічної системи, аби уникнути збільшення вмісту лугів у кінцевому продукті. Якщо використовувати низьколужні матеріали як сировину, можна допустити повернення пилу у виробництво, знизивши у такий спосіб накопичення відходів.

В ролі альтернативного палива і сировинних матеріалів можуть використовуватися різні типи відходів. Однак при цьому необхідно ретельно контролювати склад та властивості відходів.

Відходи, які використовуються як сировинні матеріали та містять леткі органічні сполуки, галогенмісткі сполуки і ртуть, можуть створити проблеми з викидами. Слід уникати подачі таких матеріалів у піч.

Кількість ртуті в матеріалах повинна мінімізуватися.

Відходи, які містять леткі органічні речовини та галогенмісткі сполуки, можуть використовуватися тільки в тому випадку, якщо ці сполуки розкладаються за умов достатнього часу перебування та високої температури в печі.

При використанні небезпечних відходів, які замінюють частину сировинних матеріалів, потрібно здійснювати систематичний контроль за викидами з використанням додаткових екологічних маркерів.

Найкращою доступною технологією при використанні відходів у ролі сировинних матеріалів і (або) палива для виробництва цементу є мінімізація ризику збільшення викидів шкідливих речовин у довкілля (табл. 6.2).

Таблиця 6.2

**НДТ при використанні відходів у ролі сировинних матеріалів і (або) палива для виробництва цементу**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Ретельний аналіз будь-яких відходів, які можуть бути використані як сировинний матеріал і (або) паливо в цементній печі, застосування системи забезпечення якості для кожного відходу, що подається в технологічний процес, з метою забезпечення:	Для всіх підприємств

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
	<ul style="list-style-type: none"> <li>– постійних фізичних критеріїв відходів, наприклад, здатності до утворення викидів, наявність грубих частинок, реакційної здатності, обпалюваності і калорійності;</li> <li>– постійних хімічних критеріїв, наприклад, вмісту хлору, фтору, сірки, лугів, летких металів</li> </ul>	
2	Контролю достатньої кількості необхідних параметрів для будь-яких відходів, що використовуються як сировинний матеріал і (або) паливо цементної печі, що дозволяє оцінити їх якість (вміст хлору, фтору, сірки, лугів, летких металів)	Для всіх підприємств

## 6.2. Зниження питомих витрат палива на випал 1 т портландцементного клінкеру

Загальні відомості про сучасні витрати палива на випал 1 т портландцементного клінкеру містяться в розділі 4.3.

Питомі витрати тепла і палива на випал клінкеру залежать передусім від способу виробництва цементу. Для нових заводів і модернізованих діючих підприємств типовим стає сухий спосіб виробництва цементу з багатоступеневим циклонним теплообмінником і декарбонізатором. Перспективною є заміна печей, які використовують мокрий спосіб, на печі з сухим способом а також, у разі неможливості, на печі напівсухого і напівмокрого способів.

Вибір способу виробництва залежить від вологості сировинних матеріалів. На сучасних цементних заводах при використанні сировинних матеріалів з вологістю менше 8,5% їхня сушка може бути повністю здійснена газами в чотирьох- або п'ятиступінчастих циклонних теплообмінниках без додаткового

тепла. При використанні сировини з вологістю понад 8,5% необхідно знижувати кількість ступенів циклонного теплообмінника з метою використання для сушки більш гарячих димових газів.

Пічна система з багатостадійними циклонними теплообмінниками в поєднанні з декарбонізатором і третинним повітрям вважається стандартною і високоефективною технологією для нових заводів. У деяких випадках, коли використовується сировинний матеріал з високою вологістю, можуть проектуватися заводи з тристадійним циклонним теплообмінником.

На споживання теплової енергії сучасними цементними печами впливають різні фактори: властивості сировинних матеріалів (наприклад, вологість, обпалюваність), продуктивність печі, що використовує паливо з різними властивостями і мінливість параметрів процесу, а також використання системи байпасу. Заміна частини сировинних компонентів промисловими відходами, які вже піддавалися тепловому обробленню (шлаки, золи, нефеліновий шлам і т. п.), призводить, як правило, до зниження питомої витрати тепла на випал. Зі збільшенням обсягу пічних газів, які направляються в систему байпасу, питомі витрати тепла на випал клінкеру збільшуються.

Питомі витрати тепла на випал клінкеру можуть бути знижені шляхом впровадження різних технологій і оптимізації роботи пічної системи.

Методи оптимізації питомих витрат тепла для сучасної печі сухого способу включають:

**холодильник:**

– установка сучасного клінкерного холодильника зі стаціонарною первинною решіткою;

- використання колосникових решіток з низьким опором потоку повітря для забезпечення його більш рівномірного розподілу і ефективного охолодження;

- забезпечення контролю кількості охолоджуючого повітря в окремих секціях решітки;

**піч:**

- використання печей з високою продуктивністю;

- оптимізація відношення довжини печі до її діаметру;

- оптимізація конструкції печі відповідно до використовуваного палива;

- оптимізація системи спалювання палива;

- стабільність параметрів роботи печі;

- оптимізація процесу контролю;

- раціональне і повне використання теоретично необхідного для горіння повітря;

- забезпечення необхідного надлишку повітря в печі: окислювальні умови, але близькі до стехіометричних;

- використання мінералізаторів – інтенсифікаторів процесу випалу;

- зниження підсосів повітря;

**декарбонізатор:**

- малий гідравлічний опір;

- однорідний розподіл сировини в пічному порозі;

- мінімальне утворення охолодей;

- інтенсивна декарбонізація сировинної суміші;

**теплообмінник:**

- малий гідравлічний опір циклонів;

- високий ступінь пилоосадження в циклонах;

- однорідний розподіл сировини в перетинах газоходів;

- однорідний розподіл потоків газу і твердих речовин у двогілкових циклонних теплообмінниках;

– оптимізація кількості ступенів циклонів (від трьох до шести ступенів в цілому);

**матеріал, що переробляється:**

- низька вологість сировинних матеріалів і палива;
- легка займистість палива з високою калорійністю;
- сталість живлення печі й однорідність матеріалу;
- сталість подачі палива в піч і його однорідність;

**сировинні млини:**

- повністю автоматизоване управління роботою млинів.

Для печей мокрого способу виробництва методи оптимізації передбачають наступне:

– зниження вологості сировинного шламу, що обпалюється, шляхом використання розріджувачів шламу або заміною природних матеріалів техногенними (золою, шлаком);

– оптимізація конструкції і розташування внутрішньопічних теплообмінних пристроїв;

- відсутність шламових або клінкерних кілець у печі;
- оптимізація системи спалювання палива;
- мінімізація підсосу повітря в голівках печей;
- мінімізація коефіцієнта надлишку повітря в печі;
- стабільність параметрів роботи печі;
- оптимізація процесу контролю;
- використання мінералізаторів – інтенсифікаторів процесу випалу.

Для зниження питомих витрат тепла на випал клінкеру важливим фактором є стабільна робота пічного агрегату з параметрами, близькими до оптимальних. Це досягається шляхом:

– використання систем безперервного комп'ютерного моніторингу необхідного комплексу параметрів роботи пічного агрегата;

- використання систем автоматичного управління технологічним процесом або його окремими етапами;

- оптимізації та стабілізації складу сировинної суміші, підвищенням рівномірності її подачі в піч;

- оптимізації складу і підвищенням рівномірності подачі палива у піч;

- у разі використання вторинних видів палива – стабілізації характеристик, рівномірності подачі, оптимізації способу введення і спалювання вторинного палива в печі.

Підвищення енергоефективності виробництва цементу може бути досягнуто додатковою генерацією пари та електричної енергії.

Основною проблемою для генерації додаткової кількості енергії є розробка відповідного пристрою (турбіни). Рекуперація здебільшого надлишкового тепла здійснюється в холодильнику, меншою мірою – газами, які виходять з печі. Для цього використовуються процес органічного циклу Ранкіна або звичайний процес парового циклу. Крім того, надлишок тепла з холодильника або печі рекуперується прямим нагріванням газу.

Рекуперація надлишку тепла шляхом генерації пари і електричної енергії відбувається незалежно від вартості енергії та викидів CO<sub>2</sub>.

На цементному заводі «Слайт» у Швеції застосовується звичайний паровий цикл. Рекупероване тепло направляєтся на існуючий завод з вироблення електричної енергії, який приєднаний до цементного виробництва, де використовується для роботи парової турбіни, що виробляє електричну енергію (приблизно одна третина від загального обсягу пари). Пара генерується в двоступеневій бойлерній системі, частина якої розташована на холодильнику клінкеру, а частина – на низхідному газоході печі. Цей завод постачає близько 6 МВт електроенергії. Використання існуючої парової турбіни значно поліпшило економічну ефективність установки, однак її вартість

не була підрахована. Щорічне виробництво електричної енергії досягає 50 ГВт-год, що становить четверту частину всієї потреби заводу в електроенергії.

Органічний цикл Ранкіна використовується на цементному заводі в Ленгфурті (Німеччина) для вироблення електроенергії при рекуперації тепла низькотемпературних газів з холодильника клінкера. Ця технологія заснована на використанні органічної рідини (пентана), який випаровується при значно менших, ніж вода, температурах. Базові принципи цієї техніки успішно використовувалися довгий час у техніці заморожування. Технологія циклу Ранкіна використовується переважно для вироблення енергії з геотермальних джерел тепла, проте для цементного заводу такий процес був застосований уперше.

Результати показали, що при роботі за таким способом можна генерувати близько 1,1 МВт електричної енергії. Такий ефект був досягнутий для 97% часу роботи печі. Викиди тепла з клінкерного холодильника з відхідним охолоджуючим повітрям досягали 14 МВт при температурі повітря, що відходить у межах 300-350°C, з яких було рекуперовано в середньому 9 МВт. Ця технологія на заводі в Ленгфурті використовується вже понад 10 років.

Відходи тепла також можуть бути рекуперовані з клінкерного холодильника для забезпечення підприємства гарячою водою. У більшості випадків бойлер розташовується після пилоосаджувача, в ролі якого застосовується електрофільтр. В іншому випадку необхідно використовувати спеціальний тип бойлера, стійкого до абразивного зносу, а також встановлювати знепилюючий пристрій (рукавний фільтр) після бойлера. Заводи, які мають подібні установки для отримання гарячої води, є в Німеччині і два – в Туреччині.

При встановленні більш ефективних теплообмінника і клінкерного холодильника надлишок тепла буде знижуватися і з економічної точки зору генерація додаткової кількості енергії

може стати не вигідною, особливо коли основне тепло потрібне для процесу сушіння матеріалу. Тому можливість рекуперації тепла з печі та клінкерного холодильника для генерації енергії повинна оцінюватися в кожному конкретному випадку з урахуванням всіх можливих обставин. Економічна спроможність може залежати від місцевих умов, вартості електроенергії та потужності заводу.

Рекуперація тепла для прямого нагріву, особливо з клінкерного холодильника, можлива, якщо є в наявності певна кількість надлишку тепла. Рекуперація тепла шляхом прямого нагріву користується попитом. Генератор виробляє електричну енергію, яка може бути використана або на заводі, або для постачання в електричній мережі загального користування.

НДТ для скорочення/мінімізації питомих витрат тепла на випал клінкеру шляхом застосування об'єднаних технічних рішень наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3

**НДТ для скорочення/мінімізації питомих витрат тепла на випал клінкеру**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Використання сухого способу виробництва, оптимізація кількості ступенів циклонного теплообмінника відповідно до характеристик сировинних матеріалів	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
2	Застосування пічної системи оптимальної конфігурації та стабільного режиму роботи пічного агрегату відповідно до встановлених параметрів шляхом: – оптимізації системи контролю, включаючи автоматичний комп'ютерний контроль, і автоматизації управління	Для нових і тих підприємств, що модернізуються

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
	технологічними процесами; – використання сучасних систем гомогенізації, дозування і подачі в піч матеріалів і палива	
3	Рекуперація надлишку тепла з пічної системи, особливо з клінкерного холодильника, використання рекуперованого тепла для сушки сировинних матеріалів	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
4	Використання висококалорійного палива з характеристиками, що створюють позитивний ефект на зниження питомих витрат тепла	Для всіх підприємств
5	Мінімізація підсосів атмосферного повітря в пічну систему	Для всіх підприємств
6	Мінімізація газового потоку в систему байпасу	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
7	Мінімізація вологості сировинного шламу шляхом заміни частини природних компонентів на техногенні матеріали і застосування розріджувачів шламу	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
8	Зниження споживання теплової енергії шляхом вироблення додаткової кількості електроенергії або тепла шляхом об'єднання заводів з теплоелектростанціями або теплоцентралями на базі корисної рекуперації тепла, в межах схем регулювання енергії, які економічно стійкі	Для всіх підприємств

Технологічні показники при реалізації НДТ наведено в табл. 6.4

Таблиця 6.4

**Технологічні показники НДТ**

<b>Технологічний показник</b>	<b>Значення, МДж/т</b>	<b>Значення, кг у.п./т клінкеру</b>
Питомі витрати тепла на випал клінкеру:		
– для заводів сухого способу виробництва;	3550-4120	90-160
– для заводів мокрого способу виробництва;	5750-6900	196-235
– для заводів комбінованого способу виробництва	3950-4540	135-155

**6.2.1. Використання відходів як альтернативного палива**

Спеціально відібрані відходи з адекватною калорійністю можна використовувати в цементній печі замість звичайного викопного палива (такого, як вугілля) з урахуванням їхніх характеристик. Їх називають альтернативним паливом і воно використовується тільки після виконаних попередніх випробувань. Підбір відходів відбувається за важливими критеріями, оскільки вони впливають на роботу печі і на викиди. До них відносяться фізичні критерії (наприклад, здатність до переносу потоком повітря) та хімічні критерії (наприклад, вміст хлору, сірки, лугів, летких металів, реакційна здатність).

Щоб гарантувати характеристики альтернативного палива, має працювати система забезпечення якості, яка передбачатиме відбір і приготування зразків, аналізи і контроль.

Залежно від типу відходів і їхніх характеристик, важливим є місце подачі відходів у піч, оскільки це впливає на викиди з печі.

В основному при підвищеній температурі займання відходів застосовується подача їх через головний пальник. Для всіх точок подачі температура газів у печі повинна підтримуватися не менше 850°C протягом 2 с. Якщо використовуються відходи, що містять більше 1% хлору, то вони повинні подаватися в зону печі, де температура газів повинна підтримуватися не менше 1100°C протягом 2 с.

Для контролю викидів потрібно встановлювати додаткове обладнання. Для забезпечення безпеки довкілля, його якості та відповідності стандартам потрібні спеціальний контроль і відповідні технічні рішення.

При використанні небезпечних відходів (рідкі паливні відходи) потрібно дотримуватися заходів безпеки, особливо при їхній попередній переробці, наприклад, складуванні або подачі цих відходів у виробництво. Заходи безпеки для потенційно самозаймистих матеріалів особливо важливі при доставці паливних відходів з підприємств попереднього перероблення та сортування на підприємства з виробництва цементу.

Вибір і використання альтернативного палива обумовлено низкою взаємодіючих факторів, головними з яких є зниження викидів CO, NO<sub>x</sub>, а також зниження використання природних ресурсів, викопного палива і сировинних матеріалів.

Такі характеристики різних типів альтернативного палива як вологість та калорійність можуть впливати на питоме споживання енергії. Наприклад, низька калорійність і висока вологість призводять до збільшення питомого споживання теплової енергії на одну тонну клінкеру. Щоб досягти такого ж споживання енергії при використанні палива з низькою калорійністю, його обсяг має бути більшим у порівнянні з використанням звичайного палива.

Залежно від концентрації високолетких металів у альтернативному паливі, при їх використанні може змінюватися кількість викидів металів. Це повинно контролюватися і мінімізуватися шляхом застосування відповідних заходів.

При використанні суміші палив питоме споживання енергії на одну тонну клінкеру змінюється з різних причин, залежних від типу палива, його калорійності. Аналіз даних показує, що калорійність викопного палива (вугілля) знаходиться в межах 26-30 МДж/кг, мазуту – 40-42 МДж/кг, а калорійність пластиків коливається від 17 до 40 МДж/кг. Слід зазначити, що калорійність альтернативного палива змінюється в широкому інтервалі, аж до 40 МДж/кг. Калорійність тваринних відходів, що використовуються у цементних печах як альтернативне паливо, знаходиться в межах 14-22 МДж/кг.

У порівнянні зі звичайним паливом застосування альтернативного знижує виробничі витрати. Споживання теплової енергії зазвичай становить 30-40% від собівартості продукції. Тому вартість палива є значною частиною виробничих витрат при отриманні цементу. Альтернативне паливо може бути дешевшим за звичайне, але вартість буде змінюватися в залежності від типу відходів та місцевих умов. Однак відходи, які використовуються в якості палива, часто піддаються попередньому обробленню, гомогенізації до їхнього безпосереднього використання на цементних заводах, а це здорожчує їхню вартість. Також на збільшення вартості впливає додатковий контроль якості та аналіз складу відходів.

НДТ при використанні відходів як альтернативного палива – це мінімізація ризику збільшення викидів шкідливих речовин шляхом застосування технічних рішень, наданих у табл. 6.5.

Таблиця 6.5

**НДТ при використанні відходів як альтернативного палива**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Використання відповідних точок введення альтернативного палива в піч з метою забезпечення певної температури і часу перебування паливовмісних відходів у даній зоні, в залежності від їхніх властивостей і конструкції печі	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
2	Подача альтернативного палива, що містить органічні компоненти, які можуть випаровуватися, до зони кальцинування в зону з необхідною температурою	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
3	Управління роботою печі таким чином, щоб газу від спалювання паливовмісних відходів перебували в контрольованому, гомогенізованому вигляді навіть при найбільш несприятливих умовах при температурах понад 850°C не менше 2 с	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
4	Збільшення температури газів у зоні печі, де відбувається горіння паливовмісних відходів, до 1100°C і вище, якщо спалюються небезпечні відходи з вмістом понад 1% галогеновмісних органічних речовин (виражені у вигляді хлору)	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
5	Забезпечення постійної і стабільної подачі відходів у піч	Для всіх підприємств
6	Припинення спалювання відходів при режимі розпалу й охолодження (пуску та зупинки) печі, коли необхідна температура і час перебування матеріалу в печі не можуть бути забезпечені	Для всіх підприємств

### 6.3. Зниження питомих витрат енергії на виробництво 1 т портландцементу

Головними споживачами електричної енергії є млини (помол цементу і сировини), витяжні вентилятори і димососи (печі, сировинні та цементні млини), які всі разом споживають понад 80% електричної енергії. Величина споживаної електричної енергії коливається від 90 до 150 кВт год/т цементу. Зазвичай мокрий спосіб виробництва цементу є більш енергоємним, ніж напівмокрый або сухий.

Витрати електроенергії обумовлені природою матеріалу, що подрібнюється і особливостями процесу його подрібнення. У деяких випадках мінімізація енергоспоживання може бути досягнута простою заміною старих сировинних млинів на нові.

Споживання електричної енергії можна мінімізувати шляхом установки систем управління потужністю і застосування енергетично ефективних технологічних схем подрібнення і такого обладнання, як, наприклад, роликові млини високого тиску для попереднього подрібнення клінкеру, вентилятори зі змінною швидкістю обертання, а також, у деяких випадках, шляхом заміни морально застарілих типів млинів на нові, менш енергоємні. Застосування поліпшеної системи контролю і зниження підсосу повітря також дозволяють оптимізувати споживання електричної енергії.

Найкращою доступною технологією для зниження питомих витрат енергії на виробництво 1 т портландцементу є застосування технічних рішень, показаних у табл. 6.6.

Таблиця 6.6

**НДТ для зниження питомих витрат енергії на виробництво 1 т портландцементу**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Розробка, впровадження і використання на підприємстві системи енергетичного менеджменту	Для усіх підприємств
2	Використання помольного та іншого обладнання з високою енергетичною ефективністю	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
3	Використання високоефективних технологічних схем подрібнення, оптимізованих для подрібнення конкретних видів матеріалів	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
4	Застосування високоефективних інтенсифікаторів процесу подрібнення матеріалів	Для усіх підприємств

Технологічні показники, які можливо отримати при реалізації НДТ, наведені в табл. 6.7.

Таблиця 6.7

**Технологічні показники для НДТ**

Технологічний показник	Значення, кВт·год/ т цементу
Питоми витрати енергії на виробництво 1 т портландцементу:	
– для заводів сухого способу виробництва;	110-140
– для заводів мокрого способу виробництва	100-135

## 6.4. Зниження викидів шкідливих речовин при виробництві цементу

### 6.4.1. Зниження викидів пилу

#### 6.4.1.1. Зниження викидів пилу з організованих джерел

На цементному заводі є різні джерела організованих викидів пилу: печі, клінкерні холодильники і млини для помолу сировинних матеріалів, цементу та вугілля, а також допоміжне обладнання. Основна частина пилу викидається в атмосферу з обортових печей для випалу портландцементного клінкеру. Однак методи і принципи зниження викидів пилу з обортових печей використовуються і для інших джерел організованих викидів пилу.

Основна частина викидів пилу (у тому числі розміром частинок менше 2,5 мкм) може бути знижена за рахунок зменшення загальної величини пиловиділення, що досягається шляхом використання ефективної системи пиловловлювання. У минулому використовувалися різні знепилюючі пристрої, а з 2007 року головними знепилюючими установками стали рукавні фільтри, електрофільтри або їх поєднання – так звані гібридні фільтри.

НДТ для зниження викидів пилу з організованих джерел шляхом застосування технічних рішень показано в табл. 6.8.

Таблиця 6.8

#### НДТ для зниження викидів пилу з організованих джерел

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Застосування сучасних електрофільтрів або рукавних фільтрів, оптимізованих для очищення конкретного виду газів	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
2	Застосування гібридних фільтрів	Для нових і тих підприємств, що модернізуються
3	Застосування системи управління ремонтом, спеціально спрямованої на спостереження за станом фільтрів	Для всіх підприємств

Технологічні показники, які можливо отримати при реалізації НДТ, наведено в табл. 6.9.

Таблиця 6.9

#### Технологічні показники для НДТ

Технологічний показник	Значення, мг/м <sup>3</sup>
Викиди пилу з обертової печі (неорганічний пил з вмістом SiO <sub>2</sub> до 20%):	
– для технологічних ліній, що проектуються;	Не більше 25
– технологічні лінії, що введені в експлуатацію після 2008 року;	Не більше 50
– технологічні лінії, що введені в експлуатацію до 2008 року з модернізованими фільтрами;	Не більше 500
– технологічні лінії, що введені в експлуатацію до 2008 року	Не більше 1000

#### 6.4.1.2. Зниження викидів пилу з неорганізованих джерел

Джерелами утворення неорганізованих пилових викидів є процеси складування та переробки сировинних матеріалів, палива і клінкеру, а також будь-які транспортні засоби, що використовуються на території виробництва. Компактне розташування об'єктів є найбільш простим способом зниження неорганізованих викидів пилу. Регулярне і ретельне обслуговування установок завжди призводить до непрямого зниження неорганізованих викидів пилу завдяки зменшенню підсосу повітря або запобігання негерметичності установок. Використання автоматичних приладів і системи контролю також сприяє зниженню викидів пилоподібних частинок, так само як і постійна безвідмовна надійна робота установок.

Щоб знизити викиди дисперсного пилу на відкритому складі, де розміщені сировинні матеріали або паливо, штабелі і майданчики навалнього зберігання можуть бути закриті або укриті за допомогою різних перегородок, покриттів, розділені стінами або огорожами, що складаються з вертикальних зелених рослин (штучні або природні бар'єри для запобігання впливу вітру).

НДТ для зниження викидів пилу з неорганізованих джерел шляхом застосування технічних рішень, надано в табл. 6.10.

Таблиця 6.10

**НДТ для зниження викидів пилу з неорганізованих джерел**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Укриття/капсулювання операцій, пов'язаних з виділенням пилу	Для всіх підприємств
2	Використання закритих конвеєрів та елеваторів	Для всіх підприємств
3	Зменшення місць підсмоктування повітря або просипання матеріалу, герметизація установок	Для всіх підприємств
4	Використання гнучких шлангів та рукавів, забезпечених системою уловлювання пилу, при навантаженні цементу в цементовоз	Для всіх підприємств
5	Захист від вітру	Для всіх підприємств
6	Водне обприскування і хімічні речовини, що пригнічують утворення пилу	Для всіх підприємств
7	Покриття, миття доріг та їхнє прибирання	Для всіх підприємств
8	Зволоження штабелів	Для всіх підприємств

У результаті реалізації НДТ досягається мінімізація викидів пилу з неорганізованих джерел.

#### 6.4.2. Зниження викидів оксидів азоту NO<sub>x</sub>

Для зниження викидів NO<sub>x</sub> застосовуються як первинні технічні рішення, інтегровані в технологічний процес, так і спеціальні технології або їхнє поєднання з первинними технічними рішеннями. Первинні технічні рішення надано в табл. 6.11.

Таблиця 6.11

**Технічні рішення для зниження викидів NO<sub>x</sub>, що застосовуються при виробництві цементу**

Технічне рішення	Ефективність зниження викидів, %	Дані щодо викидів, мг/м <sup>3</sup>
Оптимізація процесу випалу	25	Знижуються з 1400 до 1000
Охолодження полум'я факела	0-35	Менше 500-1000
Застосування пальників з низьким виділенням NO <sub>x</sub>	0-35	Менше 500-1000
Постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі	20-40	–
Використання мінералізаторів	10-15	–
Технологія селективного некаталітичного відновлення NO <sub>x</sub> (SNCR)	30-90	200-500
Технологія селективного каталітичного відновлення NO <sub>x</sub> (SCR)	43-95	200-500

**Оптимізація процесу випалу.** Оптимізація процесу випалу, стабільна і оптимальна роботи печі, оптимізація процесу контролю, гомогенізації, подачі палива сприяють зниженню викидів NO<sub>x</sub>. Первинна оптимізація технічних процесів передбачає оптимізацію контролю процесу випалу і викидів,

поліпшення роботи установок непрямого спалювання палива, оптимізацію роботи холодильника, вибору палива і оптимізацію вмісту кисню і надлишку повітря при обпалі клінкеру.

Шляхом оптимізації роботи контрольно-виміральної техніки і обладнання досягається зниження викидів  $\text{NO}_x$  з 1400 до 1000  $\text{мг/нм}^3$ .

**Охолодження полум'я факела.** Додавання води в паливо, або безпосередньо в полум'я, з використанням різних методів інжекції (вприскування рідини або рідини + твердої речовини), використання рідких і твердих відходів з високою вологістю знижує температуру полум'я і збільшує концентрацію гідроксильних радикалів. Це позитивно впливає на зниження утворення  $\text{NO}_x$  у зоні горіння факела. Однак при цьому потрібне додаткове тепло для випаровування води, що викликає невелике збільшення питомих витрат тепла на випал клінкеру і викидів  $\text{CO}_2$  (приблизно на 0,1-1,5%).

Зниження температури полум'я факела може бути досягнуто шляхом інжекції в факел тонкоподрібненого вапняку або шляхом спільного помолу невеликої кількості вапняку і твердого палива (вугілля). При раціональному коригуванні складу сировини охолодження полум'я за рахунок інжекції тонкоподрібненого вапняку не підвищує питомі витрати тепла і не збільшує викиди  $\text{CO}_2$  з печі.

Вприскування води може створити проблеми в управлінні піччю, знизити вихід клінкеру і вплинути на його якість.

Шляхом охолодження полум'я факела досягається зниження викидів  $\text{NO}_x$  до величин менше 500-1000  $\text{мг/нм}^3$ .

**Застосування пальників з низьким виділенням  $\text{NO}_x$ .** Конструкції пальників з низьким виділенням  $\text{NO}_x$  розрізняються в деталях, але в більшості конструкцій паливо і повітря подаються в піч через коаксіальні труби. Кількість первинного повітря знижується до 6-10% від необхідного згідно стехіометрії для горіння палива (зазвичай 10-15% у традиційних пальниках).

Первинне повітря подається з великою швидкістю через зовнішній канал. Вугілля вдувається через центральну трубу або через середній канал. Третій канал використовується для вихрового повітря. Закрутка повітря здійснюється спеціальними лопатками, розташованими поблизу сопла пальника.

Ефект такої конструкції пальника полягає в дуже швидкому займанні палива, особливо при наявності в паливі летких сполук, при нестачі кисню в атмосфері печі, що знижує рівні утворення  $\text{NO}_x$ .

Застосування пальників з низьким виділенням  $\text{NO}_x$  дозволяє знизити викиди  $\text{NO}_x$  до величин менше 500-1000 мг/нм<sup>3</sup>.

**Постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі.** Постадійне спалювання палива застосовується в цементних печах, обладнаних декарбонізатором спеціальної конструкції. Перша стадія горіння палива відбувається в обертовій печі при оптимальних умовах випалу клінкеру. Друга стадія протікає в пальнику на вході матеріалу в піч, де утворюється відновлювальна атмосфера, яка розкладає частину оксидів азоту, накопичених у зоні випалу. Висока температура в цій зоні особливо краща для реакції перетворення  $\text{NO}_x$  в елементарний азот. На третій стадії паливо подається в декарбонізатор з кількістю третинного повітря, також утворюючи відновлювальну атмосферу. Ця система знижує кількість  $\text{NO}_x$ , що утворюються при спалюванні палива в декарбонізаторі, а також зменшує кількість  $\text{NO}_x$ , що надходять у піч іззовні. На четвертій фінальній стадії третинне повітря, яке залишилося, подається у верхню частину системи для залишкового спалювання.

Технологія постадійного спалювання палива може бути використана тільки на печах, обладнаних декарбонізатором. Для заводу, що використовує циклонний теплообмінник без декарбонізатора, необхідна істотна модифікація обладнання.

Спалювання кускових відходів палива (наприклад, автомобільних шин) є одним із варіантів технології стабільного спалювання палива, при цьому спалювання шматків палива супроводжується утворенням відновлювальної атмосфери в зоні випалу. У печах, обладнаних запічними теплообмінниками і декарбонізатором, подача шматків палива виконується на вході в піч або в декарбонізатор. Спалювання кускового палива може знизити викиди  $\text{NO}_x$  на 20-30%.

У довгих печах мокрого і сухого способу виробництва створення відновлювальної зони спалюванням кускового палива також може знизити викиди  $\text{NO}_x$ . Оскільки в довгих печах немає вільного доступу палива в зони з температурою понад  $900-1000^\circ\text{C}$ , система спалювання палива всередині печі влаштовується таким чином, аби забезпечити можливість подачі в неї відходів, які неможливо подати через основний пальник (наприклад, шини).

Наявні установки зі спалювання паливних відходів у середній частині печі забезпечують зниження викидів  $\text{NO}_x$  на 20-40%.

При використанні таких установок швидкість горіння палива може мати критичне значення. Якщо горіння повільне, то створюється відновлювальна зона випалу, яка негативно впливає на якість продукції. Якщо ж горіння палива відбувається досить швидко, відповідна ділянка зони ланцюгової завіси перегрівається, і в результаті цього ланцюги вигорають.

**Використання мінералізаторів.** Додавання в сировинну суміш мінералізаторів, таких як фторид кальцію, є технологією регулювання якості клінкеру, що дозволяє знизити температуру в зоні спікання. При зниженні температури випалу одночасно досягається зменшення утворення  $\text{NO}_x$  на 10-15%.

**Технологія селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту (SNCR).** Технологія селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту (SNCR) включає інжекцію в димові

гази водного розчину аміаку (з умістом  $\text{NH}_3$  до 25%), водних розчинів сполук аміаку або сечовини для відновлення  $\text{NO}_x$  до  $\text{N}_2$ . Оптимальний температурний інтервал протікання реакції відновлення – 830-1050°C при забезпеченні достатнього часу контакту відновлюючого агента з димовими газами.

Якщо завод вже обладнаний системою постадійного спалювання палива, то необхідний подальший розвиток використання технології SNCR. Одночасне використання цих технологій вимагає регулювання температури і атмосфери з таким розрахунком, щоб вони відповідали один одному.

Зниження викидів  $\text{NO}_x$  може бути також досягнуто інжекцією відновлюючих реагентів в окисну, а також у відновну зону печі з постадійним спалюванням палива. Інкєкція в окислювальну зону краща, оскільки ймовірність збільшення викидів  $\text{CO}$  в цьому випадку менша в порівнянні з інжекцією у відновну зону. Завдяки різним конструкціям декарбонізатора дизайн і режим роботи установки SNCR повинні бути адаптовані до відповідної технології.

**Технологія селективного каталітичного відновлення оксидів азоту (SCR).** У технології SCR  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$  відновлюються до  $\text{N}_2$  за допомогою  $\text{NH}_3$  і каталізатора при температурі близько 300-400°C. У ролі відновника передбачається використання водних розчинів аміаку або сечовини. Ця технологія широко застосовується для зниження  $\text{NO}_x$  в інших галузях промисловості (наприклад, на теплоелектростанціях при спалюванні відходів). У цементній промисловості розглядаються переважно дві системи: установка з низьким пиловиділенням між системою знепилювання й димарем і з високим пиловиділенням – між теплообмінником і системою знепилювання. Установка системи з низьким пиловиділенням вимагає повторного підігріву газів, що відходять, після їх знепилювання, що супроводжується додатковими витратами енергії і втратами тиску. Система з високим пиловиділенням газів краща за технічними та економічними показниками. Ця система не вимагає додаткового

підігріву, оскільки температура газів на виході з теплообмінника зазвичай досить висока для роботи із застосуванням SCR технології.

Потенційно із застосуванням технології SCR може бути досягнуто зниження викидів  $\text{NO}_x$  до 85-90%.

Загальним недоліком технологій SNCR і SCR є можливість проскакування (додаткового викиду)  $\text{NH}_3$  у разі неповного використання відновника для відновлення  $\text{NO}_x$ .

НДТ для зниження викидів  $\text{NO}_x$  у відведених пічних газах шляхом застосування технічних рішень, надано в табл. 6.12.

Таблиця 6.12

**НДТ для зниження викидів  $\text{NO}_x$  у відведених пічних газах**

<b>№ п/п</b>	<b>Метод/обладнання</b>	<b>Застосовність</b>
1	Оптимізація процесу випалу	Для всіх підприємств
2	Охолодження полум'я факела	Для всіх підприємств
3	Застосування пальників з низьким виділенням $\text{NO}_x$	Для всіх підприємств
4	Постадійне спалювання палива, спалювання палива в середній частині печі	Для заводів сухого або мокрого способу виробництва при модернізації печі
5	Використання мінералізаторів при випалюванні клінкеру	Для всіх підприємств
6	Застосування технології селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту SNCR	Для заводів сухого способу виробництва
7	Застосування технології селективного каталітичного відновлення оксидів азоту SCR	Для заводів сухого способу виробництва (на стадії розробки)

Технологічні показники, які можливо отримати при реалізації НДТ, наведено в табл. 6.13.

Таблиця 6.13

**Технологічні показники для НДТ**

Технологічний показник	Значення, мг/нм <sup>3</sup>
Викиди оксидів азоту NO <sub>x</sub> з обертової печі: – для печей з циклоном теплообмінником; – для довгих печей мокрого способу виробництва і печей Лепола	Не більше 500 Не більше 800

НДТ при використанні технології селективного некаталітичного відновлення оксидів азоту SNCR для підтримування проскоків аміаку NH<sub>3</sub> на максимально низькому рівні шляхом застосування технічних рішень, показано в табл. 6.14.

Таблиця 6.14

**НДТ для підтримування проскоків аміаку NH<sub>3</sub> на максимально низькому рівні**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Забезпечення стехіометричної кількості відновника при забезпеченні зниження викидів NO <sub>x</sub> до необхідного рівня	Для заводів сухого способу виробництва, обладнаних системою SNCR
2	Забезпечення рівномірного розподілу відновника в газовому потоці	Для заводів сухого способу виробництва, обладнаних системою SNCR

Технологічні показники, які можливо отримати при реалізації НДТ, наведено в табл. 6.15.

Таблиця 6.15

**Технологічні показники для НДТ**

Технологічний показник	Значення, мг/нм <sup>3</sup>
Проскок NH <sub>3</sub>	Не більше 30-50

### 6.4.3. Зниження викидів діоксиду сірки SO<sub>2</sub>

Зниження викидів діоксиду сірки SO<sub>2</sub> при виробництві цементу здійснюється по стадійно.

Першим кроком зниження викидів SO<sub>2</sub> є реалізація первинних технічних рішень:

- вибір сировинних матеріалів, палива і відходів (при їхньому використанні) з невисоким вмістом вільної сірки або сірки у вигляді сульфідів;
- оптимізація процесу випалу клінкеру, що передбачає стабільну роботу печей;
- однорідний розподіл нагрітого матеріалу в печі;
- запобігання утворенню відновлювальної атмосфери при випалюванні клінкеру.

Концентрація кисню на вході матеріалу в піч є вирішальним фактором зв'язування SO<sub>2</sub> сировинними матеріалами. Збільшення вмісту кисню в печі знижує кількість викидів SO<sub>2</sub>. Надлишок кисню забезпечує утворення сульфатів у нижній частині циклонного теплообмінника, які виходять з печі разом з клінкером.

Застосування системи байпасу запобігає накопиченню в печі легкоплавких сульфідів лужних металів і призводить до деякого зниження викидів SO<sub>2</sub>.

Баланс для захисту довкілля повинен бути знайдений завдяки оптимізації співвідношення викидів NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub>/CO шляхом регулювання вмісту кисню в печі.

Якщо первинних технічних рішень недостатньо, необхідно використовувати радикальні технічні рішення.

Радикальними технічними рішеннями, які дозволяють різко знизити викиди SO<sub>2</sub> з цементних печей, є використання добавок сорбенту або застосування мокрого скрубера.

НДТ для зниження викидів SO<sub>2</sub> у відведених пічних газах шляхом застосування технічних рішень показано в табл. 6.16.

Таблиця 6.16

**НДТ для зниження викидів SO<sub>2</sub> у відведених пічних газах**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Вибір сировинних матеріалів, палива і відходів (при їх використанні) з невисоким вмістом вільної сірки або сірки у вигляді сульфідів	Для всіх підприємств
2	Використання добавок сорбенту (абсорбенту)	Найбільш ефективна при сухому способі виробництва при додаванні Ca(OH) <sub>2</sub> до сировинної суміші
3	Використання мокрого скрубера	Для всіх підприємств

Технологічні показники, які можливо отримати при реалізації НДТ, наведено в табл. 6.17.

Таблиця 6.17

**Технологічні показники для НДТ**

Технологічний показник	Значення, мг/нм <sup>3</sup>
Викиди діоксиду сірки SO <sub>2</sub> з обертової печі	Не більше 400

**6.4.4. Зниження викидів монооксиду вуглецю CO**

Оскільки одним із джерел CO в димових газах цементних печей є органічний вуглець у складі сировинних матеріалів, то первинним технічним рішенням для зниження викидів CO є вибір (коли це можливо) сировинних матеріалів із низьким вмістом органічного вуглецю.

Іншою причиною наявності CO в газах обертових печей є недостатня кількість кисню (низький коефіцієнт надлишку повітря) для спалювання технологічного палива.

Швидке і різке збільшення вмісту CO у димових газах (проскок CO) зазвичай спостерігається в періоди нестабільної роботи печі, при її розпалі, при змінному складі палива і його нерівномірній подачі в піч. Технічні рішення, спрямовані на стабілізацію параметрів роботи печі, складу і характеристик застосовуваного палива і подачі його в піч, даватимуть зниження викидів CO.

Висока концентрація CO в газах обертової печі свідчить про неповне згоряння палива, а, отже – про підвищення питомих витрат тепла на випал портландцементного клінкеру.

Відновлювальна атмосфера в печі, що виникає через присутність у газах CO, може негативно вплинути на якість портландцементного клінкеру. З іншого боку, відновлювальна атмосфера сприяє зниженню викидів NO<sub>x</sub> і SO<sub>2</sub> у газах, що відходять з печі.

При високій концентрації CO в димових газах існує ризик вибуху електрофільтрів. У випадках проскоку CO електрофільтр зазвичай відключається. Тимчасове відключення електрофільтру може призвести до збільшення викидів пилу і важких металів.

Для контролю вмісту CO у димових газах повинні використовуватися автоматичні безперервні вимірювачі з швидким часом відгуку, а пробовідбірник повинен знаходитися близько до джерела CO, наприклад, у газоході від циклонного теплообмінника до башти кондиціонування при сухому способі виробництва цементу, або в голівці холодного кінця печі – при мокрому способі виробництва цементу.

НДТ для зниження вмісту CO у відхідних пічних газах шляхом застосування технічних рішень подано в табл. 6.18.

Таблиця 6.18

**НДТ для зниження вмісту CO у відведених пічних газах**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Вибір (за можливості) сировинних матеріалів з низьким вмістом органічного вуглецю	Для всіх підприємств
2	Оптимізація процесу випалу шляхом підтримки необхідного коефіцієнта надлишку повітря в печі	Для всіх підприємств
3	Забезпечення однорідного складу і властивостей палива, рівномірність і постійність його подачі в піч	Для всіх підприємств
4	Стабільний режим роботи печі, застосування автоматизованих систем управління роботою печі	Для всіх підприємств
5	Безперервне автоматичне вимірювання CO в пічних газах за допомогою використання обладнання для моніторингу з коротким часом відгуку, розташованого поблизу джерела утворення CO	Для всіх підприємств

Технологічні показники, які можливо отримати при реалізації НДТ, наведено в табл. 6.19.

Таблиця 6.19

**Технологічні показники для НДТ**

Технологічний показник	Значення, мг/нм <sup>3</sup>
Викиди оксиду вуглецю CO з обертової печі	Не більше 600

**6.5. Моніторинг**

НДТ для регулярного моніторингу та вимірювання параметрів і викидів відповідно до стандартів EN, ISO або

національних стандартів, що гарантують відповідність даних до науково обґрунтованих критеріїв, надано в табл. 6.20

Таблиця 6.20

**НДТ для регулярного моніторингу і вимірювання параметрів і викидів**

№ п/п	Метод/обладнання	Застосовність
1	Безперервні вимірювання параметрів, які свідчать про стабільність процесу, таких, як температура, вміст O <sub>2</sub> у газах, розрідження і швидкість потоку газу	Для всіх підприємств
2	Моніторинг та стабілізація критичних параметрів процесу: однорідність і сталість складу сировинної суміші, палива, рівномірність подачі палива у піч, коефіцієнт надлишку повітря в печі	Для всіх підприємств
3	Періодичні вимірювання викидів NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> і CO з печі відповідно до графіка виробничого контролю	Для всіх підприємств
4	Безперервні вимірювання викидів NH <sub>3</sub> з обертової печі при використанні технології селективного некаталітичного відновлення (SNCR) оксидів азоту	Для печей сухого способу виробництва, обладнаних електроопалювальними установками SCNR
5	Періодичні вимірювання викидів пилу, високолетких металів, HCl, HF	Для визначення актуального нормативу викидів і його застосовності
6	Періодичні вимірювання викидів летких органічних сполук, ПХДД/ПХДФ	При використанні відходів як сировини або альтернативного палива
7	Періодичні вимірювання викидів пилу з організованих джерел, окрім печі	Для всіх підприємств

## **7. ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ НАЙКРАЩИХ ДОСТУПНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ЦЕМЕНТУ**

Оскільки в даний час при модернізації існуючих і будівництві нових технологічних ліній зазвичай використовується устаткування іноземних фірм-виробників, то в даному розділі наводяться економічні аспекти реалізації НДТ при виробництві цементу в країнах ЄС [8].

### **7.1. Вибір способу виробництва**

Процес переведення заводу з мокрого на сухий спосіб високовитратний, вимагає майже 100 млн євро.

### **7.2. Рекуперація енергії з печі та холодильника/додаткова генерація енергії**

При виробництві цементу надлишок тепла з холодильника або печі можна рекуперувати, використовуючи процес органічного циклу Ранкіна, або через пряме нагрівання газу.

Вартість великої теплоелектростанції повного циклу в середньому знаходиться в межах 0,8-1,2 млн євро на 1 МВт потужності, що генерується.

### **7.3. Оптимізація контролю технологічного процесу**

Вартість оптимізації контролю технологічного процесу коливається в широких межах, до 5 млн євро.

Потрібні інвестиції до 300 000 євро для автоматизації процесу випалу, заснованої на контролі викидів  $\text{NO}_x$  із застосуванням комп'ютерної системи, а також потрібні додаткові інвестиції для установки на заводі вимірювальної та дозуючої техніки.

Спочатку оптимізація роботи печі дає зниження операційних витрат, збільшення продуктивності та підвищення

якості продукції. Зазвичай операційні витрати стосовно експлуатації печі знижуються у порівнянні з аналогічними витратами без оптимізації. В результаті зниження споживання палива і футерування знижується вартість установки, підвищується її продуктивність та поліпшуються інші показники.

#### **7.4. Використання відходів як палива**

Оскільки в собівартості продукції вартість використовуваної енергії становить 30-40%, то застосування відходів як альтернативного палива дає істотне зниження виробничих витрат.

Відходи в якості палива можуть бути дешевшими, ніж звичайне паливо, хоча вартість змінюватиметься у залежності від типу відходів та місцевих умов. Однак альтернативне паливно часто піддається попередньому обробленню та гомогенізації до його використання на цементних заводах, що здорожчує його. До того ж додатковий контроль і аналізи складу відходів також підвищують їхню вартість.

#### **7.5. Зниження викидів пилу**

На цементному заводі є різні джерела організованих викидів пилу (печі, клінкерні холодильники і млини для помолу сировинних матеріалів, цементу і вугілля, а також допоміжні процеси). Основна частина викидів пилу (з розміром частинок менше 10 і 2,5 мкм) може бути знижена за рахунок зменшення загальної величини пиловиділення, що досягається шляхом використання ефективної системи пиловловлювання. Для цього використовують електрофільтри, рукавні та гібридні фільтри.

Огляд технічних рішень для контролю викидів пилу в цементному виробництві наведено в табл. 7.1, а дані за вартістю технічних рішень для зниження викидів пилу – в табл. 7.2.

Таблиця 7.1

Огляд технічних рішень для контролю викидів пилу в цементному виробництві згідно [8]

Технічні рішення	Застосування	Дані викидів	Вартість <sup>3)</sup>	Технічні рішення	
		мг/мм <sup>3</sup> <sub>1)</sub>	кг/т <sup>2)</sup>	Інвестиції	Витрати на експлуатацію
				млн євро	євро/т клінкеру
Електрофільтри	усі пічні системи	10-<20	0,02-0,05	2,1-6,0	0,1-0,2
	клінкерні холодильники	10-<20	0,02-0,05	0,8-1,2	0,09-0,18
	цементні млини	<10	0,02	0,8-1,2	0,09-0,18
Рукавні фільтри	усі пічні системи	<10	0,02	2,1-6,0	0,15-0,35
	клінкерні холодильники	<10	0,02	1,0-1,4	0,1-0,15
	млини (сировинні, цементні, вугільні)	<10	0,02	0,3-0,5 <sup>4)</sup>	0,03-0,04
Гібридні фільтри	усі пічні системи, клінкерні холодильники, цементні	<10-20	0,02-0,05		
Зниження дифузійного пилу	Усі заводи	–	–	–	–

- 1) Для звичайної пічної системи, сухий газ, 273 К, 101,3 кПа і 10% O<sub>2</sub>.
- 2) кг/т клінкеру: для потоку газів 2300 м<sup>3</sup>/т клінкеру.
- 3) Вартість для зниження викидів до 10-30 мг/м<sup>3</sup>, піч продуктивністю 3000 т/добу клінкеру і початкові викиди 500 г пилу/м<sup>3</sup>.
- 4) Залежить від матеріалу фільтра, ефективність знепилювання понад 99,9%.

Таблиця 7.2

Дані щодо вартості технічних рішень для зниження викидів пилу згідно [8]

Інвестиції та вартості технічних рішень щодо зниження викидів пилу					
Параметри	Розмір-ність	Технічні рішення			
		Електро-фільтри	Рукавні фільтри	Електро-фільтри	Рукавні фільтри
Опис установки		I <sup>(0)</sup>	II	I <sup>(0)</sup>	II
Продуктивність	т клінкеру за добу	1100	3000	1100	3000
Довговічність	рік	35		35	
Робочий час	год/рік	7680		7680	
Інвестиційна вартість	тис. євро	1500	2100-4600 <sup>8)</sup> , 4500-6000 <sup>9)</sup>	1750	2100-6800 <sup>10)</sup> , 4000-8000 <sup>11)</sup>
Річні капітальні витрати	тис. євро				
Прибуток	%/100/рік	4		4	
Строк придатності контрольного обладнання	рік	10		10	
Загальне	тис. євро	184,94		215,76	

Загальне	тис. євро/ т клінкеру	5,25-E04		6,13-E04	
Фіксовані експлуата- ційні витрати	%/рік <sup>2)</sup>	4		4	
Загальне	тис. євро	60		70	
Загальне	тис. євро/ т клінкеру <sup>3)</sup>	1,70-E04		1,99-E04	
Зміни експлуата- ційних витрат	тис. євро/ т клінкеру	3,15E-04		3,77E-04	
Витрати на тонну клінкеру	тис. євро/ т клінкеру	1,01E-03		1,19E-03	
Вартість на тонну зни- ження заб- руднювачів	тис. євро/т				
Фактор, що не знижує викиди <sup>1)</sup>	т/т клінкеру	0,13 (56,520 мг/нм <sup>3</sup> )		0,13 (56,520 мг/нм <sup>3</sup> )	
Фактор, що знижує викиди <sup>1)</sup>	т/т клінкеру	0,000046 (20,0 мг/нм <sup>3</sup> )		0,000046 (20,0 мг/нм <sup>3</sup> )	
Загальне	тис. євро/т	0,008		0,009	
Загальні експлуата- ційні витрати	тис. євро/ т клінкеру		0,1-0,3		0,1-0,35
Визначення зміни експлуатаці- йних витрат					

Вартість електрики <sup>4)</sup>					
Додаткова потреба ел.енергії ( $\lambda^e$ ) <sup>5)</sup>	кВт-час/ т клінкеру	4,15 (190 кВт)		5,24 (240 кВт)	
Ціна ел.енергії ( $c^e$ )	євро/кВт-г од	0,0569		0,0569	
Загальна	тис. євро/ т клінкеру	2,36E-04		2,98E-04	
Трудові витрати <sup>6)</sup>					
Трудовитрати ( $\lambda^1$ )	люд-рік/ т клінкеру	2,13E-06		2,13E-06	
Заробітна плата	тис. євро/ люд.рік	37,234		37,234	
Загальне	тис. євро/ т клінкеру	7,93E-05		7,93E-05	
Вартість розміщення пилу <sup>7)</sup>					
Усього	тис. євро/ т клінкеру	0		0	
Усього змінних експлуатаційних витрат	тис. євро /т клінкеру <sup>7)</sup>	3,15E-04		3,66E-04	

0) Дані 2000 р., цементний завод з продуктивністю 1100 т/добу в країнах ЄС в 1995 році.

1) 10% O<sub>2</sub>.

2) Капіталовкладення.

3) Розподіл: 50% електрофільтру і 50% рукавного фільтра; використання середнього між електрофільтром і рукавним фільтром.

4) Вартість електрики =  $\lambda e \cdot c_e / 103$  (тис. євро/т).

5) Додаткова потреба в ел.енергії = нове загальне споживання – старе загальне споживання.

6) Вартість праці =  $\lambda l \cdot c_l$  (тис. євро/т).

7) Вартість розміщення пилу клінкеру =  $\lambda d \cdot c_d \cdot e_f$   
не зменшеної \*  $\eta$  / 103 (тис.євро/т).

8) Дані 2000 р. включають величину капіталовкладень для вежі кондиціонування повітря після фільтрувального вентилятора (0,6-0,8 млн євро).

9) Дані 2006 р.

10) Включає капіталовкладення для вежі кондиціонування і вентилятора фільтра (0,6-0,8 млн євро).

11) Для ефективності розділення > 99,9%, що залежить від типу і числа використовуваних фільтрувальних мішків.

## 7.6. Зниження викидів NO<sub>x</sub>

Для зниження або контролю викидів NO<sub>x</sub> вважається придатним використання як первинних заходів, інтегрованих у технологічний процес, так і спеціальних технологій або їх поєднання з первинними заходами.

У табл. 7.3 наведено огляд технічних рішень, що роблять позитивний вплив на зниження викидів NO<sub>x</sub>, які виникають при виробництві цементу, а в табл. 7.4 – вартість даних технічних рішень.

Таблиця 7.3

Технічні рішення для зниження NO<sub>x</sub>, що застосовуються у виробництві цементу згідно [8]

Технічні рішення	Застосування для типів печей	Ефективність зниження викидів (%)	Дані про викиди		Дані про вартість	
			мг/нм <sup>3 1)</sup>	кг/т <sup>2)</sup>	Інвестиції, млн євро	Експлуатаційні витрати, євро/т клінкеру
Охолодження полум'я <sup>5)</sup>	Усі	0-35	Первинне зниження до <500 ... 1000	1,15-2,3	До 0,2	До 0,5
Пальники з низьким виділенням NO <sub>x</sub> <sup>3)</sup>	Усі	0-35	500-1000	1,15-2,3	До 0,45	0,07
Первинні технічні рішення <sup>4)</sup>	Усі	25	Знижується з 1400 до 1050	2,4	0,25	0,056
Спалювання палива всередині печі	Довгі	20-40	Немає інформації	–	0,8-1,7	Немає інформації
Використання мінералізаторів	Усі	10-15	Немає інформації	–	Немає інформації	Немає інформації
Постадійне спалювання палива	Декарбонізатор	10-50	800 <sup>9)</sup> -1000	1,84-203	0,1-2	Немає інформації
	Теплообмінник				1-4	

SNCR <sup>4)5)6)</sup> 12)	Тепло-обмінник декарбонізатор	30-90 <sup>10)</sup>	200 <sup>10)11)</sup> - 500 <sup>14)</sup>	0,4-1,15	0,5-1,2	0,1-1,7
	Колосниковий теплообмінник	35	580 <sup>5)6)</sup>	1,15	0,5	0,84
SCR <sup>7)</sup>	Можливо все, теплообмінник і декарбонізатор	43 <sup>13)</sup> -95	200 <sup>8)</sup> - <500	0,23-1,15	2,2-4,5	0,33-3,0

- 1) Середньодобове значення, сухий газ, 273 К, 101.3 кПа і 10% O<sub>2</sub>.
- 2) кг/т клінкеру: на основі 2300 м<sup>3</sup>/т клінкеру.
- 3) Продуктивність печі 3000 т клінкеру на добу і початкові викиди NO<sub>x</sub> до 2000 мг/м<sup>3</sup>.
- 4) Оцінка виконана експертною групою для печі продуктивністю 1100 т/добу в 2000 р.
- 5) Експерименти у Франції спільно з міністерством з охорони довкілля, міністерством енергетики та асоціацією виробників цементу 2000 року (випуск 2003 р.).
- 6) Співпраця ЦЕМБЮРО зі зниження NO<sub>x</sub>, 2006 р.
- 7) Німеччина та Італія, дані про вартість базуються на використанні печі клінкера з викидами 1500 м<sup>3</sup>/т.
- 8) Результати пілотних випробувань з Німеччини, Італії та Швеції і результати випробувань 2007 рік (200 мг/м<sup>3</sup>) італійського цементного заводу, що використовує технологію SCR; у 1997 році два постачальника в Європі запропонували повномасштабну технологію SCR для

цементної промисловості з гарантією викидів оксидів азоту на рівні 100-200 мг/м<sup>3</sup>.

9) Результати випробувань Французького цементного заводу, піч з декарбонізатором, початковий вміст NO<sub>x</sub> 1000 мг/м<sup>3</sup>.

10) Шведські цементні заводи, середньорічна величина початкових викидів NO<sub>x</sub> 800-1000 мг/м<sup>3</sup>, сліди аміаку 5-20 мг/м<sup>3</sup>, високоефективна технологія SNCR, сліди аміаку враховуються.

11) Німеччина: середньорічна величина 200-350 мг/м<sup>3</sup>, сліди аміаку враховуються.

12) Низький діапазон викидів NO<sub>x</sub> може бути результатом підвищеного викиду NH<sub>3</sub>, що залежить від рівня NO<sub>x</sub>.

13) Результати пілотного випробування і тривалої роботи демонстраційного заводу.

14) У поєднанні з процесом інтегрованих технічних рішень; рівень початкового NO<sub>x</sub> 1200 мг/м<sup>3</sup>; керівництво Французької цементної промисловості за технічними рішеннями зниження викидів NO<sub>x</sub> Франція /міністерство енергетики/ MEDD.

Таблиця 7.4

**Вартість технічних рішень зниження викидів NO<sub>x</sub> [8]**

Параметри	Одиниця виміру	Методи, що застосовуються				
		Первинні технічні рішення <sup>0)</sup>	Охолодження полум'я <sup>8)</sup>	Постадійне спалювання <sup>7)</sup>	Технологія SNCR <sup>9)</sup>	Технологія SCR
Опис установки						
Продуктивність	т/доба клінкеру	1100	3000	3000	1100	1500 <sup>7)</sup>
Продуктивність	т/доба клінкеру	352000			35	
Додаткові роботи	рік	35			35	
Час роботи в рік	год/рік	7680			7680	

Інвестиційна вартість	млн євро	0,25	до 0,2	0,1-2 <sup>8)</sup> 1-4 <sup>9)</sup> 15-20 <sup>10)</sup>	0,6	
Питома інвестиційна вартість	євро/ т клінкеру				0,08- 0,14 <sup>7)</sup>	0,083- 0,87 <sup>7)</sup>
Щорічні капіталовкладення	тис.євро					
Прибуток	%/100/ рік	4			4	
Тривалість роботи обладнання	рік	8			10	
Усього	тис.євро	37,13			166,97	
Усього	тис.євро /т клінкеру	1,05E-04	до 2,5E-04		4,74E-04	
Фіксовані експлуатаційні витрати	%/рік <sup>2)</sup>	4			4	
Усього	тис.євро	10			24	
Усього	тис.євро /т клінкеру	2,84E-05			6,82E-05	
Змінні експлуатаційні витрати	тис.євро /т клінкеру	2,64E-05			5,69E-04	
Витрати на тонну клінкеру	тис.євро /т клінкеру	1,60E-04			1,11E-03	
Витрати на тонну зниженого NOx <sup>3)</sup>	тис.євро на тонну зниж. NOx				330- 450 <sup>7)</sup>	470- 540 <sup>7)</sup>

Фактор не знижених викидів <sup>1)</sup>	Тонн NO <sub>x</sub> на тонну клінкеру	0,00322 (1400 мг/нм <sup>3</sup> )			0,002415 (1050 мг/нм <sup>3</sup> )	
Ефективність зниження <sup>1)</sup>	%	25			62	
Усього	тис.євро /т зниж. NO <sub>x</sub>	0,2			0,74	
Вартість заміни каталізатора	євро на тонну клінкеру					0,10-0,13 <sup>7)</sup>
Визначення зміни експлуатаційних витрат						
Вартість ел.енергії <sup>3)</sup>						
Додаткова потреба в ел. енергії (λ <sup>e</sup> ) <sup>4)</sup>	кВт·год /т клінкеру	0,44 (20 кВт)			0,13 (5,96 кВт)	
Ціна ел.енергії (c <sup>e</sup> )	євро/кВт·год	0,0569			0,0569	
Усього	тис. євро/т клінкеру	2,48E-05			7,4E-06 0,03-0,06 <sup>7)</sup>	0,10-0,11 <sup>7)</sup>
Вартість аміаку <sup>6)</sup>						
Зберігання аміачної води	млн євро					

Ефективність не зниження	Тонна забруднювачів на тонну клінкеру	–			0,00242	
Мольне співвідношення NH <sub>3</sub> / NO <sub>x</sub>		–			1,5	
Питома потреба NH <sub>3</sub> (λ <sup>5</sup> )	т/т видаленого забруднювача	–			0,89	
Ціна NH <sub>3</sub>	євро/т	–			0,26-0,64 <sup>7)</sup> 400	0,13-0,26 <sup>7)</sup>
Ефективність видалення	%	–			62	
Усього	тис. євро /т клінкеру				5,36E-04	
Вартість праці <sup>5)</sup>						
Трудові потреби (λ <sup>1</sup> )	люд-рік/т клінкеру	7,10E-07			7,10E-07	
Заробітна плата	тис. євро/ люд-рік	37,234			37,234	
Усього	тис. євро /т клінкеру	2,48E-05			5,69E-04 0,30-0,70 <sup>7)</sup>	0,33-0,70 <sup>7)</sup>

Усього змінних експлуатаційних витрат	тис. євро /т клінкеру	2,48E-05			5,69E-04 0,30-0,70 <sup>7)</sup>	0,30-0,70 <sup>7)</sup>
Загальна вартість (інвестиції і експлуатаційні витрати)	Євро /т клінкеру				0,38-0,62 <sup>7)</sup> 0,85 <sup>11)</sup>	0,83-0,87 <sup>7)</sup> 2,3 <sup>11)</sup>
<p>0) Дані 2000 р., завод продуктивністю 1100 т/добу – середній у країнах ЄС.</p> <p>1) 10% O<sub>2</sub>.</p> <p>2) Капітальні вкладення.</p> <p>3) Вартість електрики = <math>\lambda e \cdot c_e</math> (тис. євро/т).</p> <p>4) Додаткові потреби в ел. енергії = нове загальне споживання – старе загальне споживання.</p> <p>5) Трудові витрати = <math>\lambda 1 \cdot c_1</math> (тис. євро/т).</p> <p>6) Вартість аміаку: <math>\lambda d \cdot c_d \cdot e_f</math> не зменшеної <math>\cdot \eta / 103</math> (тис.євро/т).  <math>e_f</math> не зменшеної: фактор не зниження викидів забруднювачів (тонна забруднювачів/т).</p> <p><math>\lambda d</math>: питома потреба аміаку (т/т повернутого аміаку); <math>c_d</math>: питома вартість розміщення пилу.</p> <p><math>\eta</math>: ефективність повернення = <math>(1 - e_f \text{ не зменшеної} / e_f \text{ не зменшеної})</math>.</p> <p>7) Німеччина, залежить від рівня зниження NO<sub>x</sub> до 500 або 200 мг/м<sup>3</sup>.</p> <p>8) Піч з декарбонізатором.</p> <p>9) Декарбонізатор і третинний пил для печі продуктивністю 3000 т/добу з підігрівачем і колосниковим холодильником при переведенні в піч з декарбонізатором.</p> <p>10) Переведення печі з підігрівачем і рекуператорним холодильником у піч з декарбонізатором і колосниковим холодильником.</p> <p>11) Австрія.</p>						

## 7.7. Зниження викидів SO<sub>2</sub>

НДТ для зниження викидів SO<sub>2</sub> є використання адсорбенту і мокрого скрубера.

Витрати на реалізацію зазначених технологій наведено в табл. 7.5, 7.6.

Таблиця 7.5

### Огляд технологій контролю і зниження SO<sub>2</sub> [8]

Технічні рішення	Застосування для типів печей	Ефективність зниження викидів (%)	Дані про викиди		Дані про вартість	
			мг/нм <sup>3</sup> <sub>1)</sub>	кг/т <sup>2)</sup>	Інвестиції, млн євро	Експлуатаційні витрати, євро/т клінкеру
Додавання адсорбенту	Усі	60-80	<200-400 <sup>3)</sup>	0,23-0,92	0,2-0,3	0,1-0,4
Мокрий скрубер	Усі	>90	10-300 <sup>4)</sup>	0,02-0,69	5,8-23 <sup>5)</sup>	0,5-2 <sup>5)</sup>

1) Середньодобове значення, сухий газ, 273 К, 101,3 кПа і 10% O<sub>2</sub>.  
 2) кг/т клінкеру: на основі 2300 м<sup>3</sup>/т клінкеру.  
 3) Для початкового рівня SO<sub>2</sub> 1200 мг/м<sup>3</sup>.  
 4) Кінцеве значення викидів залежить від початкового вмісту SO<sub>2</sub> перед установкою мокрого скрубера і може бути вищим.  
 5) У вартість включено також процес SNCR, піч потужністю 2000 т клінкеру на добу і початкові викиди SO<sub>2</sub> 50-600 мг/м<sup>3</sup>, дані про вартість 2007 року.

Таблиця 7.6

Вартість технічних рішень зниження викидів SO<sub>x</sub>

Параметри	Одиниця виміру	Технічні рішення	
		Інжекція абсорбенту	Мокрий скруббер
Продуктивність	т/доба клінкеру	1100	1100
Продуктивність	т/рік клінкеру	35200	35200
Відхідні гази <sup>1)</sup>	нм <sup>3</sup> /год		105417
Довговічність	рік	35	35
Заводський фактор	год/рік	7680	7680
Інвестиційна вартість	тис. євро	200	5500
Щорічні капіталовкладення	тис.євро		
Прибуток	%/рік	4	4
Тривалість роботи обладнання	рік	10	10
Фіксовані експлуатаційні витрати	%/рік <sup>2)</sup>	4	4
Усього	тис.євро	8	220
Усього	тис.євро/ т клінкеру	2,27E-05	6,26E-04
Змінні експлуатаційні витрати	тис.євро/ т клінкеру	6,98E-04	6,06E-04
Витрати на тонну клінкеру	тис.євро/ т клінкеру	7,91E-04	3,16E-03
Витрати на тонну зниженого SO <sub>x</sub>	тис.євро на тонну зниж. SO <sub>x</sub>		
Фактор не знижених викидів SO <sub>x</sub>	тонн SO <sub>x</sub> на тонну клінкеру	0,0023 1000 мг/нм <sup>3</sup>	0,00368 1600 мг/нм <sup>3</sup>
Ефективність зниження	%	60	75
Усього	тис.євро/ т зниж. SO <sub>x</sub>	0,573	1,144

Визначення зміни експлуатаційних витрат			
Вартість ел.енергії <sup>3)</sup>			
Додаткова потреба в ел. енергії ( $\lambda^c$ ) <sup>4)</sup>	кВт·год/ т клінкеру	1,53 70 кВт	8,18 375 кВт
Ціна ел.енергії	євро/кВт·год	0,0569	0,0569
Усього	тис. євро/ т клінкеру	8,69E-05	4,66E-04
Вартість розміщення відходів			
Фактор не зниження викидів забруднюючої речовини <sup>6)</sup>	т забруднювача на тонну клінкеру	0,0023	
Потреба в розміщені відходів	т/т поверненого забруднювача	0	
Питома вартість розміщення відходів ( $c^5$ )	євро/т		
Ефективність видалення	%	60	
Усього	тис. євро/ т клінкеру	0	0
Вартість вапна/вапняку			
Фактор не зниження викидів забруднювачів <sup>6)</sup>	тонна забруднювача на тонну клінкеру	0,0023	0,00368
	Ca/S мольне відношення для виділення SO <sub>x</sub>	2,2	
	Ca/S мольне відношення для видалення SO <sub>x</sub>		1,02

Питомі витрати сорбенту ( $\lambda^s$ )	т вапна/ т видаленого забруднювача	4,24	
Питомі витрати вапняку ( $\lambda^s$ )	т вапняку/ т видаленого забруднювача		1,59
Вартість сорбенту ( $c^s$ )	євро/т	100	20
Ефективність видалення	%	60	75
Усього	тис. євро/ т клінкеру	5,85E-05	8,80E-05
Вартість праці <sup>5)</sup>			
Трудові потреби ( $\lambda^1$ )	люд-рік/ т клінкеру	7,1E-07	1,42E-06
Заробітна плата ( $c^1$ )	тис. євро/ люд-рік	37,234	37,234
Усього	тис. євро/ т клінкеру	2,64E-05	5,29E-05
Усього змінних експлуатаційних витрат	тис. євро/ т клінкеру	6,98E-04	6,06E-04
<p>1) 10% <math>O_2</math>.</p> <p>2) Капітальні вкладення.</p> <p>3) Вартість електрики = <math>\lambda c * c s</math> (тис. євро/т).</p> <p>4) Додаткові потреби в ел. енергії = нове загальне споживання – старе загальне споживання.</p> <p>5) Трудові витрати = <math>\lambda^1 * c^1</math> (тис. євро/т).</p> <p>6) Вартість вапна: <math>\lambda s * c s * e f</math> не зменшеної * <math>\dot{q} / 103</math> (тис.євро/т).</p> <p><math>e f</math> не зменшеної: фактор не зниження викидів забруднювачів (тонна забруднювачів/т); <math>\lambda s</math>: питома потреба вапна (т забруднювача/т) ; <math>c s</math>: вартість вапна (євро/т).</p> <p><math>\lambda d</math>: питома потреба аміаку (т/т повернутого аміаку); <math>c d</math>: питома вартість розміщення пилу.</p>			

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Cleaner Production Assessment in Meat Processing. (2000). UNEP, pp. 3–5.
2. What is Cleaner Production Assessment (CPA)?. (2010). Retrieved from <http://laocpc.org/index.php/project-3/86-english/123-what-is-cleaner> <http://laocpc.org/index.php/project-3/86-english/123-what-is-cleaner-production-assessment-cpa>.
3. <http://ukrcement.com.ua>.
4. <http://stroyres.net/vyazhushhie-materialy/neorganicheskie/cementi/stroitelnij/tehnologiya-proizvodstva-po-etapam.html>.
5. Высоцкий Е.В. Выпуск цемента по способам производства // Доклад «Цементная промышленность России и стран СНГ. Проблемы, новизна, перспективы» в Международной промышленной академии. – 2015. – С. 5–6.
6. Классен В.К. Сравнительный анализ энергоемкости сухого и мокрого способов производства цемента // Цемент и его применение. – 2011. – № 6. – С. 20–23.
7. Беляева В.И., Кулешов М.И. Снижение выбросов пыли и вредных газов при обжиге цементного клинкера // Экология и промышленность России. – 2007 г. – №2. – С. 25–27.
8. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) / Joint Research Centre. Institute for Prospective Technological Studies Sustainable Production and Consumption Unit European IPPC Bureau. – 2013. – 501 p.
9. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух. — Сп-б. — 2015 г.







## Ресурсоефективне та чисте виробництво у цементній промисловості

Публікація розроблена в рамках проекту «Сприяння адаптації та впровадженню ресурсоефективного та більш чистого виробництва шляхом створення і роботи Центру більш чистого виробництва в Україні», який виконується Організацією Об'єднаних Націй з промислового розвитку (ЮНІДО) та національним Центром ресурсоефективного та чистого виробництва (ЦРЕЧВ). Донорами проекту є уряди Швейцарії та Австрії.

[www.recpc.org](http://www.recpc.org)



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra



Швейцарська Конфедерація