

144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 66.041.57:669.012.7

DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359926

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНФІЛЬТРОВАНОГО ПОВІТРЯ НА ПАРАМЕТРИ 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 комплексний аналіз впливу неконтрольованої інфільтрації атмосферного повітря на роботу обертових печей, що використовуються у промисловості для виробництва вапна та цементного клінкера. На основі газодинамічних розрахунків та використання програмного комплексу Ansys Fluent проведено моделювання режиму роботи печі в умовах повної герметичності та при наявності дефектів ущільнення. Доведено, що інфільтрація повітря є критичним фактором, який призводить не лише до прямих теплових втрат, а й до дестабілізації гідралічного і температурного режиму, та зростанню навантаження на димосос. Запропоновано методику оцінки перевитрат палива в наслідок інфільтрації повітря та шляхи підвищення енергоефективності.

Ключові слова: обертові печі; цементний клінкер; вапно; інфільтрація повітря; тепловий баланс; гідралічний режим.

Постановка проблеми

Обертові печі використовуються у виробництві конвекторного вапна, цементу, магнезиту. У структурі собівартості продукції печей, витрати на енергоносії (паливо та електроенергію) складають від 40% до 60% [1], [2]. В умовах підготовки до вступу України в ЄС та імплементації директив Net-Zero Industry Act [3] та ESPR [4], а також зростання цін на енергоресурси, підвищення енергетичної ефективності обертових печей стає критичним завданням для української промисловості.

Відомо, що теоретична кількість тепла, необхідна для утворення вапна, складає від 2910 до 3490 кДж на кг чистого СаО [5]. Однак фактичне питоме споживання тепла на діючих підприємствах часто сягає 6500-7900 кДж/кг. **Помилка! Джерело посилання не знайдено..**

Головними причинами низької енергоефективності обертових печей є їх конструктивні особливості, а саме – велика довжина і площа бокової поверхні стін печі [6]. Окрім цього, одним із суттєвих та часто недооцінених факторів, що знижують ефективність роботи печі, є інфільтрація (підсоси) холодного атмосферного повітря через нещільності корпусу та технологічних вузлів – місць з'єднання рухомого барабану та нерухомих частин (головок) печі.

Інфільтраційне повітря дестабілізує роботу пальникових пристроїв, змінює форму та температуру факела, що негативно впливає на якість випалу матеріалу. Збільшення об'ємів газу в наслідок цього порушує гідралічний режим та роботу димососів, що призводить до їх перевантаження. Незважаючи на поширеність проблеми, комплексний аналіз її впливу на параметри роботи печі, а саме на енергетичний баланс,

гідралічний режим в печі та процес згорання, досі не був зроблений та потребує систематизації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Існуюча конструкція обертових печей була запропонована в роботах Альфреда Ренсома (1885 р.) і технічних рішеннях Polysius і KHD [8]. В процесі експлуатації печей були помічені нестабільність процесу горіння і збільшене споживання палива у порівнянні з теоретичними розрахунками. Проте пояснень цих явищ на той час не було.

Вираз «інфільтроване повітря» почав з'являтися в технічній літературі в 1950-х роках, особливо в посібниках з експлуатації котлів і печей в Європі та США [8]. У 1970-х і 80-х роках проблеми енергоефективності призвели до широких технічних досліджень таких організацій, як VDZ [9], і постачальників обладнання, таких як FLSmidth, Polysius і KHD, які офіційно закріпили цей термін в енергоаудиторських звітах та посібниках з оптимізації печей.

З того часу питання контролю та мінімізації інфільтрованого повітря стали важливими складовими робіт з енергозбереження, скорочення викидів та запобігання вибухам на цементних і вапняних заводах.

Аналіз наявних досліджень [10-19] показує, що проблема інфільтрованого повітря в обертових печах розглядається переважно з позицій енергетичної ефективності та вдосконалення окремих вузлів, але рідко – як комплексна задача теплового балансу й гідралічного режиму всієї печі та газового тракту.

Так, у роботі [10] детально розглянуто місця виникнення підсосів повітря та приблизно оцінено кількість перевитрат палива та електричної енергії. В матеріалах наведено приклад обертової печі виробництвом 3000 т/добу, в якій кількість інфільтрованого повітря

може сягати 18–22% від загального об'єму газів. Це прямо трансформується у збільшення питомих теплових витрат (на 3–4%), підвищення навантаження на димосос та зростання споживання електроенергії на 7–12%.

В роботі [11] зазначається, що зниження на 5 базових пунктів надлишкового повітря може зменшити споживання палива на 2,5%. В джерелі **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** вказується, що інфільтроване повітря є однією з ключових причин надлишкових втрат із димовими газами, особливо для довгих сухих та мокрих печей, де частка втрат досягає 15–30% загальних витрат тепла. Проте в цих роботах підсози розглядаються здебільшого як «надлишкове повітря» в інтегральному тепловому балансі, без аналізу їх впливу на процеси горіння, розподіл температур вздовж печі та формування постійних зон випалювання і кальцинації.

Критичним обмеженням більшості наявних досліджень є орієнтація на статичні балансові розрахунки (за O_2/CO_2 , витратою газів). Водночас не враховується нестационарний характер підсосів (зміна за часом через знос ущільнень, «пробої» футерування при обвалах на вході печі тощо), а також їхній вплив на динамічну стабільність факелу, довжину зони спікання та коливання температури готового продукту на виході. Це створює методологічний розрив між енергетичними розрахунками та реальною роботою печі у нестационарних умовах.

Деякі автори зосереджуються на CFD-моделюванні (обчислювальній гідродинаміці) процесів горіння та руху газів. Зокрема, у роботі [12] досліджується вплив інфільтрації повітря безпосередньо на характеристики факела та процес горіння в обертовій печі. Інший аспект аеродинаміки розглянуто в дослідженні [14], де аналізується аеродинамічний контроль дифузійного полум'я для оптимізації руху матеріалів в цементній обертовій печі. Хоча ці дослідження глибоко розкривають аеродинамічні ефекти в зоні горіння, вони здебільшого ігнорують вплив підсосів холодного повітря через завантажувальні/розвантажувальні вузли на загальний тепловий баланс.

Ряд робіт промислово-прикладного характеру [15], [16] пропонують методики визначення величини підсосів за різницею концентрацій O_2 між двома точками газового тракту. Також мають місце комбіновані підходи, що враховують одночасно вимірювання витрати газу, включаючи застосування ультразвукових детекторів витоків та цирконієвих датчиків кисню. Такі рішення дозволяють ідентифікувати найбільш проблемні точки інфільтрації (ущільнення печі, розвантажувальні й оглядові люки, розширювальні компенсатори, корпуси вентиляторів тощо) і кількісно оцінити їхній внесок у сумарний об'єм інфільтрованого повітря.

Водночас, ці підходи, хоч і важливі для практичного аудиту, часто працюють у припущенні стаціонарного режиму роботи, а в розрахунках приймається

середнє значення вмісту O_2 в атмосферному повітрі. Крім того ігноруються рециркуляційні потоки в печі та неоднорідність складу газу у перерізі. У результаті точність визначення інфільтрації у складних вузлах залишається обмеженою, що ускладнює врахування цих даних у тепловому балансі та гідравлічному режимі печі.

Пропозиції з мінімізації підсосів повітря в наукових та технічних джерелах, в основному, орієнтовані на покращення конструкції ущільнень (графітові, листові, пневматичні, пружинні ущільнення) [17],[18] та демонструють значний економічний ефект від зменшення підсосів на вході/виході печі. Типові розрахунки показують річну економію палива й електроенергії на рівні сотень тисяч доларів США при окупності інвестицій менше двох років [19]. Однак в цих роботах для оцінки інфільтрованого повітря використовують спрощені розрахунки та зосереджуються на елементах ущільнення.

Крім того, більшість авторів декларують, що усунення підсосів автоматично призводить до «поліпшення термодинаміки процесу» та потенційної зміни кристалічної структури клінкеру. Нажаль, ці твердження, як правило, не підкріплені систематичними експериментальними даними щодо фазового складу й мікроструктури при різних рівнях інфільтрації повітря. Це вказує на потребу у більш глибоких матеріалознавчих дослідженнях, інтегрованих із теплотехнічним аналізом.

Існуючі методики вимірювання (O_2 -аналіз приладами, витратомірні схеми, ультразвукові детектори) та конструкторські рішення (різні типи ущільнень) покривають лише частину проблеми – вони дозволяють виявити та зменшити підсози. На жаль, ці підходи не дають цілісного розуміння, яким чином інфільтроване повітря змінює роботу обертової печі як складної тепло-гідродинамічної системи.

Отже, існує чітко виражений науковий та практичний запит на комплексний підхід до дослідження впливу інфільтрованого повітря, який би поєднував:

- врахування підсосів повітря при визначенні теплового балансу та витрат палива;
- вплив на стабільність і параметри факелу;
- оцінку перевитрат енергетичних ресурсів в наслідок наявності підсосів.

Саме на вирішення цієї методологічної прогалини й доцільно спрямувати дослідження, формуючи більш повну картину причинно-наслідкових зв'язків між підсосами повітря, енергоємністю, надійністю та керованістю процесу випалу продукції в обертових печах.

Мета статті

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу інфільтрованого повітря на роботу обертової печі.

Для досягнення мети розглядаються наступні завдання:

- аналіз природи та основних джерел виникнення інфільтрації в обертових печах;
- кількісний аналіз підсосів в залежності від тиску в печі, геометрії ущільнення і температурного режиму печі;
- розрахунок впливу інфільтрованого повітря на тепловий баланс печі та визначення величини перевищат палива;
- дослідження змін характеристик факела та умов горіння палива при наявності неорганізованих підсосів;
- розробка рекомендацій щодо методів діагностики та усунення підсосів.

Матеріали та методи

В статті розглядаються результати моделювання за допомогою обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD) в програмному комплексі Ansys Fluent 2025 R2 (Student edition).

В якості об'єкту дослідження використовується тривимірна модель обертової печі з наступними характеристиками: внутрішній діаметр – 3,6 м, довжина – 75 м. Паливо – метан (CH₄) за нормальних умов, подається через дифузійний пальник з соплом 65 мм з масовою витратою $V_{нал} = 0,498$ кг/с (об'ємна витрата складає 2500 нм³/год). Повітря подається рівномірно по двом круглим каналам діаметром 1 м кожний по бокам пальника. Кількість повітря, що організовано подається в піч, складає $L_a = 9,81$ кг/с, при температурі 200°C. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,15$. Розрідження на осі вихідного перетину розвантажувального («гарячого») кінця печі складає -50 Па. Підсоси повітря в піч моделюються через кільцеву щілину між «гарячою» головкою та корпусом печі розміром 50 мм.

В якості моделі для симуляції обрана модель горіння без попереднього змішування. В розрахунках використовується модель турбулентності k-ε, що враховує кінетичну енергію турбулентності (k) та швидкість її дисипації (ε). Для спрощення розрахунків стінки печі приймаються адиабатними. Розрахункова сітка складається з 1010188 елементів, середній розмір елементу – 0,14 м. Кількість розрахункових ітерацій складала 1000 кроків.

Сітка та 3D модель печі представлені на рис. 1.

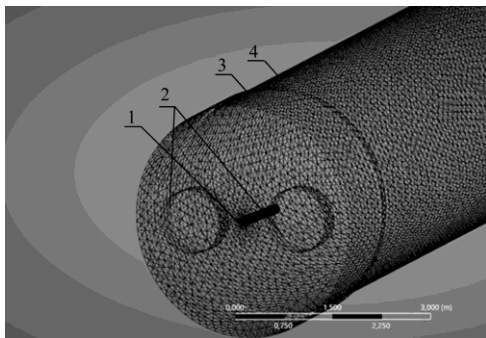


Рис. 1 – 3D модель та розрахункова сітка в Ansys 1 – пальник, 2 – канали подачі повітря, 3 – щілина в откатній головці, 4 – корпус печі

Виклад основного матеріалу

В обертових печах реалізується протиточний рух матеріалу та димових газів. Для забезпечення видалення продуктів згоряння палива та технологічного CO₂ у робочому просторі печі підтримується тиск, менший за атмосферний. Величина перепаду тиску варіюється від 50–100 Па біля «гарячої» головки печі до 200–300 Па перед підігрівачем («холодна» головка). Саме це розрідження і є головною причиною інфільтрації холодного повітря в робочий простір печі або запічних теплообмінників.

Як вже зазначалось раніше, обертова піч має значні габарити (довжина до 80 м) та рухомі частини. Забезпечення повної герметичності такої системи є дуже складним технічним завданням. За результатами джерела [10], основні місця та частка в загальному об'ємі підсосів холодного повітря наведені в табл. 1.

Таблиця 1
Основні місця та частка інфільтрації повітря в обертових печах

Місце інфільтрації	Частка в загальному об'ємі підсосів
Торцеві ущільнення печі	18-22%
Оглядові люки та дверцята	10-15%
Підігрівачі сировини	15-20%
Пилоочисне обладнання	10-15%
Димосос	5-8%

Кількість інфільтрованого повітря, що поступає в піч через отвори, можна розрахувати за формулою для витоку рідини при низькому тиску:

$$V_{инф} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{нов}}} \tag{1}$$

де μ – коефіцієнт витрати, який залежить від геометрії отвору (для щілин знаходиться в діапазоні 0,6–0,7; в подальших розрахунках приймається 0,65); ΔP – перепад тиску, Па; $\rho_{нов}$ – густина атмосферного повітря, кг/м³; F – площа отвору, м².

Площа F розраховується за формулою:

$$F = \frac{\pi \cdot (D_e^2 - D_n^2)}{4}, \text{ м}^2 \tag{2}$$

де D_e – внутрішній діаметр відкотної головки, дорівнює 3,7 м; D_n – зовнішній діаметр печі, дорівнює 3,6 м.

Відповідно формулі (2), площа щілини для заданих умов буде складати $F = 0,573$ м²

Згідно рівнянню (1) максимальна кількість повітря, що потрапляє в робочу зону печі з розрідженням 50 Па через негерметичну щілину між торцем печі та рухомим корпусом товщиною 50 мм, буде складати:

$$V_{инф} = 0,65 \cdot 0,573 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 50}{1,29}} = 3,279 \text{ м}^3/\text{с}$$

Кількість інфільтрованого повітря на годину складає $V_{inf} = 11804 \text{ м}^3/\text{год}$.

Відповідно до реакції окислення метану, на кожен м^3 метану потрібно 2 м^3 кисню. Враховуючи концентрацію кисню в повітрі на рівні 21%, теоретична кількість повітря на спалення 1 м^3 метану складає $L_0 = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

З урахуванням коефіцієнту надлишку повітря $\alpha = 1,15$ фактична кількість повітря на спалення метану дорівнює: $1,15 \cdot 9,52 = 10,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Витрати метану складають $2500 \text{ м}^3/\text{год}$, тож витрати повітря складуть: $2500 \cdot 10,95 = 27375 \text{ м}^3/\text{год}$ за нормальних умов або $47430 \text{ м}^3/\text{год}$ при $t = 200^\circ\text{C}$.

Таким чином через торцеву щілину «гарячого» кінця печі до робочого простору може поступати надлишкове повітря у кількості до 25% від необхідного, що більше за дані, наведені в табл. 1. Пов'язано це з тим, що в роботі [10] ширина щілин не однакова по всій дузі і додатково ізольована ущільнювачем. Для більш точних розрахунків треба брати реальну площу отворів з урахуванням вище зазначеного.

Крім того, кількість інфільтрованого повітря по різних частинам щілини не є однаковою. Пов'язано це з різницею температур всередині ($t_n = 1100^\circ\text{C}$) та ззовні печі (за нормальних умов). В наслідок суттєвого перепаду температур густина атмосферного повітря ($\rho_{зов} = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$) більше за густину димових газів ($\rho_{вс} = 0,247 \text{ кг}/\text{м}^3$) майже в 5,2 рази. Крім того, густина димових газів може залежити від точки заміру (по висоті печі).

Для більш точного розрахунку кількості підсосів, розіб'ємо кільцевий отвір по висоті на 12 частин, $0,3 \text{ м}$ заввишки кожна. На рис. 2 схематично зображено розподіл загальної площі щілини на сегменти.

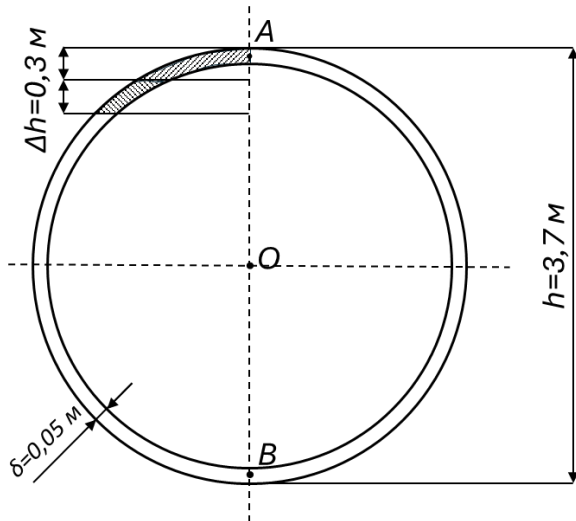


Рис. 2 – Схема сегментації щілини

Перепад тиску по висоті печі визначається за формулою:

$$\Delta P = (\rho_{зов} - \rho_{вс}) \cdot h \cdot g, \text{ Па}$$

Точка O (рис. 2) знаходиться по центру, розрідження в ній становить -50 Па . Відстань від центру до точок A і B дорівнює радіусу печі ($R = 3,7/2 = 1,85 \text{ м}$).

Оскільки точка A знаходиться вище центру, то перепад тиску тут буде менше і складе: $-50 + 18,93 = -31,07 \text{ Па}$.

A в точці B: $-50 - 18,93 = -68,93 \text{ Па}$.

Площа сегменту кільця розраховується за формулою:

$$F = \delta \cdot h \cdot \left[\arcsin\left(\frac{y_2}{R}\right) - \arcsin\left(\frac{y_1}{R}\right) \right], \text{ м}^2$$

де δ – висота щілини, м; y_1 та y_2 – координати сегменту відносно центру кільця.

Повні результати розрахунків наведені в табл. 2.

Таблиця 2
Результати розрахунків підсосів повітря в розвантажувальній головці печі в залежності від висоти

№	Перепад тиску (ΔP), Па	Площа щілини (S), м^2	Об'ємна витрата (V), $\text{м}^3/\text{с}$	Об'ємна витрата (V), $\text{м}^3/\text{год}$	Відсоток від загальних витрат %
12 (точка A)	-31,07	0,1069	0,482	1736,0	14,86
11	-34,23	0,0466	0,221	794,5	6,80
10	-37,38	0,0376	0,186	670,1	5,74
9	-40,54	0,0335	0,173	622,1	5,33
8	-43,69	0,0315	0,168	605,9	5,19
7	-46,85	0,0306	0,169	609,4	5,22
центр	-50,00	0	0,0	0,0	0,0
6	-53,15	0,0306	0,180	649,2	5,56
5	-56,31	0,0315	0,191	687,9	5,89
4	-59,46	0,0335	0,209	753,5	6,45
3	-62,62	0,0376	0,241	867,3	7,42
2	-65,77	0,0466	0,306	1101,3	9,43
1 (точка B)	-68,93	0,1069	0,718	2585,6	22,13
Сума		0,5733	3,245	11682,8	100

Як можна побачити з табл. 2, на нижню частину щілини перепадає 22,13% від загальної кількості підсосів. Це обумовлено одразу двома факторами: найбільшим перепадом тиску – $-68,93 \text{ Па}$ та найбільшою площею сегменту – $0,1069 \text{ м}^2$. Крім того, необхідно звернути увагу, що такий розподіл кількості підсосів по висоті щілини справедливий за умови вимірювання перепаду тиску на осі вихідного перетину розвантажувального кінця печі (рис. 2, точка O).

Перепад тиску на загрузочному («холодному») кінці печі значно вищий. Це необхідно для подолання гідравлічного супротиву печі і видалення додаткової кількості технологічного CO_2 . Зазвичай в цій частині печі розрідження складає -200 Па , а температура димових газів – $600\text{--}700^\circ\text{C}$. За таких умов відношення густин атмосферного повітря ($\rho_{зов} = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$) до димових газів ($\rho_{вс} = 0,388 \text{ кг}/\text{м}^3$) буде меншим і складе близько 3,3. Тоді згідно формули (1) та геометричними розмірами відповідно рис. 2, отримаємо наступні результати розподілу інфільтрації по висоті на «холодному» кінці печі (табл. 3).

Таблиця 3

Результати розрахунків підсосів повітря на загрузочному кінці печі в залежності від висоти

№	Перепад тиску (ΔP), Па	Площа щілини (S), м ²	Об'ємна витрата (V), м ³ /с	Об'ємна витрата (V), м ³ /год	Відсоток від загальних витрат %
12 (точка А)	-183,85	0,1069	1,173	4222,8	17,88
11	-186,54	0,0466	0,515	1854,7	7,85
10	-189,23	0,0376	0,419	1507,8	6,39
9	-191,93	0,0335	0,376	1353,7	5,73
8	-194,62	0,0315	0,355	1278,8	5,42
7	-197,31	0,0306	0,347	1250,7	5,30
центр	-200,00	0	0,000	0,0	0,00
6	-202,69	0,0306	0,352	1267,6	5,37
5	-205,38	0,0315	0,365	1313,7	5,56
4	-208,07	0,0335	0,392	1409,5	5,97
3	-210,77	0,0376	0,442	1591,2	6,74
2	-213,46	0,0466	0,551	1984,0	8,40
1 (точка В)	-216,15	0,1069	1,272	4578,7	19,39
Сума		0,5733	6,559	23613,2	100

Як видно з розрахунків, найбільше підсосів також відбувається у верхньому та нижньому сегменті, через їх велику площу. Таким чином, через щілину в 50 мм на «холодному» кінці печі в агрегат може потрапляти до 23,6 тис. м³/год атмосферного повітря, що приблизно в 2 рази більше, ніж на «гарячому» кінці. Однак це надлишкове повітря суттєво впливає тільки на процеси теплообміну у підігрівачі.

Загальна ж кількість інфільтрованого повітря, що потрапляє в піч та димовий тракт, може досягати 35,2 тис. м³/год за нормальних умов.

На практиці замість розрахунків використовуються методи газового аналізу та інструментального обстеження.

Найбільш поширеним методом є розрахунок обсягу інфільтрованого повітря на основі зміни концентрації кисню між двома точками вимірювання. Формула, для розрахунку відсотку підсосів, згідно з джерелом [15], має вигляд:

$$\%V_{инф} = \frac{\%O_2^{вих} - \%O_2^{вх}}{20,99 - \%O_2^{вих}} \cdot 100, \% \quad (3)$$

де $\%O_2^{вх}$ – концентрація кисню на вході печі, %; $\%O_2^{вих}$ – концентрація кисню на виході, %; 20,99 – об'ємна частка кисню в атмосферному повітрі, %. Цей метод базується на припущенні, що на аналізованій ділянці не відбувається горіння (відсутність СО на вході). Наявність оксиду вуглецю ускладнює розрахунок, оскільки частина кисню витрачається на його згорання, що може призвести до заниження оцінки підсосів.

Згідно з даними моделювання, концентрація кисню в димових газах на виході печі за наявності максимальних підсосів може сягати 7,5% (рис. 3б). Тоді, відповідно рівнянню (3), надлишок інфільтрованого повітря складатиме: $\%V_{инф} = \frac{7,5-2}{20,99-7,5} \cdot 100 = 40,7\%$, що

перевищує попередні розрахунки на 15 базових пунктів.

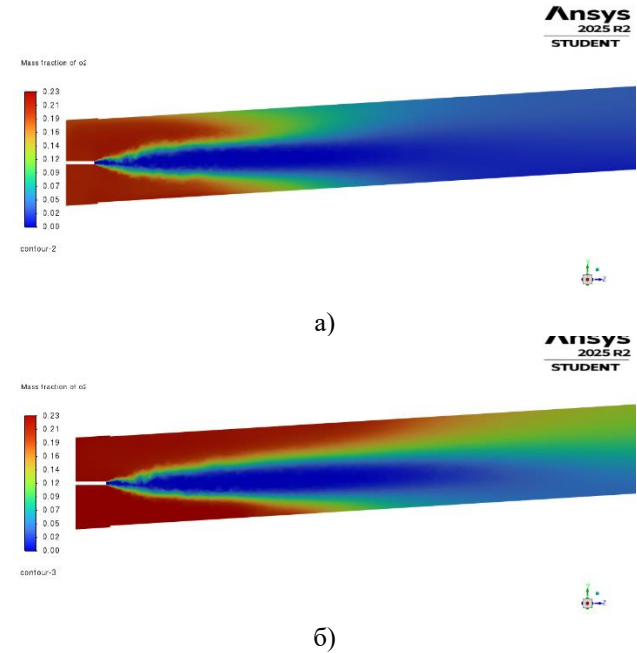


Рис. 3 – Концентрація O₂ в робочому просторі печі: а) без підсосів повітря; б) з підсосами повітря

Вплив підсосів повітря на тепловий баланс.

Потрапляючи в зону високих температур всередині печі (понад 1400°C), інфільтроване холодне повітря нагрівається, відбираючи значну частину корисної теплової енергії, призначеної для ендотермічної реакції кальцинації вапняку. А це, в свою чергу, призводить до зниження температури в печі.

По аналогії з формулою для розрахунку температури продуктів згорання в залежності від теплотворної здатності палива та коефіцієнта надлишку повітря [20], формула для визначення температури димових газів з урахуванням інфільтрованого повітря має вигляд:

$$t_{nз} = \frac{\alpha \cdot L_0 \cdot c_p^{нов} \cdot t_{нов} + c_p^2 \cdot t_2 + Q_{н.р.} \cdot \eta_{спал} + \frac{V_{инф}}{V_2} \cdot c_p^{инф} \cdot t_{инф}}{(L_0 + 1) \cdot c_p^{nз} + (\alpha - 1) \cdot L_0 \cdot c_p^{нов} + \frac{V_{инф}}{V_2} \cdot c_p^{инф}}, \quad (4)$$

де L_0 – стехіометрична кількість повітря, необхідна для спалення 1 м³ палива, м³/м³; $c_p^{нов}$, $c_p^{инф}$, c_p^2 , $c_p^{nз}$ – питомі теплоємності підігрітого повітря, інфільтрованого повітря, палива та димових газів відповідно, Дж/(м³·°C); $t_{нов}$, $t_{инф}$, t_2 – температури підігрітого повітря, інфільтрованого повітря та палива відповідно, °C, $Q_{н.р.}$ – нижча теплота згорання палива, МДж/м³; $V_{инф}$, V_2 – об'ємні витрати інфільтрованого повітря та палива, м³/с; $\eta_{спал}$ – ККД системи спалювання.

Результати розрахунків температурних полів в середині печі за допомогою CFD моделювання представлені на рис. 4.

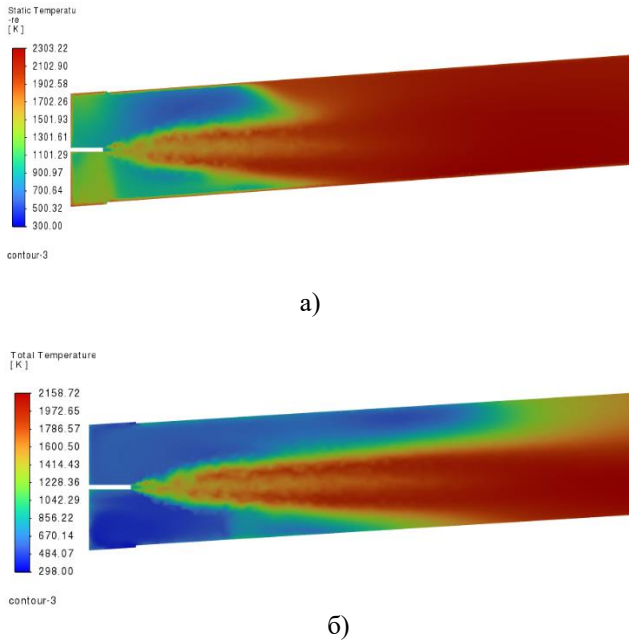


Рис. 4 – Температура в робочому просторі печі: а) без підсосів повітря; б) з підсосами повітря

Як видно з рис. 4б, підсоси атмосферного повітря значно знижують температуру в місцях їх виникнення. Окрім того, деякий час це повітря має нагріватись в робочому просторі, що значно погіршує теплообмін між димовими газами та матеріалом, що випаляється. Враховуючи, що основний вид теплообміну в обортових печах – випромінювання, навіть незначне зниження температури димових газів суттєво впливає на теплообмін і енергоефективність агрегату.

Щоб компенсувати падіння температури та нагріти інфільтроване повітря, доводиться збільшувати теплову потужність печі через спалення додаткової кількості палива. Перевитрати палива для компенсації падіння температури розраховуються за формулою:

$$V_{e.над} = \frac{V_{инф} \cdot c_p^{пов} \cdot (t_{вих} - t_{инф})}{Q_{н.р} \cdot \eta}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (5)$$

де $t_{вих}$, $t_{инф}$ – температури димових газів на виході печі та атмосферного повітря відповідно, °С.

Однак збільшення витрат палива запускає так зване «порочне коло» процесу інфільтрації повітря. Оскільки додаткове паливо потребує більше повітря для горіння, що призводить до різкого зростання загального об'єму газів в печі. Щоб видалити збільшений об'єм газів, димосос має збільшити потужність, а це, в свою чергу, підвищує розрідження в робочому просторі печі. Це призводить до ще більшого підсосу повітря через існуючі нещільності згідно з рівнянням (1). Крім того, при збільшенні витрат палива порушується відповідність зони максимальних температур факела та зони випалу. Це, в свою чергу, веде до зниження якості готової продукції. Тому для зменшення підсосів буде більш правильним спробувати знизити розрідження в печі. Якщо цього не достатньо, то знизити

подачу повітря з охолоджувача, контролюючи температуру матеріалу на виході.

Парадоксальним наслідком інфільтрації повітря може стати хімічний недопал. Це пояснюється погіршенням умов змішування і зниженням температури. У той час, як загальний коефіцієнт надлишку повітря α може бути високим (наприклад, $\alpha > 1,3$), локально в зоні горіння можуть утворюватися зони збідненої суміші або зони переохолодження. Поява СО у димових газах свідчить про втрати хімічної енергії палива. Кількість таких перевитрат визначається за рівнянням:

$$V_{хим} = V_e \cdot \frac{q_{хим}}{100 - q_{хим}}, \text{ м}^3 \quad (6)$$

де $q_{хим}$ – втрати тепла від хімічного недопалу палива, %, що розраховується за формулою:

$$q_{хим} = \frac{(12,65 \cdot CO + 10,8 \cdot H_2 + 35,8 \cdot CH_4) \cdot V_{пз}}{Q_{н.р.}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де CO , H_2 , CH_4 – об'ємні долі відповідних елементів у продуктах згорання, %; $V_{пз}$ – теоретичний об'єм продуктів згорання, м^3 .

Нестабільність надходження інфільтрованого повітря викликає нерівномірність розподілу СО в робочому просторі печі, що змушує операторів тримати ще вищий «запас» повітря, додатково знижуючи енергоефективність роботи печі.

Розподіл концентрації СО всередині печі, отриманий в результаті CFD моделювання (рис. 5б) підтверджує вплив інфільтрації повітря на локальне збільшення СО.

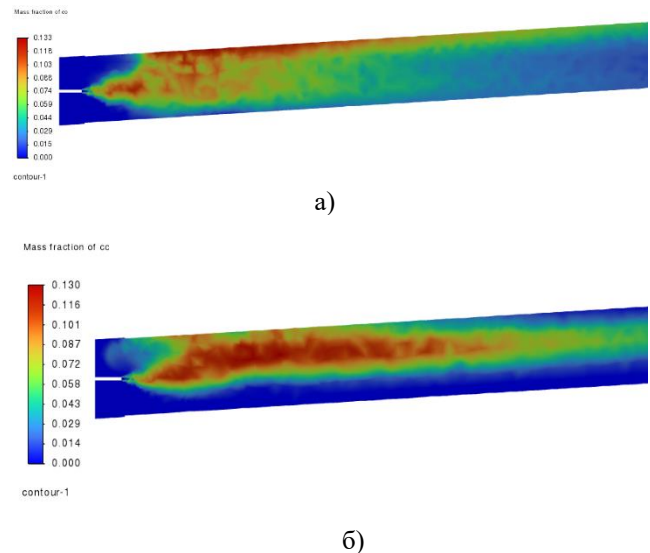


Рис. 5 – Концентрація СО в робочому просторі печі: а) без підсосів повітря; б) з підсосами повітря

Вплив інфільтрації на аеродинаміку факелу.

Сучасні пальники обортових печей формують складну аеродинаміку факела з зонами внутрішньої та зовнішньої рециркуляції. Ці зони необхідні для стабілізації полум'я, підмішування гарячих продуктів згорання до кореня факела і підтримці стабільного

процесу горіння. Неорганізовані потоки інфільтрованого повітря, особливо ті, що надходять через ущільнення гарячої голівки печі, можуть руйнувати ці рециркуляційні зони.

Оскільки підсоси часто відбуваються нерівномірно (наприклад, більше знизу через швидший знос ущільнення, більшу площу отвору та вище розрідження), це призводить до викривлення факела, його «прибивання» до верху футеровки або шару матеріалу.

Надлишок холодного повітря уповільнює кінетику горіння, розтягуючи процес у просторі. Факел стає довгим (рис. 4б), «млявим» і менш інтенсивним. Це призводить до перегріву корпусу печі в перехідних зонах та зміщення зони спікання ближче до загрузочного кінця печі, що вимагає збільшувати час перебування матеріалу в печі і зменшує її продуктивність.

Вплив підсосів повітря на гідравлічний режим.

Гідравлічний режим печі визначає умови руху газів та матеріалу. Стабільність розрідження по довжині печі є запорукою оптимального режиму роботи. Як зазначалося раніше, інфільтрація збільшує об'єм газів, що проходять через піч. При незмінному поперечному перерізі це призводить до зростання лінійної швидкості потоку димових газів. Швидкості газів можуть зрости з оптимальних 10–12 м/с до 15–18 м/с і вище, що призводить до збільшення пиловиносу дрібних частинок матеріалу. Підвищене пиловинесення порушує теплообмін (пил виступає «шторою», поглинаючи теплові радіаційні потоки), збільшує навантаження на циклони та фільтри, прискорює абразивний знос газоходу та димососу та може суттєво впливати на продуктивність агрегату.

Як зазначалось раніше, кількість та розподіл інфільтрованого повітря не є постійними величинами. Ці коливання викликають постійні зміни тиску в печі. Система автоматичного регулювання розрідження (через шибєр або частотний перетворювач навантаження димососа) намагається компенсувати ці зміни, проте часто входить у резонанс або запізнюється. Це призводить до режиму «дихання» печі – періодичних коливань тиску, які порушують нормальну роботу. Щоб стабілізувати розрідження в печі, автори **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** пропонують використовувати методи машинного навчання для прогнозування та контролю коливань тиску, спричинених зміною витрат первинного та вторинного повітря, а також підсосів. В результаті роботи дослідникам вдалось зменшити коливання тиску в печі з 31 до 9 Па, що також забезпечило стабілізацію температури в печі.

Вплив інфільтрації на роботу димососу.

Додаткова кількість димових газів, що утворюються в результаті підсосів атмосферного повітря, значно збільшують навантаження на димосос.

Формула для розрахунку потужності на валу N має вигляд:

$$N = \frac{V_{nz} \cdot \Delta p}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{оим}}, \text{ кВт} \quad (8)$$

де V_{nz} – витрати димових газів, м³/год; Δp – загальний аеродинамічний опір димового тракту, Па; $\eta_{оим}$ – загальний ККД димососа. Оскільки аеродинамічний опір системи зростає пропорційно квадрату витрат ($\Delta p \sim V_{nz}^2$), споживана потужність димососом зростає пропорційно третього ступеня кількості димових газів:

$$N \sim V_{nz}^3. \quad (9)$$

Додавання 34,8 тис. м³/год (н.у.) або 73 тис. м³/год (за $t = 300^\circ\text{C}$) інфільтрованого повітря збільшує кількість димових газів ($V_{nz} = 28,7$ тис. м³/год за н.у. або 60,2 тис. м³/год за $t = 300^\circ\text{C}$) у 2,2 разу. Відповідно до рівняння (9) потужність на валу димососа збільшиться у 10,6 разів.

Шляхи усунення інфільтрації повітря.

Не зважаючи на відсутність комплексного аналізу впливу інфільтрованого повітря на ефективність роботи агрегату, на практиці існують практичні заходи для зменшення підсосів. Серед найбільш відомих можна зазначити наступні заходи:

1. Модернізація ущільнень, що включає заміну традиційних лабіринтних або пелюсткових ущільнень на сучасні графітові блочні [17]. Графіт забезпечує відмінне ковзання по гарячому металу, компенсує радіальне биття корпусу печі та витримує температури до 1260°C без втрати герметичності.

2. Впровадження інтелектуальних систем керування тиском в печі (наприклад, на базі PID-регуляторів або нейронних мереж) **Помилка! Джерело посилання не знайдено.** дозволяє підтримувати стабільне розрідження в печі, мінімізуючи його коливання. Оптимально підтримувати мінімально можливе розрідження в голівці печі (наприклад, -10...-20 Па). Зменшення розрідження з 50 Па до 20 Па знизить підсоси в 1,58 рази згідно з рівнянням (1).

3. Використання портативних газоаналізаторів та тепловізорів для виявлення «холодних плям» на корпусі, що свідчать про локальні підсоси через футеровку. Для усунення підсосів через фланці, люки та тріщини в обмурівці використовуються спеціалізовані високотемпературні герметики та компаунди [15]. Ці матеріали здатні витримувати температурні розширення та вібрації, забезпечуючи довготривалу герметичність статичних з'єднань.

Висновки

У роботі виконано комплексне дослідження впливу інфільтрованого повітря на параметри роботи обертової печі з урахуванням теплових, гідродинамічних та аеродинамічних аспектів.

Наукова новизна результатів полягає в тому, що вперше встановлено кількісну залежність розподілу підсосів повітря по перерізу щілини від висоти печі. Показано, що інфільтрація має суттєво нерівномірний

характер: максимальні підсоси припадають на нижній сегмент щілини, де поєднуються найбільші значення перепаду тиску та площі. Доведено, що результати розрахунків критично залежать від вибору точки вимірювання розрідження, що необхідно враховувати при проведенні енергоаудиту та інженерних розрахунків.

Для дослідження параметрів роботи печі, процесів горіння та впливу підсосів використано методи обчислювальної гідрогазодинаміки (CFD), реалізовані в програмному комплексі Ansys Fluent. Це дозволило отримати якісну картину розподілу температур, концентрацій O_2 та CO , а також виявити локальні ефекти, які неможливо визначити за допомогою спрощених балансових методик. Однак результати CFD-моделювання мають попередній характер і потребують подальшого уточнення. Зокрема, необхідно врахувати реальні граничні умови, тепловтрати через корпус печі, нестаціонарність процесів, а також більш детальну геометрію ущільнень і зони інфільтрації.

Встановлено, що кількість інфільтрованого повітря є значною та може досягати для заданих умов:

- до 11,7 тис. m^3 /год через «гарячий» кінець печі, що становить до 25% і більше від об'єму повітря, необхідного для горіння палива;
- до 23,6 тис. m^3 /год через «холодний» кінець;
- сумарно – до 35,2 тис. m^3 /год. Це підтверджує суттєвий вплив підсосів на тепловий баланс та газодинаміку агрегату.

Аналіз отриманих графічних результатів (рис. 3–5) показав, що:

- підсоси призводять до локального зниження температури та погіршення умов теплообміну;
- відбувається деформація та подовження факела, що зміщує зону випалу;
- зростає нерівномірність розподілу кисню, що викликає локальні зони неповного згорання (підвищення CO).

Встановлено, що інфільтрація повітря суттєво впливає на роботу димососа:

- збільшення загального об'єму димових газів у 2,2 рази призводить до зростання споживаної потужності на валу димососу у 10,6 рази. Що викликає значне підвищення енергоспоживання та навантаження на газоочисне обладнання;
- зростання кількості газів призводить до підвищення швидкостей потоку всередині печі та інтенсифікації пиловиносу.

Таким чином, інфільтрація повітря є критичним фактором, що визначає енергоефективність, стабільність та продуктивність обортових печей. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення методів діагностики підсосів, оптимізації режимів роботи та підвищення енергетичної ефективності промислових агрегатів.

Перелік використаних джерел

- [1] Gebreslassie M., Gebrelibanos K., Belay S. Energy consumption and saving potential in cement factory: thermal energy auditing. *AFRREV STECH: An international journal of science and technology*. 2018. № 7(2), Pp. 92–106. DOI: <https://doi.org/10.4314/stech.v7i2.9>.
- [2] A critical review on energy use and savings in the cement industries / Madlool N. A., Saidur R., Hossain M.S., Rahimb N.A. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol 15, iss. 4. Pp. 2042–2060. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005>.
- [3] Осіпова Л. Модернізація промисловості України в контексті євроінтеграції у воєнний та повоєнний період. *International science journal of management, economics & finance*. 2025. № 4(4). С. 27–34. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmef.20250404.03>.
- [4] Ecodesign for Sustainable Products Regulation. URL: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en (дата звернення: 11.02.2026).
- [5] Ленцов І. А., Сущенко А. В., Ленцов Д. І. Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2014. № 29. С. 103–115.
- [6] Гупало Є. В., Здоровиченко С. А., Седнев А. Ю., Гупало В. І. Використання пиловугільного палива для випалу вапняку в обортових печах. *Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії*: колективна монографія : у 2 кн. Кн. 2 / за заг. ред. Ю. С. Пройдака. Дніпро : Нова ідеологія, 2017. С. 79–84.
- [7] Akwasi A. Boateng. Rotary kilns. Elsevier, 2008. 347 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7506-7877-3.x5001-6>.
- [8] «False Air»: The silent threat to thermal efficiency in kilns and grinding systems. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/false-air-silent-threat-thermal-efficiency-kilns-grinding-juan-ortega-lqm7f/> (дата звернення: 11.01.2026).
- [9] Execution and evaluation of kiln performance tests : specification Vt 10 / German association of cement works (VDZ). 1992.
- [10] Castro M. False air in the cement manufacturing process. URL: <https://motofrenos.com/wp-content/uploads/2023/04/False-Air-in-Cement-Manufacturing-Process.pdf> (дата звернення: 11.01.2026).
- [11] Shahin H., Hassanpour S., Saboonchi A. Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler. *Energy conversion and management*. 2016. Vol 114. Pp. 110–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.017>Incr easing.

- [12] Energy efficiency and reducing emissions from China's cement kilns : audit report of two cement plants in Shandong province, China / L. Price et al. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011. 45 p.
- [13] Influence of air infiltration on combustion process changes in a rotary tilting furnace / R. Dzurňák et al. *Processes*. 2020. Vol. 8, № 10. Article 1292. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr8101292>.
- [14] Nial M., Loukarfi L., Naji H. Aerodynamic control of a diffusion flame to optimize materials' transition in a rotary cement kiln. *Mechanics & Industry*. 2020. № 21. Article 414. DOI: <https://doi.org/10.1051/meca/2020043>.
- [15] Sharma K. Energy efficiency through «false air reduction». *Indian cement review*. 2021. Pp. 28–34.
- [16] Hashemi M., Ajam M. Investigation of environmental emissions reduction in a rotary cement kiln. *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*. 2026. Vol. 45(1). Pp. 181–191. DOI: <https://doi.org/10.30492/ijcce.2025.2059951.7103>.
- [17] What are the common kiln seals. URL: <https://rotarykilnfactory.com/what-are-the-common-kiln-seals/> (дата звернення: 11.01.2026).
- [18] Set of graphite block seal for rotary kiln and method of use : pat. WO 2022/119507 A1 International Bureau. Date of publication 09.06.2022.
- [19] d'Hubert X. Seals for cement kilns. *Global cement magazine*. November 2023. Pp. 16–18.
- [20] Грудз Я. В., Гоцуляк В. П., Криль М. Я. Температура горіння природного газу як критерій енергоефективності. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2018. № 1(66). С. 7–11.
- [21] Choudhary P. Pressure measurement and control in rotary kilns at TATA Sponge Iron Limited (TSIL). Asia Steel 2018 : Conference, Bhubaneswar, Orissa, India, 6–9 February 2018. Pp. 1–4.

A STUDY OF THE EFFECT OF INFILTRATED AIR ON THE HYDRAULIC OPERATING CONDITIONS OF ROTARY KILNS

Lentsov I.A.

PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi 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 «Priazovskyi state technical university», Dnipro, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3476-6767>, e-mail: umrikhin_m_o@aspirants.pstu.edu

This paper presents a study of the effect of infiltrated (false) air on the operating parameters of rotary kilns used in lime and cement clinker production. Special attention is given to uncontrolled air ingress through leakages, which significantly affects energy efficiency and process stability. The scientific novelty of the work lies in the first detailed investigation of the distribution of air infiltration along the kiln cross-section as a function of height. It is shown that air ingress is highly non-uniform and depends on both the local pressure gradient and the geometric characteristics of leakage zones. The study demonstrates that calculated infiltration rates are strongly dependent on the reference point of draft measurement, which introduces significant uncertainty in traditional engineering assessments and highlights the need for more precise methodologies. The study combines analytical methods with Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling using Ansys Fluent. Analysis of simulation results indicates that infiltrated air leads to local cooling zones, distortion and elongation of the flame, deterioration of heat transfer conditions, and formation of regions with incomplete combustion (increased CO concentration). Additionally, infiltration significantly alters the aerodynamic and hydraulic regimes, increasing gas velocities and promoting dust carryover. The results indicate that infiltrated air can reach up to 35.2 thousand m³/h, which corresponds to the required combustion air. It is shown that infiltration causes local cooling, flame distortion, heat transfer deterioration, and formation of incomplete combustion zones. It also significantly increases gas flow rates and disrupts the hydraulic regime. A substantial increase in load on the induced draft fan is observed: a 2.2-fold increase in gas volume may lead to more than a tenfold rise in power consumption. The obtained results can be used to improve diagnostics of air infiltration and increase the energy efficiency of rotary kilns.

Keywords: rotary kilns; cement clinker; lime; infiltration air; heat balance; hydraulic regime.

References

- [1] M. Gebreslassie, K. Gebrelibanos, and S. Belay, “Energy consumption and saving potential in cement factory: thermal energy auditing,” *AFRREV STECH: An international journal of science and technology*, № 7(2), pp. 92–106, 2018. doi: [10.4314/stech.v7i2.9](https://doi.org/10.4314/stech.v7i2.9).
- [2] N. A. Madlool, R. Saidur, M. S. Hossaina, and N. A. Rahimb, “A critical review on energy use and savings in the cement industries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 15, iss. 4, pp. 2042–2060, 2011. doi: [10.1016/j.rser.2011.01.005](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.005).
- [3] L. Osipova, “Modernizatsiia promyslovosti Ukrainy v konteksti yevrointehratsii u voiennyi ta povoiennyi period” [“Modernization of Ukraine’s Industry in the Context of European Integration During the Wartime and Post-War Period”], *International science journal*

- of management, economics & finance*, № 4(4), pp. 27–34, 2025. doi: 10.46299/j.isjmef.20250404.03. (Ukr.)
- [4] Ecodesign for Sustainable Products Regulation. [Online]. Available: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en. Accessed on: February 11, 2026.
- [5] I. A. Lentsov, A. V. Sushchenko, and D. I. Lentsov, “Тепловой баланс вращающейся печи для обжига известняка и его анализ” [“Heat balance of the rotary kiln for the limestone burning and its analysis”], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, № 29, pp. 103–115, 2014. (Rus.)
- [6] Ye. V. Hupalo, S. A. Zdorovychenko, A. Yu. Sedniev, and V. I. Hupalo, “Vykorystannia pylovuhilnoho palyva dlia vypalu vapniaku v obertovykh pechakh” [“Use of pulverized coal fuel for limestone firing in rotary kilns”], in *Teplotekhnika, enerhetyka ta ekolohiia v metalurhii* [Heat engineering, energy and ecology in metallurgy], book 2, Y. S. Proidak, Ed. Dnipro, Ukraine: Nova Ideolohiia Publ., 2017, pp. 79–84. (Ukr.)
- [7] A. A. Boateng, *Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes*. Oxford, UK: Elsevier, 2008. doi: 10.1016/B978-0-7506-7877-3.X5001-6.
- [8] «False Air»: The silent threat to thermal efficiency in kilns and grinding systems. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/false-air-silent-threat-thermal-efficiency-kilns-grinding-juan-ortega-lqm7f/> (дата звернення: 11.01.2026).
- [9] *Execution and Evaluation of Kiln Performance Tests*, VDZ Specification Vt 10, German Association of Cement Works (VDZ), 1992.
- [10] Castro M. False air in the cement manufacturing process. [Online]. Available: <https://motofrenos.com/wp-content/uploads/2023/04/False-Air-in-Cement-Manufacturing-Process.pdf>. Accessed on: February 11, 2026.
- [11] H. Shahin, S. Hassanpour, and A. Saboonchi, “Thermal energy analysis of a lime production process: Rotary kiln, preheater and cooler,” *Energy Conversion and Management*, vol. 114, pp. 110–121, Apr. 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.017.
- [12] L. Price, A. Hasanbeigi, N. Zhou, A. Thekdi, and W. Lan, “Energy efficiency and reducing emissions from China’s cement kilns: Audit report of two cement plants in Shandong province, China,” China Energy Group, Lawrence Berkeley Nat. Lab., Berkeley, CA, USA, Rep. LBNL-4902E, 2011.
- [13] R. Dzurňák et al., “Influence of air infiltration on combustion process changes in a rotary tilting furnace,” *Processes*, vol. 8, no. 10, article 1292, 2020. doi: 10.3390/pr8101292.
- [14] 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.
- [15] K. Sharma, “Energy efficiency through ‘false air reduction’,” *Indian Cement Review*, pp. 28–34, 2021.
- [16] M. Hashemi, and M. Ajam, “Investigation of environmental emissions reduction in a rotary cement kiln,” *Iranian journal of chemistry and chemical engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 181–191, 2026. doi: 10.30492/ijcce.2025.2059951.7103.
- [17] What are the common kiln seals. [Online]. Available: <https://rotarykilnfactory.com/what-are-the-common-kiln-seals/>. Accessed on: February 11, 2026.
- [18] “Set of graphite block seal for rotary kiln and method of use,” WO Patent 2022/119507 A1, 2022, Jun. 9, 2022.
- [19] X. d’Hubert, “Seals for cement kilns,” *Global Cement Magazine*, pp. 16–18, 2023.
- [20] Ya. V. Hrudz, V. P. Hotsuliak, and M. Ya. Kryl, “Temperatura horinnia pryrodnoho hazu yak kryterii enerhoefektyvnosti” [“Natural gas combustion temperature as a criterion for energy efficiency”], *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch – Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*, № 1(66), pp. 7–11, 2018. (Ukr.)
- [21] P. Choudhary, “Pressure measurement and control in rotary kilns at TATA Sponge Iron Limited (TSIL),” in *Proc. Asia Steel 2018 Conf.*, Bhubaneswar, Orissa, India, Feb. 6–9, 2018, pp. 1–4.

Стаття надійшла 18.02.2026

Стаття прийнята 11.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Ленцов І. А., Умріхін М. О. Дослідження впливу інфільтрованого повітря на параметри роботи обертових печей. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 2. С. 65–74. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.2.2026.359926>.