

НАПРЯМИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ОБЕРТОВИХ ПЕЧЕЙ

Ленцов І.А.

канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7113-536X>, e-mail: lentsov_i_a@pstu.edu;

Умріхін М.О.

аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3476-6767>, e-mail: umrikhin_m_o@aspirants.pstu.edu

У статті представлено аналітичний огляд результатів наукових досліджень щодо покращення роботи обертових печей у чотирьох напрямках: оптимізація гідравлічної роботи печі та запічних теплообмінників, визначення оптимального температурного режиму та температурного профілю вздовж печі, інтенсифікація теплообміну всередині печі, удосконалення систем керування піччю, зокрема за рахунок використання штучного інтелекту. Особлива увага приділяється впливу на підвищення енергоефективності, зниження викидів та покращення якості продукції при виробництві вапна.

Ключові слова: обертові печі, конверторне вапно, кальцинація вапняку, енергозбереження, чисельне моделювання гідродинаміки, системи керування.

Постановка проблеми

Негашене вапно, як важлива сировина, широко застосовується в металургії, виробництві паперу, пластмас, очищенні води та сушінні харчових продуктів [1].

У 2022 році світове виробництво негашеного вапна досягло 430 мільйонів тон [2], з них – 88% вапна високого ступеня кальцинації та високої активності [3]. Активним інгредієнтом негашеного вапна є оксид кальцію, який в основному отримують шляхом кальцинації вапняку (осадової породи, що складається переважно з карбонату кальцію). У промисловості для виробництва негашеного вапна використовуються різні типи печей, включаючи регенеративні печі з паралельним потоком, кільцеві шахтні печі та обертові печі [3]. Окрім виробництва вапна, обертові печі також використовуються при випалі клінкеру в цементній промисловості.

Обертові печі мають переваги у високій продуктивності та якості негашеного вапна. Однак, незважаючи на тривалу історію використання та постійне вдосконалення конструкцій, їх експлуатація досі супроводжується низкою проблем, що негативно впливають на ефективність виробництва, енергоспоживання та екологічну безпеку [4].

Основними проблемами обертових печей є: високі втрати тепла, зношування футеровки, нестабільність режимів горіння, а також значні викиди шкідливих речовин. Крім того, складність управління процесами в обертових печах обумовлює потребу в застосуванні сучасних засобів автоматизації, математичного моделювання та цифрових технологій.

У контексті глобальних викликів – енергетичної кризи, посилення екологічних норм, зростання вартості ресурсів – питання оптимізації роботи обертових печей набуває особливої актуальності. Існує багато підходів до вирішення цієї проблеми: починаючи від моделювання теплотехнічних та гідродинамічних процесів до впровадження інтелектуальних систем управління. Проте ці підходи часто розглядаються

ізолювано, без урахування комплексного впливу на весь виробничий процес.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Перші обертові печі були введені в експлуатацію Томасом Кремптоном ще у 1880 році [5] для виробництва цементу, а згодом і випалу вапна. На той час було важко визначити, як покращити роботу обертових печей, оскільки залишалося багато недосліджених параметрів, що впливають на енергоефективність та якість продукту, а саме: точна кількість тепла, необхідного для хімічного процесу дисоціації вапняку, кількість необхідного атмосферного повітря, вплив параметрів факелу на випал матеріалу, вплив вологості та фракції матеріалу, а також, багатьох інших аспектів. У 1898 році Гаррі та Сімен удосконалили конструкцію обертових печей, додавши до неї охолоджувач клінкеру (основна складова цементу), що покращило якість клінкеру та збільшило продуктивність печі [6]. Згодом охолоджувачі вдосконалювали, винайшовши супутникові або планетарні охолоджувачі, що складалися з набору трубок (зазвичай від 7 до 10), прикріплених до циліндра печі [6]. Вони мають перевагу у герметичності корпусу печі та відсутності потреби в окремому приводі. У 1930 році в Німеччині в експлуатацію вперше був введений решітковий попередній підігрівач сировини, що нагрівав матеріал, який подається в піч за допомогою гарячих димових газів. Поява печей з підігрівачами завершило формування сучасної конструкції обертової печі, що складається з трьох елементів: підігрівача, самої обертової печі та охолоджувача.

В подальшому всі вказані елементи проходили конструкторські вдосконалення. Підігрівачів почали використовувати декілька, що покращувало тепловіддачу димових газів та підвищувало температуру матеріалу. Охолоджувачі змінили свою конструкцію на більш енергоефективні – шахтні [7].

Енергоефективність самої печі також покращувалась за рахунок використання нових теплоізолюючих матеріалів, покращення конструкцій паливника як для

роботи на декількох видах палива [8], використання багатоканальних пальників з регулюванням довжини факелу [9, 10].

Окрім того в конструкцію печі почали додавати нові конструкторські елементи, що покращують теплообмін всередині печі, як то цепи та лопатки, які покращують переміщення матеріалу [11].

В той же час дослідження фізичних процесів, що відбуваються всередині печі ще є неповними. Тому сучасні науковці більше приділяють увагу саме цьому. Наразі можна виділити чотири основних напрями досліджень: оптимізація гідравлічної роботи печі та запічних теплообмінників, визначення оптимального температурного режиму та температурного профілю вздовж печі, інтенсифікація теплообміну всередині печі, удосконалення систем керування піччю. Детальний огляд цих напрямів описаний у розділі «Виклад основного матеріалу».

Мета статті

Проаналізувати сучасні підходи до оптимізації роботи обортових печей, узагальнити наукові та практичні досягнення у сфері підвищення їх енергоефективності, продуктивності та екологічної безпеки, а також визначити перспективні напрями подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу

1. Огляд досліджень з оптимізації гідравлічної роботи печі та запічних теплообмінників

Переважає більшість робіт в цьому напрямку ґрунтується на результатах обчислювальної гідродинаміки (CFD). Завдяки цьому з'являється можливість аналізувати складні явища, які важко виміряти безпосередньо в промислових умовах.

Дослідження за допомогою CFD можна поділити на наступні напрями.

Аналіз процесів течії газів всередині печі

У джерелах [12-15] наведені результати досліджень динаміки руху потоку газів в обортовій печі. Дослідження проводилося за допомогою методів CFD на спрощених моделях реальної печі, а також з використанням фізичних експериментів на основі лазерних технологій.

В результаті досліджень [12, 13, 15] виявлено, що профіль потоку в печі значною мірою залежить від розподілу вторинного повітря між вхідними отворами і їх розташуванням відносно пальника. Окрім цього, у дослідженнях приділена увага до зони рециркуляції димових газів, що утворюється біля зрізу сопла пальника. Ця зона дуже важлива для підтримки стабільного горіння, бо гарячі димові гази виступають запальником паливно-повітряної суміші, що виходить з пальника. У роботах доведено, що розподіл повітря між двома вхідними каналами суттєво впливає на загальну довжину факелу та зони рециркуляції. При рівному розподілі вторинного повітря за умови вертикального

розташування каналів, в печі спостерігаються коливання з великою амплітудою. Амплітуда зменшується, коли один з вхідних струменів стає домінуючим, а найменші коливання можна побачити у випадку розподілу 70/30. Домінуючий струмінь притягує інший і стабілізує поле потоку [13].

В роботі [14] відзначається, що результати моделювання аеродинаміки печі в значній мірі залежать від вибору моделі турбулентності, яка повинна бути здатною фіксувати як турбулентні, так і керовані тиском вторинні потоки, а також, що найважливіше, процес утворення і відриву вихорів.

У джерелі [16] CFD моделювання обортової печі застосовується для визначення впливу складу палива на гідродинамічні процеси всередині печі. Авторами розглянуті такі види палива, як вугілля, біомаса, мазут, природний газ, коксовий газ та корекс-газ (аналог доменного газу). Корекс-газ був обраний для експерименту з огляду на його характеристики та склад: 42% монооксиду вуглецю (CO), 31% діоксиду вуглецю (CO₂), 19% водню (H₂), 2% азоту (N₂), 1,9% метану (CH₄) та теплотворну здатність близько 2000 ккал/м³. В результаті моделювання, автори отримали розподіли температури, швидкостей потоку та концентрацію кисню всередині обортової печі. Температура димових газів, що спостерігаються поблизу зони реакції горіння, складає 1260-1500°C, що відповідає зоні активної дисоціації вапняку та дозволяє використовувати корекс-газ в якості палива обортової печі для випалу вапна. Найбільша швидкість димових газів спостерігається в зоні виходу пальника, де відбувається процес згорання палива за допомогою повітря з первинного та вторинного впускних отворів. Окрім того, авторами доведено, що змішування палива та повітря може бути покращено шляхом розташування їх вхідних отворів з протилежних бокових сторін пальника. Також в рамках дослідження встановлено, що найбільша концентрація O₂ в димових газах досягає 0,2% біля виходу пальника та зменшується до 0,02% на виході з печі.

Аналіз впливу рециркуляції димових газів на кількість шкідливих викидів

Обортова піч – це високотемпературний агрегат, під час роботи якого виділяється велика кількість шкідливих речовин [17], зокрема NO_x. Тому зараз багато дослідників вивчають способи зниження викидів під час роботи обортової печі.

Наприклад, автори [18] пропонують знижувати викиди NO_x за допомогою рециркуляції димових газів. Завдяки моделюванню, дослідники детально розглянули вплив додавання димових газів у первинне та вторинне повітря вапнякової обортової печі на характеристики горіння, утворення NO_x та ступінь кальцинації вапняку. В результаті досліджень отримано наступні висновки: додавання димового газу до первинного повітря посилює ефект витягування, що призводило до подовження довжини полум'я, зниження першого піку температури факелу та підвищення другого піку. Детальний аналіз розподілу температури вздовж осі печі

показав, що перший пік утворюється внаслідок згорання летких речовин у пило вугільному паливі, а другий – внаслідок згорання коксового газу. При розбавленні первинного повітря димовими газами у 20%, перша пікова температура зменшується на 149,9 градусів, але друга зростає на 45,0 градусів. При додаванні димових газів до вторинного повітря перша та друга пікові температури зменшуються на 35,8 та 81,5 градусів відповідно. Це приводило до зменшення утворення NO_x . Для випадку додавання димових газів у первинне повітря, утворення NO_x знижувалося на 22,5%, тоді як розбавлення вторинного повітря знижувало NO_x на 80,5%. Проте, додавання димових газів у повітря в обох випадках знижувало ступінь кальцинації вапняку. Зокрема, розбавлення вторинного повітря знижувало ступінь кальцинації на 5,9%, та на 1,6% – для первинного повітря за рахунок зниження температури димових газів.

Автори статті [19] пропонують боротись зі зниженням температури димових газів при їх рециркуляції за допомогою збагачення повітря киснем. У своїй роботі вони спираються на дослідження [20], в якому вказується, що концентрація викидів NO_x у випадку повітряного горіння зазвичай вища, ніж у випадках киснево-паливного горіння, оскільки у сценаріях киснево-паливного горіння немає утворення теплового NO . Загальні коефіцієнти зниження викидів NO_x для випадків киснево-паливного палива, порівняно з випадком з повітряним паливом, становили ~18% та ~9% загалом для випадків концентрації O_2 у 27% та 29% відповідно. Збільшення концентрації NO_x у випадку $\text{O}_2 = 29\%$ порівняно з випадком $\text{O}_2 = 27\%$ ймовірно було результатом вищої концентрації O_2 у середовищі горіння і, таким чином, посилювало перетворення азоту палива на NO . Окрім того, результати моделювання у [19] показали, що у випадках киснево-паливного горіння конвективні та радіаційні потоки енергії від факелу до матеріалу можуть бути збільшені у 2-4,5 рази порівняно з горінням на основі повітря. Це свідчить про те, що швидкість виробництва клінкеру може бути збільшена за тих самих витрат палива, або споживання палива може бути зменшено при збереженні того ж виробництва клінкеру.

Довжина полум'я у випадках киснево-паливного спалювання на 30-65% коротша, ніж у спалюванні палива звичайним повітрям, що дозволяє використовувати коротші конструкції печей і може покращити високотемпературні реакції клінкерування в процесі виробництва цементу. Однак автори зауважують, що у цій галузі потрібні додаткові дослідження.

В джерелі [21] досліджується зниження викидів NO_x та якість цементного клінкеру при додаванні зеленого аміаку (NH_3) в факел. Автори розглядають NH_3 як перспективне безвуглецеве паливо, однак його вплив на якість клінкеру та викиди оксидів азоту (NO_x) у цементних печах досі залишається мало дослідженим. Автори створили детальну одномірну модель взаємодії газу та твердої речовини на основі промислової

цементної обертової печі. За допомогою CFD досліджувався процес згорання та вплив кількості NH_3 на розподіл тепла, а також оцінювалася кількість утворених забруднюючих речовин. Автори досліджень прийшли до наступних висновків: спільне спалювання NH_3 призводить до зниження температури газу та клінкеру в зоні горіння. При збільшенні частки NH_3 у паливі від 0% до 50% максимальна температура полум'я знижується з 2085 К до 1780 К, а температура клінкеру падає з 1645 К до 1530 К. Це пов'язано з вищою прихованою теплотою випаровування NH_3 та ендотермічною дисоціацією NH_3 . При збільшенні частки NH_3 до 20% викиди NO_x підвищуються. Це відбувається через те, що більша кількість NH_3 сприяє утворенню термічних- та швидких NO_x . При подальшому збільшенні частки NH_3 (від 20% до 50%) викиди NO_x знижуються, оскільки надлишковий NH_3 діє як відновник для NO . Збільшення частки NH_3 негативно впливає на якість клінкеру, що проявляється у зменшенні вмісту C_3S та збільшенні вільного CaO . Це пов'язано зі зниженням температури в зоні горіння, що перешкоджає повному формуванню C_3S . Термічна ефективність печі знижується зі збільшенням частки NH_3 . Однак додавання NH_3 демонструє значне зменшення утворення CO_2 та нульові викиди CO та NH_3 . Результати досліджень свідчать про те, що для досягнення бажаної якості клінкеру та ефективності спалювання необхідно оптимізувати параметри процесу горіння при додаванні NH_3 у паливо.

Визначення оптимальних параметрів факелу

Розроблені CFD-моделі успішно прогнозують характеристики роботи обертових печей, а також допомагають дослідити вплив типу факелу на процеси теплообміну в печі.

Так, метою роботи [22] є поглиблене дослідження аеродинаміки дифузійного факелу в обертовій цементній печі. Автори проводили аеродинамічне моделювання печі з використанням покращеної моделі турбулентності k-ε на основі ренормалізаційної групи (RNG), яка здатна враховувати утворення вихорів. Взаємодії між турбулентністю та дифузійним полум'ям оброблялися за допомогою функції щільності ймовірності. В результаті моделювання було встановлено, що:

- зона рециркуляції димових газів до вихідного отвору пальника має велике значення для процесу горіння, оскільки зворотний потік димових газів покращує стабільність полум'я;
- режими подачі палива та повітря безпосередньо впливають на довжину факелу вздовж печі, а також опосередковано – на утворення кільцевих зон спікання;
- регулювання потоку вторинного повітря в пічі є важливим для поліпшення горіння та уникнення перешкод просування матеріалу вздовж печі;
- використання дифузійного типу факелу в обертових печах позитивно впливає на процес випалу клінкеру завдяки більшій та однорідній поверхні факелу,

що допомагає збільшити продуктивність оберткової печі;

- правильний вибір конструкції пальника дозволяє створювати досить компактні зони горіння, уникаючи удару факелу об стіни печі. Заглиблення пальника у піч впливає на профіль швидкості та температурний профіль в печі, а також на об'єм вторинного повітря, що надходить з охолоджувача до печі.

Автори роботи [23] за допомогою CFD також досліджують параметри факелу. Але, на відміну від попередньої статті, у цій роботі досліджується закручене (турбулентне) полум'я при моделюванні течії та характеристик факелу. В роботі використовувалися моделі турбулентності k-ε та k-ω для симуляції, а також експериментальні дані для перевірки. Головні висновки з цього дослідження показують, що зі збільшенням закручування полум'я стає коротшим та ширшим. При інтенсивному закручуванні в центрі полум'я утворюється зворотний потік, що призводить до формування внутрішньої зони рециркуляції. Ця зона стабілізує полум'я, захоплюючи гарячі продукти згоряння та забезпечуючи стабільний профіль температури. Низька інтенсивність закручування (коефіцієнт закручування до 0,5) призводить до відносно короткого факелу з меншим кутом розкриття. Зі збільшенням коефіцієнта закручування, розкриття полум'я збільшується.

Кількість завихрювачів первинного повітря має значний вплив на довжину факелу при нижчому співвідношенні діаметра кільця на вході первинного повітря ($d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}} = 2,3$). Факел подовжується зі збільшенням числа завихрювачів первинного повітря – довжина збільшується на 20% та 6% зі збільшенням числа завихрювачів від 6 до 12 для $d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}} = 2,3$ та 5 відповідно. Факел також подовжується зі збільшенням діаметра кільця вхідного первинного повітря – полум'я подовжується приблизно на 19% зі збільшенням $d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}}$ від 2,3 до 5.

Розробка оптимальної конструкції запічних охолоджувачів/нагрівачів

Моделювання газових потоків дозволяє розробляти більш економічні та екологічні конструкції запічних теплообмінників та покращувати існуючі. Наприклад, у роботі [24] представлено дослідження моделювання клінкерного охолоджувача та оцінки його продуктивності. Задля цього автори розробили зменшену модель клінкерного охолоджувача у масштабі 25:1. Симуляція проводилася з використанням інструментів CFD, зокрема програмних комплексів SolidWorks та ANSYS. В результаті моделювань дослідники прийшли до наступних результатів. При витраті клінкеру 0,2 кг/с та висоті шару клінкеру 0,6 м і витраті охолоджуючого повітря 0,54 кг/с була досягнута оптимальна продуктивність охолоджувача з температурою клінкеру на виході 68°C. Зменшення висоти шару клінкеру до 0,3 м призводило до зростання температури клінкеру на виході до 162,4°C. Модельний охолоджувач мав питому витрату повітря 1,9 м³/кг клінкеру, що на 12% вище, ніж у існуючого охолоджувача (1,7 м³/кг

клінкеру). Масштабована модель охолоджувача продемонструвала на 15% вищу рекуперативну здатність та на 10% вищу енергоефективність порівняно з існуючим охолоджувачем.

Моделювання процесів горіння альтернативних видів палива

CFD використовується для оцінки технічних можливостей щодо заміни викопного палива альтернативним, що зазвичай сприяє зменшенню шкідливих викидів та знижує собівартість продукції.

Так у роботі [25] представлені результати CFD моделювання спалення в цементній обертковій печі м'ясо-кісткового борошна (МКБ) у порівнянні з вугіллям. Оскільки МКБ є 100% біомасою, то, на відміну від викопного палива, його спалення не призводить до істотного збільшення CO₂ в атмосфері. Моделювання процесу спалення борошна дозволило визначити, що пік температури факелу досягається ближче до виходу пальника, ніж при спаленні вугілля. Це відбувається через більшу кількість летких речовин у м'ясо-кістковому борошні. Однак в подальшому температура факелу, через високий вміст вологи та золи у борошні, стає нижчою ніж при використанні вугілля. До зниження температури факелу також призводить більша кількість повітря, необхідна для спалення МКБ. Зважаючи на вищезазначені результати, автори прийшли до висновку, що використання м'ясо-кісткового борошна в якості єдиного палива не доцільне та потребує поєднання з більш калорійним паливом.

Проаналізувавши роботи з моделювання гідравлічного режиму роботи оберткової печі за допомогою CFD симуляції можна зробити наступні висновки щодо оптимізації роботи печі:

- стабільне горіння палива досягається за умови оптимального розподілу вторинного повітря у співвідношенні 70/30 між верхнім та нижнім каналом відповідно;
- щоб горіння було стійке, у вихідного отвору пальника має сформуватись зона рециркуляції гарячих димових газів, яка слугує «запальником» паливо-повітряної суміші. За допомогою регулювання потоків вторинного повітря цю зону можна зменшувати або збільшувати;
- в результаті CFD моделювання можна розраховувати не тільки гідродинамічні показники, а й прогнозувати температуру факелу та димових газів;
- рециркуляція димових газів до потоків повітря може значно знизити утворення NO_x, але це призводить до зменшення температури всередині печі та зниження якості вапна на майже 6%;
- для збільшення температури всередині печі можна до повітря додавати чистий кисень. Це призводить до зниження викидів NO_x, збільшує теплообмін від факелу у 2-4,5 рази та скорочує довжину факелу на 30-65%, що гіпотетично дозволяє зменшити довжину оберткової печі та знизити втрати тепла через стінки;
- в оберткових печах для випалу клінкеру або вапняку використання дифузійного типу факелу більш

оптимальне. Такий факел має більш однорідну температуру та тепловіддачу по довжині, що позитивно впливає на контроль процесу випалу;

- на довжину факелу впливає кількість завіхрювачів первинного повітря, а також відношення діаметру кільця каналу первинного повітря до діаметру каналу палива. Полум'я подовжується приблизно на 19% зі збільшенням $d_{\text{повітря}}/d_{\text{палива}}$ від 2,3 до 5.

2. Визначення профілю температур вздовж печі

Іншим напрямом оптимізації роботи обертових печей є дослідження температурного режиму та профілю температур димових газів вздовж печі. Процес кальцинації вапняку відбувається при досить високих температурах всередині печі (близько 1200-1500°C). При цьому сам вапняк починає дисоціювати при досягненні середньомасової температури 850-900°C. Отже, для якісного та енергоефективного процесу випалу потрібне співпадіння високотемпературної зони печі та достатньо нагрітого матеріалу.

У сучасній практиці для вимірювання температури в обертових печах застосовуються два основні підходи: пряме (апаратне, або «жорстке») та непряме (програмне, або «м'яке») вимірювання.

Апаратні методи передбачають використання високоточних сенсорів, таких як термопари та інфрачервоні камери, для безпосереднього вимірювання температури в окремих зонах печі [26]. Ці методи забезпечують високу точність і надійність, оскільки отримані дані є незалежними від зовнішніх чинників, що позитивно впливає на якість результатів. Водночас апаратні засоби мають низку обмежень: вони потребують дорогого обладнання та регулярного технічного обслуговування, а також надають лише локальні дані, що ускладнює оперативне реагування на зміну умов у всій системі [27, 28].

Програмні методи («м'яке» вимірювання) базуються на інтеграції знань про виробничий процес, легко доступних змінних та математичних моделей. Такий підхід дозволяє оцінювати важковимірювані параметри шляхом обчислень, фактично замінюючи апаратні вимірювання програмними алгоритмами. Це забезпечує гнучкість, зменшує витрати та дозволяє отримувати узагальнені дані про стан системи.

У статті [29] пропонується методика «м'якого» вимірювання для вирішення проблеми складності визначення температури зони кальцинації обертової печі для виробництва вапна. Для моделювання та прогнозування головних компонентів використовуються стохастичні конфігураційні мережі (SCN) з хорошими прогностичними характеристиками. У дослідженні використовувалися 16 параметрів, таких як витрати та тиск газу, температура відхідних газів, швидкість обертання печі, температури голови та хвоста печі, тиск, витрата первинного повітря, температура на вході в пілозбірник і температура зони кальцинування. Для оптимізації ключового параметра – фактору регуляції стохастичних конфігураційних мереж – запропоновано покращений алгоритм рою сальп на основі Хаммерслі.

Достовірність моделі «м'якого» вимірювання перевірялась за допомогою фактично зібраних виробничих даних обертової печі для випалу вапна. Множинні оціночні показники та результати порівняння показують, що запропонована модель «м'якого» вимірювання температури зони кальцинації обертових печей має вищу точність прогнозування та якість моделювання порівняно з іншими моделями.

У джерелі [30] також наведені дослідження з розробки моделі «м'якого» вимірювання температури зони кальцинування обертової печі. Однак на відміну від [29], ця модель базується на аналізі головних компонентів (PCA) та мережі зі станом відлуння з протікаючим інтегратором (LI-ESN), оптимізований бінарним алгоритмом рою частинок (BPSO). LI-ESN складається з випадково пов'язаних нейронів, які залишаються незмінними після ініціалізації, і потребує лише невеликої кількості зразків для моделювання, що знижує складність моделі та робить її придатною для «м'якого» вимірювання у виробничих процесах обертових печей. BPSO використовується для оптимізації параметрів динамічного резервуара LI-ESN для досягнення оптимальної продуктивності моделі м'якого вимірювання. BPSO має більшу швидкість збіжності та здатність знаходити кращі рішення за меншу кількість ітерацій порівняно з іншими алгоритмами оптимізації. Результати досліджень показують, що середня абсолютна похибка запропонованої моделі м'якого вимірювання становить 13,54°C. Порівняно з іншими типовими моделями «м'якого» вимірювання, запропонована авторами модель досягла найкращих результатів при порівнянні реальних та прогнозованих значень. До того ж час навчання та час онлайн-прогнозування запропонованої моделі м'якого вимірювання дозволяють впроваджувати її у практичне користування на підприємствах.

Поеднуючи гідродинамічне моделювання та штучний інтелект, дослідники [31] розробили новий метод прогнозування температури в обертовій печі. Завдяки детальному аналізу виробничих даних з заводу та наукової бази, автори визначили ключові фактори, що впливають на динаміку температурного профілю в обертових печах. Використовуючи обчислювальну гідродинаміку (CFD), дослідниками було створено модель спалювання вугільного палива в обертовій печі. Набір даних було згенеровано за допомогою обчислювальних технологій, що охоплюють різноманітні умови, такі як витрати вугілля, температура та об'єм повітря, вміст вуглецю та летких речовин у пиловугільному паливі. Цей набір даних включав 625 окремих випадків. Згодом, використовуючи методи машинного навчання, включаючи алгоритми випадкового лісу (RF) та оптимізованого випадкового лісу (GA-RF), були розроблені прогностичні моделі для динаміки температурного поля обертової печі. Результати порівняльного аналізу продемонстрували, що модель, покращена алгоритмом GA-RF, перевершує продуктивність стандартного підходу RF. Це покращення призвело до значного підвищення точності прогнозування, що

підтверджується зменшенням середньоквадратичної похибки з 25,0879 до 17,5330 та середньої абсолютної похибки з початкового значення 6,5600 до 4,7661. Крім того, новий метод «м'якого» вимірювання, представлений у цій статті, скорочує час моделювання на кілька порядків, зменшивши тривалість розрахунків з двох-трьох тижнів до приблизно 10 секунд.

У статті [32] наведено дослідження методу одноступеневого прогнозування температури зони горіння обертової цементної печі на основі хвильової фільтрації в реальному часі та екстремального машинного навчання з ядром (KELM).

Одноступеневе прогнозування температури зони горіння відіграє важливу роль у контролі безпеки та стабільності роботи цементної обертової печі. Це пов'язано з тим, що аномальні відхилення температури можна виявити раніше, і оператор печі зможе вчасно вжити ефективних заходів для врегулювання. Запропонований метод використовує систему візуального контролю полум'я для визначення температури зони горіння. Далі застосовується фільтрація з обмеженням амплітуди, що відсікає аномальні значення, після чого для навчання та прогнозування використовується KELM, який вирізняється високою швидкістю роботи та здатністю до узагальнення. Для перевірки методу було проведено експерименти на основі місячних даних з цементної печі. Результати показали, що запропонований підхід забезпечує ефективне одноступеневе прогнозування температури зони горіння в реальних умовах.

У дослідженні [33] представлено новий підхід до відстеження зон з високою температурою на поверхні обертової печі. Сучасні системи контролю визначають лише точку з максимальною температурою, тож для усунення цього недоліку автори розробили алгоритм, який працює в багатоінтервальному режимі на основі сканування з рівним кутом. Запропонована методика дозволяє аналізувати геометрію та характеристики поверхні за допомогою теорії сканування з рівним кутом, встановлювати відповідність між реальними розмірами та зображенням, а також усувати спотворення, що виникають у процесі такого сканування. Метод було випробувано на лабораторній моделі обертової печі з використанням інфрачервоного скануючого термометра та системи обробки зображень. Експериментальні дані підтвердили, що алгоритм здатний у режимі реального часу відстежувати не лише максимальну температуру, а й значення, близькі до неї. Розроблений підхід може ефективно застосовуватися для аналізу даних і контролю температурного режиму в обертових печах.

Дослідники у своїй роботі [34] створили та перевірили математичну модель для аналізу температурного профілю в обертовій печі, що використовується у виробництві цементу. Її основою стали диференціальні рівняння масового та енергетичного балансу. Модель враховує реальні вхідні параметри, зокрема швидкість подачі газу й твердих матеріалів, геометрію печі та

хімічний склад сировини. Автори удосконалили класичний підхід [35], ввівши часову зміну температури газу та спростивши опис полум'я до сталої теплотворної здатності. Для розв'язання складних рівнянь застосовували метод кінцевих різниць і метод Рунге–Кутти з контрольованим кроком інтегрування. Отримані результати показали високу узгодженість із даними реального виробництва, за винятком кількох другорядних показників. Аналіз чутливості до зміни швидкості газу та руху твердих речовин виявив, що підвищення швидкості газу на 10% сприяє інтенсивнішому утворенню C_3S , тоді як зниження швидкості подачі матеріалу зменшує пікову температуру в зоні горіння. Розроблена модель може бути застосована для оптимізації керування обертовими печами в промислових умовах.

У висновку до цього напрямку оптимізації роботи обертових печей можна зазначити наступне:

- наведені в огляді моделі «м'якого» визначення температур всередині печі здатні прогнозувати температуру з точністю до $13,5^{\circ}C$ та середньоквадратичною похибкою у $17,53^{\circ}C$;
- тривалість розрахунків за деякими моделями не перевищує 10 секунд, що дозволяє використовувати їх в умовах виробництва;
- існують алгоритми вимірювання температури всередині печі на основі даних про температуру зовнішньої стінки печі;
- деякі моделі здатні прогнозувати аномальні відхилення температур, що робить керування піччю більш контрольованим;
- оптимальне поєднання апаратних і програмних методів є ключовим для створення комплексної системи моніторингу температури, яка поєднує точність, ефективність та адаптивність до змін виробничого процесу.

3. Моделювання теплообмінних процесів

Обертова піч – теплотехнічний агрегат з нестационарними умовами роботи. На її роботу впливають багато факторів, серед яких головними є: хімічний та фракційний склад, вологість матеріалу; параметри палива та повітря для горіння; аеродинамічний режим як в печі, так і в запічних теплообмінниках; стан футерування стін печі та інше. В таких складних умовах розрахунок теплообміну можливий лише за допомогою спеціально розроблених моделей, які враховують радіаційний та конвективний теплообмін між димовими газами та матеріалом; димовими газами та стінками печі; радіаційний, конвективний теплообмін та теплопровідність між стінками печі та матеріалом і, нарешті, теплообмін всередині матеріалу. Тому дослідники намагаються спростити свої моделі та досліджувати лише окремі частини складного теплообміну.

У праці [36] представлено дослідження, присвячене моделюванню теплообміну в обертовій печі з акцентом на передачу тепла всередині шару матеріалу. Автори створили математичну модель, яка описує процес тепловіддачі від газового середовища у вільному просторі до шару в печі. Запропонований підхід

передбачає перетворення двовимірного поперечного перерізу шару на спрощену одновимірну модель обертової печі. Таким чином, була отримана модель, яка значно підвищує можливості симуляції процесів теплообміну в шарі без необхідності точного врахування складних явищ потоку та горіння у вільному просторі. Модель дозволяє передбачати розподіл температур як у самому шарі, так і у футерованій стінці печі для будь-якої осової координати.

Теплообмін в матеріалі також розглядається в роботі [37]. В основі дослідження авторів закладено двофазний підхід та різноманітні моделі теплопередачі, які застосовуються до двовимірного поперечного перерізу обертової печі з урахуванням рухомого гранульованого потоку, яка розглядає випадковий рух гранул, як тепловий молекулярний рух. Розроблені моделі апробовувались шляхом порівняння з наявними експериментальними даними. Результати показують, що найвища температура виявлена на поверхні шару, а градієнт температури в шарі – нижчий, ніж у стінці обертової печі. Основними факторами, що впливають на розподіл температури в матеріалі, є початкова температура газу та швидкість обертання печі.

У джерелі [38] представлена динамічна імітаційна модель обертової печі для виробництва цементного клінкеру. Модель побудована на основі теплотехнічних, хімічних і гідродинамічних моделей для симуляції випалу клінкеру. Вона представлена як 1D-модель, яка враховує теплообмін між газовою фазою і матеріалом у зустрічному напрямку. Швидкість руху матеріалу залежить від швидкості обертання печі, а швидкість подачі газу визначається рівнянням Дарсі-Вейсбаха. Теплова конвекція між газом, твердими частинками та стінкою описується коефіцієнтами, визначеними Цшенгом [39]. Теплове випромінювання описується формулою, де враховуються постійна Стефана-Больцмана, коефіцієнт випромінювання та коефіцієнт форми поверхні теплообміну. Запропонована модель має гнучкість, що дозволяє легко додавати нові уточнення та вхідні параметри для отримання більшої точності розрахунків. Симуляція на основі моделі показала, що умовна піч виходить на стаціонарний режим приблизно за 28 годин, що відповідає реальному часу запуску обертових печей (24-48 годин).

Автори [40] пропонують спрощену модель, яка описує теплообмін між твердими частинками матеріалу та димовими газами в обертових печах із лопастями. Модель розглядає циліндричний канал, в якому газ взаємодіє з суспензією та гранульованим шаром та описує теплообмін між чотирма основними фазами: газом, щільним гранульованим шаром, розрідженим двофазним середовищем та стінками. Також розглядається теплове випромінювання між цими фазами. За відсутності радіаційного теплообміну, модель передбачає експоненціальні зміни температур, що залежать від швидкості потоку матеріалу і газу, а також від площі теплообміну. При врахуванні випромінювання, модель може бути вирішена чисельно. Для цього зміни

температури можна апроксимувати розтягнутими експонентами, параметри яких є незалежними від досліджуваних фаз. Попри свою простоту, модель враховує основні експериментальні дані у випадку розрідженого пило-газового потоку, що характерно для багатьох промислових обертових печей.

У роботі [41] для обертової печі з випалу вапна розроблено комп'ютерну модель теплопередачі на основі методу скінченних різниць, що працює в стаціонарному режимі. Модель імітує процес випалювання твердих часток вапняку в обертової печі конвективним турбулентним потоком димових газів, теплообміном випромінюванням між гарячим газом, вогнетривкою стінкою та поверхнею вапняку, а також теплопровідністю у вогнетривкій стінці печі. Для точності розрахунків піч розділена на осові сегменти однакової довжини. Конвективна теплопередача від газу до стінки та твердого тіла оцінювалась за допомогою автономної моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD). Баланси маси та енергії для вапняку та газу в кожному сегменті використовуються для розрахунку температур матеріалу та газу на виході з відповідного сегмента.

Щоб змодельовати випалювання вапняку, була використана модель «скороченого ядра» з контролем швидкості поверхневої реакції. Вихідні дані включають розподіл температур всередині вогнетривкої стінки, розподіл температур вапняку і газу вздовж осі, профіль відсотка випалювання вздовж осі та довжині печі. Довжина моделі печі для апробації цієї моделі становить 5,74 м, тоді як довжина дослідної печі, що використовувалася в експериментальному дослідженні Уоткінсона та Брімакомба [42], становить 5,5 м. В результаті аналізу роботи моделі вчені дійшли наступних висновків: швидкість потоку твердих частинок вапняку найбільше впливає на профілі температури та процес випалювання. Збільшення потоку твердих частинок уповільнює зростання температури вапняку на вході, але прискорює його на виході. Це також призводить до вищої температури газу, оскільки виділяється більше CO_2 . Збільшення розміру фракції призводить до посилення теплопередачі до шару та випалювання, вища швидкість випалювання спостерігається при меншому розмірі частинок. Збільшення кута нахилу або швидкості обертання печі призводить до меншої ефективності теплопередачі до твердих частинок через скорочення часу перебування, що, своєю чергою, вимагає більшої довжини печі для досягнення тієї ж якості випалювання.

У статті [43] представлено аналітичну одновимірну модель для прогнозування впливу різних змінних печі на регенеративну тепловіддачу від стінок. Основною моделі є шар з «зосередженою ємністю» та нескінченною провідністю в радіальному напрямку. Товщина цього шару визначається з проникнення тепла в наполовину нескінченне тіло. Розглянуті параметри включали діаметр печі, швидкість обертання, ступінь заповнення, властивості матеріалу стінки, а також

теплопередачу від газу до стінки і від стінки до твердого тіла.

На основі обчислень моделі зроблено висновок, що в обортових печах регенеративна теплопередача через стінку значно менша, ніж прямий тепловий потік від газу і сягає від 5 до 20%. Проте за умов «злипання» матеріалу в лабораторних печах вплив стінки може досягати 40%.

Складні моделі теплообміну всередині обортових печей потребують значних комп'ютерних потужностей та багато часу на розрахунки. Тому важливо знайти оптимальну модель, яка буде поєднувати в собі як точність, так і швидкість розрахунків.

4. Вдосконалення систем керування обортовими печами

Оскільки обортові печі – агрегат з динамічними умовами роботи, то для керування ними потрібні системи із швидким відгуком. Від того, як швидко оператор печі прийме рішення, залежить якість обробленого матеріалу, енергоємність виробництва та екологічна безпека. Із ростом застосування інструментів штучного інтелекту (ШІ) в промисловості, їх впровадження почалось і в процесах керування обортовими печами. Наприклад, у роботі [44] представлено метод розпізнавання стану горіння в цементній обортовій печі за допомогою аналізу штучним інтелектом зображень полум'я. Точне розпізнавання стану горіння має важливе значення для підвищення якості клінкеру, безпечної роботи печі та зменшення споживання палива. Авторами статті запропоновано метод розпізнавання стану горіння, що базується на сегментації зображення полум'я за допомогою методу Оцу-Кмінс та машини опорних векторів (МОВ). Спочатку зображення полум'я з основної зони горіння в печі отримується за допомогою передової технології візуального виявлення, а потім використовується метод сегментації зображень Оцу-Кмінс для ефективної сегментації цільової області полум'я. На цій основі було виділено 10 параметрів цільової області, як ознаки для розпізнавання. Потім, використовуючи однохвилинне середнє значення виділених параметрів як вхідні дані та три типові стани горіння як вихідні, була створена модель розпізнавання на основі МОВ. Результати показали, що для 30 тестових наборів зразків розроблена модель розпізнавання може правильно ідентифікувати 28 наборів зразків, що демонструє високу точність у розпізнаванні стану горіння в цементних обортових печах.

На відміну від [44], дослідники з [45] для аналізу якості горіння використовують не фото, а відео полум'я. У роботі наголошується, що традиційні методи, засновані на аналізі окремих 2D зображень, є обмеженими, оскільки не враховують динамічну інформацію про полум'я, таку як мерехтіння і зміна, які є важливими індикаторами стабільності горіння. Відеокліп, на відміну від статичних зображень, надає просторовий вигляд, структурні зміни та інформацію про рух. Розроблена модель витягує ознаки як з просторових, так і з часових вимірів на основі кількох сусідніх кадрів.

Окрім того, автори створили два нові тривимірні (3D) дескриптори: обчислювально простий та швидкий дескриптор динамічної текстури, 3DBLBP, та дескриптор динамічної структури, НОРС-ТОР.

Однак параметри факелу всередині печі залежать від багатьох факторів, таких як склад палива та його кількість, швидкість потоку повітря, тому його яскравість та форма часто змінюються. Тим часом велика кількість пилу, що присутня всередині печі, серйозно впливає на якість запропонованої технології обробки зображень для точного визначення умов спікання за зображеннями полум'я. Більше того, багато запропонованих методів, заснованих на зображеннях факелу, поділяють лише на три типи. А саме: перегрітий, переохолоджений та нормальний [46]. Така груба класифікація, змінних зворотного зв'язку, обмежує можливість точного керування процесом. Тому авторами [47] пропонується гібридна динамічна модель прогнозування (HDPF) для здійснення точного онлайн-прогнозування параметрів роботи печі. Щоб врахувати затримку в часі та часові зміни, використовується метод реконструкції фазового простору (PSR). Порівняльні експерименти показують, що HDPF має найвищу точність прогнозування та найвищу надійність щодо чотирьох видів шуму даних, що робить його придатним для застосування в промислових умовах. Крім того, модель має низьку обчислювальну складність, що відповідає вимогам реального часу для моніторингу та керування роботою обортової печі

Штучний інтелект використовується не тільки для аналізу зображень та відео, на його основі можна створювати навіть моделі керування. Наприклад, модель керування на основі штучної нейронної мережі, запропонована авторами [48], дозволила отримати теоретичний ККД печі в 61,5%. Для цього дослідники розробили модель симуляції процесів в печі за допомогою програмного комплексу Aspen Plus. Потім автори з використанням нейронної мережі знаходили оптимальні параметри роботи печі, такі як: виробництво печі, витрати палива, витрати повітря для охолодження клінкеру, тощо. Апробація моделі на дійсній промисловій печі показала високий коефіцієнт кореляції $R^2=0,991$.

Розробка моделей керування на основі прогнозуючого контролю – досить популярний напрям оптимізації роботи обортової печі. Авторами [49] для контролю та оптимізації процесу випалювання клінкеру у виробництві цементу використовується модель, що враховує теплопередачу між газом та сировиною через конвекцію та випромінювання. Крім того, вона враховує такі параметри, як енергія хімічних реакцій, транспортування сировини, втрати енергії тощо. Модельний прогнозуючий контролер використовується для стабілізації температурного профілю вздовж обортової печі, сталого та оптимального горіння палива та максимізації виробництва. Окрім того, у статті представлено унікальний підхід до моделювання, що розділяє процес на окремі зони: нагріву, кальцинації, перехідну, горіння та охолодження. Кожна зона моделюється за

допомогою енергетичного та масового балансу. Це дозволяє створити загальний метод для моделювання та контролю будь-якого типу виробничої лінії цементного клінкеру. Дослідження враховує використання альтернативних видів палива (як-от відходи домашнього господарства, шини, відходи тваринництва), що вносить значну мінливість у теплотворну здатність та характеристики горіння. Представлена модель була успішно впроваджена на цементному заводі в Швейцарії та працювала з середнім часом безвідмовної роботи понад 95%. Результати на пілотному об'єкті показали, що контролер ефективно утримує ключові змінні процесу (температура зони горіння, температура на виході з печі, рівень кисню) у бажаних діапазонах, одночасно підтримуючи швидкість подачі сировини близькою до максимальної. Це підтверджує, що запропонований підхід, який поєднує модель, засновану на первинних принципах, з модельним прогнозуючим контролем та оцінюванням рухомого горизонту, є ефективним для стабілізації та оптимізації складних промислових процесів, таких як виробництво цементу.

Висновки

Оптимізація роботи оборотних печей є складним завданням, що вимагає комплексного підходу урахуванням глибокого розуміння фундаментальних фізичних процесів (гідродинаміка, теплообмін) з передовими методами моделювання та керування, зокрема за допомогою штучного інтелекту.

Розглянуті напрямки – моделювання гідродинамічних процесів в печі та теплообмінниках, визначення оптимального температурного режиму та розподілу температур, моделювання теплообміну всередині печі та застосування моделей керування на основі штучного інтелекту – не є відокремленими, а глибоко взаємопов'язаними. Наприклад, CFD-моделі надають детальні дані про рух димових газів для розрахунку теплообміну, який, у свою чергу, полягає у визначенні температурного режиму, а ШІ потім оптимізує керування на основі цих параметрів.

Взаємозв'язок між CFD-моделюванням (для розуміння газо-твердофазних потоків та теплообміну), термічними моделями (для оптимізації температурних профілів та структурної цілісності) та ШІ-системами (для адаптивного керування в реальному часі) є ключовим для досягнення максимальної енергоефективності, зниження витрат та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

Перспективи інтеграції різних моделей та подальших досліджень

Подальші дослідження повинні зосередитися на поглибленні інтеграції цих напрямків. Розробка гібридних моделей, що поєднують фізично обґрунтовані принципи з можливостями машинного навчання, може забезпечити високу точність та адаптивність, необхідну для керування складними системами оборотних печей. Це включає вдосконалення моделей зниженого

порядку, отриманих з CFD, для їх безшовної інтеграції в системи керування на основі ШІ.

Особлива увага має бути приділена вдосконаленню моделей радіаційного теплообміну, враховуючи складність середовища печі (багатоатомні гази, пилове навантаження). Також важливим є подальший розвиток ШІ-алгоритмів, які можуть ефективно обробляти неточні та зашумлені дані, характерні для промислових умов, та інтегрувати неявні знання досвідчених операторів для підвищення надійності та безпеки керування.

Загалом, майбутні напрямки досліджень мають бути зосереджені на створенні самоадаптивних, інтелектуальних систем, які зможуть не лише оптимізувати поточну роботу печей, але й прогнозувати та запобігати потенційним проблемам, забезпечуючи сталий розвиток промисловості з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Перелік використаних джерел

- [1] A study case of energy efficiency, energy profile, and technological gap of combustion systems in the Colombian lime industry / V. Alcántara et al. *Applied thermal engineering*. 2018. Vol. 128. Pp. 393-401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.018>.
- [2] Lori E. Apodaca. Lim. (Data in thousand metric tons unless otherwise noted). URL: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lime.pdf> (дата звернення 04.07.2025 р.)
- [3] Piringer H. Lime shaft kilns. *Energy procedia*. 2017. Vol. 120. Pp. 75-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.156>.
- [4] Boateng A. A. Rotary kilns. Elsevier, 2008. 347 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7877-3.x5001-6>.
- [5] Lea F. M., Hewlett P. C. Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2003. 1088 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3>.
- [6] Peray K. E. The rotary cement kiln. New York : Chemical Publishing Co., 1986. 389 p.
- [7] Ленцов І. А., Ленцов Д. І. Анализ практического использования шахтного охладителя известня конструкции ООО СНПП «Известа» в условиях комбината «АЗОВСТАЛЬ». *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2013. Вип. 27. С. 124-128.
- [8] Пальник для подачі твердого, рідкого або газоподібного палива у зону горіння випалювальної печі: пат. 98625 Україна: МПК F23D14/20 F23D11/36 F23D14/58 F23D17/00 F23D5/00; заявл. 22.10.2007, опуб. 11.06.2012, Бюл. № 11. 4 с.
- [9] Пальники для оборотних печей. URL: <https://ensol.llc/gorelki/gorelki-dlya->

- [vrashhayushhihsya-pechej/](#) (дата звернення 12.08.2025).
- [10] Пікашов В. С., Троценко Л. Н., Виноградова Т. В. Удосконалення системи опалення обертової печі для випалу вогнетривкої глини. *Теплотехніка та енергетика в металургії*: Праці XVI Міжнародної конференції, м. Дніпропетровськ, 4-6 жовтня 2011. С. 168-169.
- [11] Креховецький О. М., Сибірний А. В., Петрова М. А. Шляхи покращення роботи обертових печей для випалу цементного клінкеру з метою економії витрати енергоносіїв. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2010. Вип. 20.1. С. 112-116.
- [12] Kiln aerodynamics visualization of merging flow by usage of PIV and CFD with application to grate-kiln induration machines / I. S. Larsson et al. *7th international conference on CFD in the minerals and process industries CSIRO*. Melbourne, Australia, 9-11 December 2009.
- [13] Visualization of Merging Flow by Usage of PIV and CFD with Application to Grate-Kiln Induration Machines / I. A. S. Larsson et al. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2013. Vol. 5(4). Pp. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.36884/jafm.5.04.19464>.
- [14] Larsson I. A. S., Lundström T. S., Marjavaara B. D. Calculation of kiln aerodynamics with two RANS turbulence models and by DDES. *Flow, turbulence and combustion*. 2015. Vol. 94, no. 4. Pp. 859-878. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10494-015-9602-8>.
- [15] Secondary flow in semi-circular ducts / Larsson I. A. S., Lindmark E. M., Lundström T. S., Nathan G. J. *Journal of fluids engineering*. 2011. Vol. 133, no. 10. Article 101206. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4004991>.
- [16] Kumar D., Dewangan A. Computational fluid dynamics modelling of the rotary lime kiln. *Proceedings of the 26th national and 4th international ISHMT-ASTFE heat and mass transfer conference*, Tamil Nadu, 17-20 December 2021. Pp. 1-6.
- [17] Bisulandu B.-J. R., Huchet F. Rotary kiln process: an overview of physical mechanisms, models and applications. *Applied thermal engineering*. 2023. Vol. 221. Article 119637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119637>.
- [18] Zhang Y., Wang S. Numerical simulation of flue gas recirculation in a lime rotary kiln. *Energy*. 2024. Vol. 297. Article 131098. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131098>.
- [19] Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln / D. A. Granados et al. *Energy*. 2014. Vol. 64. Pp. 615-625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.045>.
- [20] Al-Abbas A. H., Naser J. Effect of chemical reaction mechanisms and nox modeling on air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100-kw furnace. *Energy & fuels*. 2012. Vol. 26, no. 6. Pp. 3329-3348. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef300403a>.
- [21] Green ammonia co-firing in cement rotary kiln: numerical investigation on clinker quality and NOx emission by gas-solid interaction / H. Lin et al. *Applied thermal engineering*. 2025. Vol. 277. Article 127116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127116>.
- [22] Nial M., Loukarfi L., Naji H. Aerodynamic control of a diffusion flame to optimize materials' transition in a rotary cement kiln. *Mechanics & industry*. 2020. Vol. 21, no. 4. Article 414. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2020043>.
- [23] Swirled jet flame simulation and flow visualization inside rotary kiln-CFD with PDF approach / H. F. Elattar et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, no. 2. Article 159. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8020159>.
- [24] Modelling of clinker cooler and evaluation of its performance in clinker cooling process for cement plants / J. S. Oyepata et al. *Nigerian journal of technology*. 2021. Vol. 39, no. 4. Pp. 1093-1099. DOI: <https://doi.org/10.4314/njt.v39i4.16>.
- [25] CFD modelling of meat and bone meal combustion in a cement rotary kiln – Investigation of fuel particle size and fuel feeding position impacts / Ariyaratne W. K. H., Malagalage A., Melaen M. C., Tokheim L.-A. *Chemical engineering science*. 2015. Vol. 123. Pp. 596-608. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.10.048>.
- [26] Badzioch S., Hawksley P. G. W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles. *Industrial & engineering chemistry process design and development*. 1970. Vol. 9, no. 4. Pp. 521-530. DOI: <https://doi.org/10.1021/i260036a005>.
- [27] Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement / M. Milani et al. *Journal of environmental management*. 2017. Vol. 203. Pp. 1026-1037. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.076>.
- [28] Martins M. A., Oliveira L. S., Franca A. S. Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns. *Fuel*. 2001. Vol. 80, no. 11. Pp. 1611-1622. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0016-2361\(01\)00032-1](https://doi.org/10.1016/s0016-2361(01)00032-1).
- [29] Soft sensing of calcination zone temperature of lime rotary kiln based on principal component analysis and stochastic configuration networks / Lian L., Zong X., He K., Yang Z. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. 2023. Vol. 240. Article 104923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.104923>.
- [30] Tian Z., Yu X., Tang F. Soft-sensing model of calcination zone temperature of rotary kiln based on principal component analysis and leaky integrator echo state network. *Chemical engineering science*. 2025. Vol. 309. Article 121472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121472>.
- [31] Novel method for temperature prediction in rotary kiln process through machine learning and CFD / Y. Wang et al. *Powder technology*. 2024. Vol. 439. Article

119649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119649>.
- [32] Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM / S. Lu et al. *Engineering applications of artificial intelligence*. 2018. Vol. 70. Pp. 142-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.01.010>.
- [33] Research on a new method of multi-zone high temperature point tracking of rotary kiln surface temperature based on equal angle scanning / S. Dai et al. *Infrared physics & technology*. 2019. Vol. 103. Article 103078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103078>.
- [34] Dynamic analysis of the temperature and the concentration profiles of an industrial rotary kiln used in clinker production / Rodrigues D. C. Q., Soares Junior A. P., Costa Junior E. F., Costa A. O. S. *Anais da academia brasileira de ciências*. 2017. Vol. 89, no. 4. Pp. 3123-3136. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160661>.
- [35] Spang H. A. A dynamic model of a cement kiln. *Automatica*. 1972. Vol. 8, no. 3. Pp. 309-323. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(72\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0005-1098(72)90050-7).
- [36] Boateng A. A., Barr P. V. A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed. *International journal of heat and mass transfer*. 1996. Vol. 39, no. 10. Pp. 2131-2147. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)00272-3](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)00272-3).
- [37] Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln / H. Liu et al. *Powder technology*. 2016. Vol. 287. Pp. 239-247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.007>.
- [38] A dynamical simulation model of a cement clinker rotary kiln / J. L. Svensen et al. *2024 European control conference (ECC)*, Stockholm, Sweden, 25-28 June 2024. Pp. 2162-2168. DOI: <https://doi.org/10.23919/ecc64448.2024.10590953>.
- [39] Tscheng S. H., Watkinson A. P. Convective heat transfer in a rotary kiln. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 1979. Vol. 57. Iss. 4. Pp. 433-443. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450570405>.
- [40] Heat convection and radiation in flighted rotary kilns: A minimal model / L. Le Guen et al. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 95, no. 1. Pp. 100-110. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.22659>.
- [41] Agrawal A., Ghoshdastidar P. S. Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2018. Vol. 10, no. 3. Article 031008. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4039299>.
- [42] Watkinson A. P., Brimacombe J. K. Limestone calcination in a rotary kiln. *Metallurgical Transactions B*. 1982. Vol. 13, no. 3. Pp. 369-378. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02667752>.
- [43] Agustini S. S., Queck A., Specht E. Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns. *Heat Transfer Engineering*. 2008. Vol. 29, no. 1. Pp. 57-66. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630701677171>.
- [44] Recognition method of cement rotary kiln burning state based on Otsu-Kmeans flame image segmentation and SVM / Zhang R., Lu S., Yu H., Wang X. *Optik*. 2021. Vol. 243. Article 167418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167418>.
- [45] Chen H., Yan T., Zhang X. Burning condition recognition of rotary kiln based on spatiotemporal features of flame video. *Energy*. 2020. Vol. 211. Article 118656. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118656>.
- [46] Recognition of the temperature condition of a rotary kiln using dynamic features of a series of blurry flame images / H. Chen et al. *IEEE transactions on industrial informatics*. 2015. Vol. 12, iss. 1. Pp. 148-157. DOI: <https://doi.org/10.1109/tii.2015.2500891>.
- [47] An accurate online prediction model for kiln head temperature chaotic time series / M. Lv et al. *IEEE access*. 2020. Vol. 8. Pp. 44288-44299. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2973642>.
- [48] Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks / A. I. Okoji et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Vol. 61, no. 7. Pp. 5097-5109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.10.010>.
- [49] Stadler K. S., Poland J., Gallestey E. Model predictive control of a rotary cement kiln. *Control Engineering Practice*. 2011. Vol. 19, no. 1. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.08.004>.

AREAS OF OPTIMIZATION OF ROTARY KILN OPERATION

Lentsov I.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7113-536X>, e-mail: lentsov_i_a@pstu.edu;

Umrikhin M.O.

postgraduate student, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3476-6767>, e-mail: umrikhin_m_o@aspirants.pstu.edu

Rotary kilns are essential thermal processing units widely used in various industrial sectors, including cement production, metallurgy, chemical engineering, and mineral processing. Their operational efficiency directly influences product quality, energy consumption, and environmental impact. Despite decades of technological advancement, rotary kilns remain

complex systems characterized by high energy losses, uneven temperature distribution, wear of refractory linings, and significant emissions of pollutants. These challenges necessitate continuous improvement and optimization of kiln design, operation, and control strategies. This review article aims to provide a comprehensive analysis of current approaches to optimizing rotary kiln performance. It synthesizes findings from recent scientific literature and industrial practices, focusing on key aspects such as thermal regime stabilization, fuel efficiency, structural improvements, and the integration of digital technologies. Particular attention is given to the role of the application of computational fluid dynamics (CFD) and mathematical modelling for predicting and controlling heat transfer and material flow. The article also explores the implementation of automated control systems, including the use of artificial intelligence (AI), machine learning (ML), and Internet of Things (IoT) technologies, which enable real-time monitoring and adaptive regulation of kiln parameters. These innovations contribute to reducing energy consumption, minimizing emissions, and extending equipment lifespan. Additionally, the review highlights ecological considerations, such as the reduction of NO_x and CO₂ emissions, and the transition to alternative fuels and raw materials. By identifying and categorizing the most effective optimization strategies, this study provides a valuable resource for researchers, engineers, and decision-makers seeking to enhance the performance and sustainability of rotary kiln operations. The article concludes with a discussion of current limitations and outlines promising directions for future research, including hybrid modelling approaches and predictive maintenance systems.

Keywords: rotary kilns, converter lime, limestone calcination, energy efficiency, computational fluid dynamics (CFD) predictive control.

References

- [1] V. Alcántara et al., "A study case of energy efficiency, energy profile, and technological gap of combustion systems in the Colombian lime industry," *Applied thermal engineering*, vol. 128, p. 393-401, 2018. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2017.09.018**.
- [2] Lori E. Apodaca. Lime (Data in thousand metric tons unless otherwise noted). [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lime.pdf>. Accessed on: July 04, 2025.
- [3] H. Piringer, "Lime shaft kilns," *Energy procedia*, vol. 120, pp. 75-95. 2017. doi: **10.1016/j.egypro.2017.07.156**.
- [4] A.A. Boateng, *Rotary kilns*. Elsevier, 2008. doi: **10.1016/b978-0-7506-7877-3.x5001-6**.
- [5] F.M. Lea, and P.C. Hewlett, *Lea's chemistry of cement and concrete*, 4th ed. Butterworth-Heinemann, 2003. doi: **10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5007-3**.
- [6] K.E. Peray, *The rotary cement kiln*. Chemical Publishing Co., New York, 1986.
- [7] I.A. Lentsov, and D.I. Lentsov, Analiz prakticheskoho yspolzovaniya shakhtnoho okhladyteliya yzvesty konstruksyyi OOO SNPP «Yzvesta» v uslovyakh kombynata «AZOVSTAL» ["Analysis of the practical use of the lime cooler designed by OOO SNPP "Izvesta" in conditions of metallurgical plant "AZOVSTAL"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovsky State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 27, pp. 124-128, 2013. (Rus.)
- [8] I. Olsen, L. Skaarup Jensen, E. Jepsen, and E. Rodtnes Jørgensen, "Palnyk dlia podachi tverdoho, ridkoho abo hazopodibnoho palyva u zonu horinnia vypali-valnoi pechi" ["Burner for supplying solid, liquid, or gaseous fuel to the combustion zone of a kiln"]. *UA Patent 98625*; June 11, 2012. (Ukr.)
- [9] Palnyky dlia obertovykh pechei (Rotary kiln's burners). [Online]. Available: <https://en-sol.llc/gorelki/gorelki-dlya-vrashhayushihhsya-pechei/>. Accessed on: August 12, 2025.
- [10] V.S. Pikashov, L.N. Trocenko, and T.V. Vinogradova, "Udoskonalennia systemy opalennia obertovoi pe-chi dlia vypalu vohnetryvkoi hlyny" ["Improvement of the heating system of a rotary kiln for firing refractory clay"], in *Proc. of the XVI Int. Conf. «Heat Engineering and Energy in Metallurgy»*, Dnipropetrovsk, Ukraine, Oct. 4-6, 2011, pp. 168-169. (Ukr.)
- [11] O.M. Krekhovetskij, A.V. Sybirnyj, and M.A. Petrova, "Shliakhy pokrashchennia roboty obertovykh pechei dlia vypalu tsementnoho klinkeru z metoiu ekonomii vytraty enerhonosiiv" ["Revolving furnaces for the burning out cement clinker: ways of their work improvement with the aim of power carriers expense saving"], *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of UNFU*, vol. 20.1, pp. 112-116, 2010. (Ukr.)
- [12] I. S. Larsson et al., "Kiln aerodynamics visualization of merging flow by usage of PIV and CFD with application to grate-kiln induration machines," in *7th Int. Conf. on CFD in the minerals and process industries CSIRO*, Melbourne, Australia, Dec. 9-11, 2009.
- [13] I.A.S. Larsson, E.M. Lindmark, T.S. Lundström, D. Marjavaara, and S. Töyrä, "Visualization of Merging Flow by Usage of PIV and CFD with Application to Grate-Kiln Induration Machines," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 5(4), pp. 81-89, 2013. doi: **10.36884/jafm.5.04.19464**.
- [14] I.A.S. Larsson, T.S. Lundström, and B.D. Marjavaara, "Calculation of kiln aerodynamics with two RANS turbulence models and by DDES," *Flow, turbulence and combustion*, vol. 94, no. 4, pp. 859-878, 2015. doi: **10.1007/s10494-015-9602-8**.
- [15] I.A.S. Larsson, E.M. Lindmark, T.S. Lundström, and G.J. Nathan, "Secondary flow in semi-circular ducts," *Journal of fluids engineering*, vol. 133, no. 10, article 101206, 2011. doi: **10.1115/1.4004991**.

- [16] D. Kumar, and A. Dewangan, "Computational fluid dynamics modelling of the rotary lime kiln," in *Proc. of the 26th National and 4th Int. ISHMT-ASTFE heat and mass transfer Conf.*, Tamil Nadu, December 17-20, 2021, pp. 1-6.
- [17] B.-J. R. Bisulandu, and F. Huchet, "Rotary kiln process: an overview of physical mechanisms, models and applications," *Applied thermal engineering*, vol. 221, article 119637, 2023. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2022.119637](#).
- [18] Y. Zhang, and S. Wang, "Numerical simulation of flue gas recirculation in a lime rotary kiln," *Energy*, vol. 297, article 131098, 2024. doi: [10.1016/j.energy.2024.131098](#).
- [19] D.A. Granados, F. Chejne, J.M. Mejía, C.A. Gómez, A. Berrío, and W.J. Jurado, "Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln," *Energy*, vol. 64, pp. 615-625, 2014. doi: [10.1016/j.energy.2013.09.045](#).
- [20] A.H. Al-Abbas, and J. Naser, "Effect of chemical reaction mechanisms and nox modeling on air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in a 100-kw furnace," *Energy & fuels*, vol. 26, no. 6, pp. 3329-3348, 2012. doi: [10.1021/ef300403a](#).
- [21] H. Lin et al., "Green ammonia co-firing in cement rotary kiln: numerical investigation on clinker quality and NOx emission by gas-solid interaction," *Applied thermal engineering*, vol. 277, article 127116, 2025. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2025.127116](#).
- [22] M. Nial, L. Loukarfi, and H. Naji, "Aerodynamic control of a diffusion flame to optimize materials' transition in a rotary cement kiln," *Mechanics & industry*, vol. 21, no. 4, article 414, 2020. doi: [10.1051/meca/2020043](#).
- [23] H.F. Elattar, E. Specht, A. Fouda, S. Rubaiee, A. Al-Zahrani, and S.A. Nada, "Swirled jet flame simulation and flow visualization inside rotary kiln-CFD with PDF approach," *Processes*, vol. 8, no. 2, article 159, 2020. doi: [10.3390/pr8020159](#).
- [24] J.S. Oyepata, M.A. Akintunde, O.A. Dahunsi, S.S. Yaru, and E.T. Idowu, "Modelling of clinker cooler and evaluation of its performance in clinker cooling process for cement plants," *Nigerian journal of technology*, vol. 39, no. 4, pp. 1093-1099, 2021. doi: [10.4314/njt.v39i4.16](#).
- [25] W.K.H. Ariyaratne, A. Malagalage, M.C. Melaaen, and L.-A. Tokheim, "CFD modelling of meat and bone meal combustion in a cement rotary kiln – Investigation of fuel particle size and fuel feeding position impacts," *Chemical engineering science*, vol. 123, pp. 596-608, 2015. doi: [10.1016/j.ces.2014.10.048](#).
- [26] S. Badzioch, and P.G.W. Hawksley, "Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles," *Industrial & engineering chemistry process design and development*, vol. 9, no. 4, pp. 521-530, 1970. doi: [10.1021/i260036a005](#).
- [27] M. Milani, L. Montorsi, M. Stefani, R. Saponelli, and M. Lizzano, "Numerical analysis of an entire ceramic kiln under actual operating conditions for the energy efficiency improvement," *Journal of environmental management*, vol. 203, pp. 1026-1037, 2017. doi: [10.1016/j.jenvman.2017.03.076](#).
- [28] M.A. Martins, L.S. Oliveira, and A.S. Franca, "Modeling and simulation of petroleum coke calcination in rotary kilns," *Fuel*, vol. 80, no. 11, pp. 1611-1622, 2001. doi: [10.1016/s0016-2361\(01\)00032-1](#).
- [29] L. Lian, X. Zong, K. He, and Z. Yang, "Soft sensing of calcination zone temperature of lime rotary kiln based on principal component analysis and stochastic configuration networks," *Chemometrics and intelligent laboratory systems*, vol. 240, article 104923, 2023. doi: [10.1016/j.chemolab.2023.104923](#).
- [30] Z. Tian, X. Yu, and F. Tang, "Soft-sensing model of calcination zone temperature of rotary kiln based on principal component analysis and leaky integrator echo state network," *Chemical engineering science*, vol. 309, article 121472, 2025. doi: [10.1016/j.ces.2025.121472](#).
- [31] Y. Wang, Y. Xu, X. Song, Q. Sun, J. Zhang, and Z. Liu, "Novel method for temperature prediction in rotary kiln process through machine learning and CFD," *Powder technology*, vol. 439, article 119649, 2024. doi: [10.1016/j.powtec.2024.119649](#).
- [32] S. Lu, H. Yu, H. Dong, X. Wang, and Y. Sun, "Single-step prediction method of burning zone temperature based on real-time wavelet filtering and KELM," *Engineering applications of artificial intelligence*, vol. 70, pp. 142-148, 2018. doi: [10.1016/j.engappai.2018.01.010](#).
- [33] S. Dai, H. Nie, W. Yi, Y. Yang, J. Li, and D. Li, "Research on a new method of multi-zone high temperature point tracking of rotary kiln surface temperature based on equal angle scanning," *Infrared physics & technology*, vol. 103, article 103078, 2019. doi: [10.1016/j.infrared.2019.103078](#).
- [34] D.C.Q. Rodrigues, A.P. Soares Junior, E.F. Costa Junior, and A.O.S. Costa, "Dynamic analysis of the temperature and the concentration profiles of an industrial rotary kiln used in clinker production," *Anais da academia brasileira de ciências*, vol. 89, no. 4, pp. 3123-3136, 2017. doi: [10.1590/0001-3765201720160661](#).
- [35] H.A. Spang, "A dynamic model of a cement kiln," *Automatica*, vol. 8, no. 3, pp. 309-323, 1972. doi: [10.1016/0005-1098\(72\)90050-7](#).
- [36] A.A. Boateng, and P.V. Barr, "A thermal model for the rotary kiln including heat transfer within the bed," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 39, no. 10, pp. 2131-2147, 1996. doi: [10.1016/0017-9310\(95\)00272-3](#).
- [37] H. Liu, H. Yin, M. Zhang, M. Xie, and X. Xi, "Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln," *Powder technology*, vol. 287, pp. 239-247, 2016. doi: [10.1016/j.powtec.2015.10.007](#).
- [38] J.L. Svensen, W.R.L. Da Silva, J. Pigazo Merino, D. Sampath, and J.B. Jørgensen, "A dynamical simulation model of a cement clinker rotary kiln," in 2024

- European control conference (ECC)*, Stockholm, Sweden, June 25-28, 2024, pp. 2162-2168. doi: **10.23919/ecc64448.2024.10590953**.
- [39] S.H. Tscheng, and A.P. Watkinson, "Convective heat transfer in a rotary kiln," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 57, iss. 4, pp. 433-443, 1979. doi: **10.1002/cjce.5450570405**.
- [40] L. Le Guen, M. Piton, Q. Hénaut, F. Huchet, and P. Richard, "Heat convection and radiation in flighted rotary kilns: A minimal model," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 95, no. 1, pp. 100-110, 2016. doi: **10.1002/cjce.22659**.
- [41] A. Agrawal, and P.S. Ghoshdastidar, "Computer Simulation of Heat Transfer in a Rotary Lime Kiln," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 10, no. 3, article 031008, 2018. doi: **10.1115/1.4039299**.
- [42] A.P. Watkinson, and J.K. Brimacombe, "Limestone calcination in a rotary kiln," *Metallurgical Transactions B*, vol. 13, no. 3, pp. 369-378, 1982. doi: **10.1007/bf02667752**.
- [43] S.S. Agustini, A. Queck, and E. Specht, "Modeling of the Regenerative Heat Flow of the Wall in Direct Fired Rotary Kilns," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 57-66, 2008. doi: **10.1080/01457630701677171**.
- [44] R. Zhang, S. Lu, H. Yu, and X. Wang, "Recognition method of cement rotary kiln burning state based on Otsu-Kmeans flame image segmentation and SVM," *Optik*, vol. 243, article 167418, 2021. doi: **10.1016/j.ijleo.2021.167418**.
- [45] H. Chen, T. Yan, and X. Zhang, "Burning condition recognition of rotary kiln based on spatiotemporal features of flame video," *Energy*, vol. 211, article 118656, 2020. doi: **10.1016/j.energy.2020.118656**.
- [46] H. Chen, X. Zhang, P. Hong, H. Hu, and X. Yin, "Recognition of the temperature condition of a rotary kiln using dynamic features of a series of blurry flame images," *IEEE transactions on industrial informatics*, vol. 12, iss. 1, pp. 148-157, 2015. doi: **10.1109/tii.2015.2500891**.
- [47] M. Lv, X. Zhang, H. Chen, C. Ling, and J. Li, "An accurate online prediction model for kiln head temperature chaotic time series," *IEEE access*, vol. 8, pp. 44288-44299, 2020. doi: **10.1109/access.2020.2973642**.
- [48] A.I. Okoji, A.N. Anozie, J.A. Omoleye, A.E. Taiwo, and F.N. Osuolale, "Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 7, pp. 5097-5109, 2022. doi: **10.1016/j.aej.2021.10.010**.
- [49] K.S. Stadler, J. Poland, and E. Gallestey, "Model predictive control of a rotary cement kiln," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 1, pp. 1-9, 2011. doi: **10.1016/j.conengprac.2010.08.004**.
- Стаття надійшла 25.07.2025
Стаття прийнята 13.08.2025
Стаття опублікована 30.10.2025

Цитуйте цю статтю як: Ленцов І. А., Умріхін М. О. Напрями оптимізації роботи обертових печей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 51. С. 160-173. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344892>.