

ФОРМУВАННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НА ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТАДІЯХ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

Коновалюк С.Ю., Кірейцева Г.В., Кірейцев В.О.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

phde2251_ksyu@student.ztu.edu.ua, gef_kgv@ztu.edu.ua, phde2251_kvo@student.ztu.edu.ua

У статті розглянуто процес формування викидів забруднюючих речовин на технологічних стадіях виробництва цементу з позицій комплексного підходу до оцінки їх джерел, складу та інтенсивності. Актуальність дослідження зумовлена значним внеском цементної промисловості у погіршення якості атмосферного повітря, що підтверджується глобальними оцінками впливу забруднення на здоров'я населення. Метою роботи є систематизація та узагальнення сучасних наукових даних щодо утворення викидів на технологічних стадіях виробництва цементу для обґрунтування ефективних природоохоронних заходів.

У дослідженні проаналізовано основні етапи технологічного процесу, зокрема первинну підготовку сировини, помел сировинної суміші, випал клінкеру, його охолодження, а також помел цементу, пакування та відвантаження готової продукції. Встановлено, що на початкових стадіях виробництва домінують неорганізовані пилові викиди, які формуються внаслідок механічного руйнування та транспортування сировини, причому їх інтенсивність значною мірою залежить від кліматичних умов і технічних характеристик обладнання. На етапі помелу сировинної суміші переважають викиди дрібнодисперсного пилу, що утворюється під час роботи млинів і газоочисних систем, а також у меншій мірі газоподібні забруднювачі.

Особливу увагу приділено процесу випалу клінкеру, який визначено як найбільш екологічно навантажену стадію, що супроводжується утворенням широкого спектра забруднюючих речовин, зокрема CO₂, NO_x, SO₂, CO та пилу. Показано, що формування цих викидів зумовлене як фізико-хімічними процесами декарбонізації сировини, так і спалюванням палива, причому їх рівень залежить від складу матеріалів, температурного режиму та умов горіння. На стадіях охолодження клінкеру та виробництва готового цементу зберігається значна роль пилових викидів, що виникають під час теплообміну, транспортування, подрібнення та пакування матеріалів.

У роботі узагальнено характеристики викидів за стадіями виробництва та встановлено, що пилові забруднювачі є типовими для всього технологічного циклу, тоді як газоподібні викиди формуються переважно на етапі випалу клінкеру. Отримані результати дозволяють визначити найбільш критичні стадії з точки зору впливу на атмосферне повітря та можуть бути використані для вдосконалення систем екологічного моніторингу, оцінки впливу на довкілля і розроблення заходів щодо зниження викидів у цементній промисловості. *Ключові слова:* атмосферне повітря, джерела викидів, забруднюючі речовини, технологічний цикл, екологічна безпека.

Formation of pollutant emissions at the technological stages of cement production. Konovaliuk S., Kireitseva H., Kireitsev V.

The article examines the process of pollutant emission formation at the technological stages of cement production from the standpoint of an integrated approach to assessing their sources, composition, and intensity. The relevance of the study is determined by the substantial contribution of the cement industry to the deterioration of atmospheric air quality, as confirmed by global assessments of the impact of pollution on public health. The aim of the study is to systematize and generalize current scientific data on emission generation at the technological stages of cement production in order to substantiate effective environmental protection measures.

The study analyzes the main stages of the technological process, including primary raw material preparation, raw mix grinding, clinker burning, clinker cooling, as well as cement grinding, packaging, and dispatch of finished products. It has been established that fugitive dust emissions dominate at the initial stages of production; these emissions are generated as a result of the mechanical fragmentation and transportation of raw materials, and their intensity largely depends on climatic conditions and the technical characteristics of the equipment. At the stage of raw mix grinding, emissions of fine particulate matter generated during the operation of mills and gas-cleaning systems predominate, while gaseous pollutants are emitted to a lesser extent.

Particular attention is paid to the clinker burning process, which is identified as the most environmentally burdensome stage and is accompanied by the formation of a wide range of pollutants, including CO₂, NO_x, SO₂, CO, and dust. It is shown that the formation of these emissions is caused both by the physicochemical processes of raw material decarbonization and by fuel combustion, while their levels depend on material composition, temperature conditions, and combustion parameters. At the stages of clinker cooling and finished cement production, dust emissions continue to play a significant role, arising during heat exchange, transportation, grinding, and packaging of materials.

The paper summarizes the characteristics of emissions by production stage and establishes that dust pollutants are typical of the entire technological cycle, whereas gaseous emissions are formed predominantly at the clinker burning stage. The obtained results make it possible to identify the most critical stages in terms of their impact on atmospheric air and may be used to improve environmental monitoring systems, environmental impact assessment, and the development of emission reduction measures in the cement industry. *Key words:* atmospheric air, emission sources, pollutants, technological cycle, environmental safety.



Постановка проблеми. У сучасному світі забруднення атмосферного повітря залишається однією з найгостріших екологічних і медико-соціальних проблем, оскільки, за оцінками ВООЗ, вплив забрудненого повітря пов'язаний приблизно з 6,7 млн передчасних смертей щороку, значна частка населення світу проживає в умовах, де показники якості повітря не відповідають рекомендованим нормам [21]. Виробництво енергії, важка промисловість, а також транспорт є основними чинниками погіршення якості повітря. Підприємства з виробництва цементу є одними з найбільш значних джерел антропогенного забруднення атмосферного повітря. Технологічний процес супроводжується утворенням викидів забруднюючих речовин на всіх стадіях – від первинної підготовки сировини до відвантаження готової продукції, що зумовлює необхідність комплексного аналізу їх формування та пошуку ефективних шляхів їх зменшення. Цементна промисловість є одним із найбільших промислових джерел CO₂ у світі – на її частку припадає близько 7–8% глобальних антропогенних викидів CO₂, а у 2023 році обсяг викидів галузі становив приблизно 2,7–2,9 Гт CO₂ [1]. Загалом глобальні викиди від виробництва цементу у 2023 році досягли 1,56 млрд метричних тонн CO₂, що підкреслює масштаб екологічного навантаження від цієї галузі [2].

Особливої актуальності набуває ідентифікація джерел утворення викидів та встановлення їх якісного і кількісного складу, адже саме це дозволяє визначити внесок окремих технологічних операцій у загальний рівень забруднення атмосферного повітря. Такі дані є необхідними для розроблення науково обґрунтованих природоохоронних заходів, вибору оптимальних технологічних рішень, підвищення ефективності систем очищення газопилових потоків, а також для забезпечення екологічної безпеки прилеглих територій і мінімізації негативного впливу цементного виробництва на довкілля та здоров'я населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі питання забруднення атмосферного повітря підприємствами цементної промисловості розглядається в різних аспектах залежно від стадії технологічного процесу, виду забруднювальних речовин та умов функціонування виробництва.

Дослідження Ervik T. K. [7] та Thai T. [8] зосереджені на процесах помелу сировини та клінкеру, де розглянуто фізико-хімічні характеристики пилу, його фракційний склад і фактори, що впливають на інтенсивність викидів. Процеси випалу клінкеру та формування газоподібних викидів детально розглянуто у працях John P. J. [13], Mateus M. M. [14] та Wojtacha-Rychter K. [12], де проаналізовано утворення CO₂, NO_x і SO₂ та вплив характеристик палива на їх рівень. Особливості утворення пилу під час охолодження клінкеру висвітлено у роботах Al-Bakri A. Y. [16] та Abdel-Ghani N. T. [17], а джерела пилових

викидів на фінальних стадіях виробництва – у праці Ciobanu C. [10]. Питання моніторингу та верифікації викидів парникових газів на промислових підприємствах України в контексті євроінтеграційних вимог розглядаються у роботах Kireitseva N. V. та ін. [3] і Кірейцевої Г. В. та Хоменка С. В. [11], що підкреслює актуальність систематизації даних про викиди для вітчизняної промисловості.

Незважаючи на широке висвітлення окремих аспектів, у літературі бракує комплексного аналізу формування викидів упродовж усього технологічного циклу цементного підприємства, що ускладнює повноцінну оцінку його екологічного навантаження та обґрунтування природоохоронних заходів.

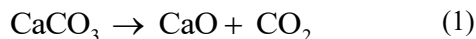
Метою дослідження є комплексний аналіз формування викидів забруднюючих речовин на технологічних стадіях виробництва цементу для систематизації джерел емісії та наукового обґрунтування природоохоронних заходів.

Основні результати та обговорення. Первинна підготовка сировини охоплює процеси дроблення, транспортування та складування матеріалів перед їх подачею на подальшу переробку. На даній стадії формуються переважно неорганізовані пилові викиди, пов'язані з механічним руйнуванням сировини, її пересипанням і переміщенням технологічними комунікаціями. Основними джерелами викидів є дробарки, конвеєри, перевантажувальні вузли та склади сипких матеріалів [6]. Зниження викидів на цьому етапі забезпечується завдяки герметизації обладнання, аспірації та системам пилопригнічення [4; 5].

Етап помелу сировинної суміші та підготовки шихти характеризується переважно викидами від організованих джерел, що виникають у процесі роботи сировинних млинів, сепараторів, циклонів і газоочисного обладнання. Домінуючим забруднювачем є дрібнодисперсний пил, концентрація якого у викидах залежить від ефективності й технічного стану пиловловлювального обладнання [8]. Пил на даній стадії містить дрібніші частинки порівняно з попередніми процесами – переважно фракцій PM10 та PM2.5, що зумовлює його триваліше перебування в повітрі та вищу здатність до перенесення. За фізико-хімічним складом він представлений переважно карбонатними та силікатними компонентами сировинної суміші, зокрема CaCO₃ і SiO₂ [7]. Додатково на цій стадії можуть утворюватися оксиди азоту, діоксид сірки та оксид вуглецю, що пов'язано зі спалюванням палива під час сушіння матеріалу [9]. Інтенсивність викидів визначається типом і продуктивністю обладнання, властивостями сировини та ефективністю систем пиловловлення.

Процес випалу клінкеру характеризується найбільшим впливом на довкілля з поміж інших етапів, оскільки саме на нього припадає до 90 % загального енергоспоживання підприємства та основна частка прямих газоподібних викидів. У пічній системі

формується організований викиди CO_2 , NO_x , SO_2 , CO і пилу, причому їх рівень визначається складом сировинної суміші, видом палива, температурою та повнотою горіння. Домінуючим за обсягом є CO_2 : близько 60 % його утворюється внаслідок декарбонізації вапняку, що описується реакцією:



Викиди оксидів азоту (NO_x) у процесі випалу клінкеру утворюються за високих температур у зоні горіння внаслідок окислення азоту повітря, а також з азоту, що міститься в паливі [14]. Їх інтенсивність залежить від температури факела, вмісту кисню та конструкції пальника, а використання альтернативних палив може сприяти зниженню рівня NO_x [15]. Викиди SO_2 визначаються вмістом сполук сульфуру в сировині та паливі, проте значна частина цього газу зв'язується в лужному середовищі печі й кальциатора, тому за сталого режиму його викиди можуть бути невеликими [16]. CO є показником неповного згоряння палива, а пилові викиди виникають унаслідок винесення дрібних частинок сировини й палива з газовим потоком; сучасні системи пиловловлення забезпечують зниження їх концентрацій [10; 13]. Заміна викопного палива альтернативним може вплинути на склад та обсяги викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря [18; 19].

Етап охолодження клінкеру характеризується переважно пиловими викидами, інтенсивність яких залежить від режиму охолодження та ефективності очищення повітря. Джерелом їх утворення є газоповітряний потік, що формується під час теплообміну в холодильниках цементних печей і виносить дрібнодисперсні мінеральні частинки, склад яких визначається сировинною сумішшю, видом палива та тех-

нологічним режимом роботи печі [20]. Основними компонентами такого пилу є сполуки кальцію, кремнію, алюмінію та заліза, а також луѓи, сульфати і хлориди, що формуються в умовах високотемпературного процесу [17]. Тому для зменшення впливу на атмосферне повітря важливе значення має ефективно пиловловлення та належна очистка повітря на виході з холодильних установок.

Етап помелу цементу, пакування та відвантаження також супроводжується викидами пилу від організованих і неорганізованих джерел. Вони виникають під час помелу клінкеру, транспортування, пересипання, зберігання, пакування та відвантаження цементу, а їх інтенсивність визначається герметичністю технологічних вузлів і ефективністю аспіраційного обладнання [8]. Інтенсивне пилоутворення спостерігається в цементних млинах, сепараторах, на ділянках пересипання матеріалу та під час пакування готової продукції [10]. Пил цього етапу представлений переважно мінералами клінкеру та добавок [12].

Узагальнену характеристику викидів забруднюючих речовин за стадіями виробництва цементу наведено в таблиці 1.

Аналіз даних, наведених у таблиці 1, виявив, що найбільший вплив на довкілля у виробничому циклі цементу має стадія випалу клінкеру, оскільки саме на цьому етапі відбуваються високотемпературна обробка сировини, декарбонізація карбонатів і спалювання палива, що зумовлює утворення значних обсягів CO_2 , NO_x , SO_2 , CO та пилу. Пилові викиди є характерними для всіх стадій виробництва, тоді як газоподібні забруднювачі формуються переважно на етапі випалу клінкеру, що наочно відображено на рисунку 1. Інші стадії виробництва також супроводжуються викидами

Таблиця 1

Характеристика викидів забруднюючих речовин за стадіями виробництва цементу

| Стадія виробництва | Основні забруднювачі | Тип викидів | Ключові фактори інтенсивності | Тип джерела |
|---|---|------------------------|---|-------------------------------|
| 1. Первинна підготовка (дроблення, транспортування) | пил (грубодисперсний), важкі метали (Cr, Pb, Cd, Ni) | пиловий | герметизація обладнання, наявність аспірації та пилопригнічення | неорганізоване |
| 2. Помел сировинної суміші | PM10, PM2.5 (CaCO_3 , SiO_2), NO_x , SO_2 , CO | пиловий + газоподібний | ефективність фільтрів, тип обладнання, вологість сировини | організоване |
| 3. Випал клінкеру (обертова піч) | CO_2 (~60% декарбон. + ~40% паливо), NO_x , SO_2 , CO , пил | газоподібний + пиловий | тип палива, температура факела (>1200°C), конструкція пальника | організоване |
| 4. Охолодження клінкеру | пил (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , сульфати, хлориди) | пиловий | тип холодильника, ефективність пиловловлення на виході | організоване |
| 5. Помел цементу, пакування, відвантаження | пил (аліт, беліт, PM10, PM2.5, сульфати лужних металів) | пиловий | герметичність вузлів транспортування, наявність аспірації | організоване + неорганізоване |

Джерело: сформовано автором

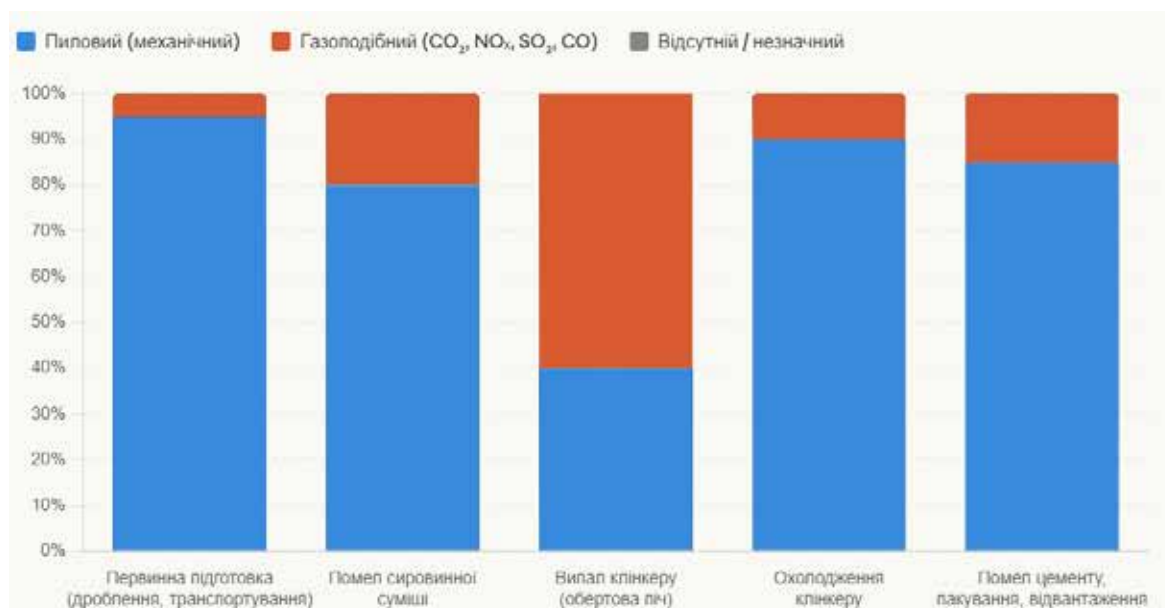


Рис. 1. Співвідношення типів викидів забруднюючих речовин за стадіями технологічного циклу виробництва цементу

Джерело: складено автором за результатами аналізу літературних джерел

забруднюючих речовин, проте їхній вплив є меншим порівняно з процесом випалу, оскільки вони переважно пов'язані з механічною обробкою, транспортуванням або пересипанням матеріалів без інтенсивних фізико-хімічних перетворень.

Аналіз рисунку 1 підтверджує стадійний характер формування викидів у виробництві цементу. На чотирьох із п'яти стадій домінують пилові викиди – їх частка становить від 80 до 95%, що свідчить про механічну природу більшості технологічних операцій підприємства. Принципово відрізняється стадія випалу клінкеру, де співвідношення кардинально змінюється: газоподібні викиди складають близько 60%, а пилові – лише 40%, що зумовлено інтенсивними фізико-хімічними перетвореннями сировини та спалюванням палива за високих температур. На етапі помелу сировинної суміші газоподібна складова також є помітною – близько 20%, що пов'язано з використанням сушильних агрегатів. Таким чином, рисунок наочно ілюструє, що пилові викиди є універсальними для всього технологічного циклу, тоді як газоподібні забруднювачі мають локалізований характер і концентруються переважно на етапі термічної обробки.

Висновки та пропозиції. Проведений аналіз засвідчив, що формування викидів забруднюючих речовин у виробництві цементу має стадійний характер. Пилові викиди є характерними для всіх техно-

логічних стадій підприємства – від первинної підготовки сировини до відвантаження готової продукції, причому їх інтенсивність визначається ступенем герметизації обладнання та ефективністю систем аспірації і пиловловлення. Газоподібні забруднювачі (CO₂, NO_x, SO₂, CO) формуються переважно на етапі випалу клінкеру, який є найбільш екологічно навантаженою стадією виробничого циклу – на нього припадає до 90% загального енергоспоживання підприємства та основна частка прямих газоподібних викидів.

Встановлено, що близько 60% викидів CO₂ на етапі випалу є технологічно немінучими – вони утворюються внаслідок декарбонізації вапняку, що принципово обмежує можливості їх зниження лише за рахунок оптимізації процесів горіння. Решта 40% викидів CO₂ пов'язана зі спалюванням палива і може бути зменшена шляхом впровадження альтернативних видів палива та підвищення енергоефективності пічної системи.

Для зниження впливу цементного виробництва на атмосферне повітря доцільно застосовувати диференційований підхід: на механічних стадіях – підвищувати ефективність пиловловлення і забезпечувати герметизацію обладнання; на стадії випалу – оптимізувати температурний режим, вдосконалювати конструкцію пальників та розширювати використання альтернативних видів палива з нижчим вмістом сірки і азоту.

Література

1. Decarbonizing the Cement Industry. Technological, Economic, and Policy Barriers to CO₂ Mitigation Adoption. MDPI. 2025. URL: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7040085> (дата звернення: 29.03.2026).
2. Global Carbon Project. Carbon dioxide emissions from the manufacture of cement worldwide from 1960 to 2023. Statista. 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/1299532/carbon-dioxide-emissions-worldwide-cement-manufacturing/> (дата звернення: 29.03.2026).

3. Kireitseva H.V., Khomenko S.V., Palii O.V., Kravchuk-Obodzinska T.V., Suprunova I.V. Monitoring of greenhouse gas emissions at mining and processing plants in Ukraine under European integration conditions. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 33. С. 121-136. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-09> (дата звернення: 18.03.2026).
4. Cement industry – Associated emissions, environmental issues and measures for the control of the emissions / F. B. Elehinafe та ін. *Mechanical Engineering for Society and Industry*. 2022. Т. 2, № 1. С. 17–25. URL: <https://doi.org/10.31603/mesi.5622> (дата звернення: 18.03.2026).
5. Upadhyay S. K., Tiwari M. K. Pollution control measures of the Cement industry: A case study of Prism Cement Satna. *International Journal of Agricultural Invention*. 2022. Т. 7, № 1. С. 112–119. URL: <https://doi.org/10.46492/ijai/2022.7.1.20> (дата звернення: 18.03.2026).
6. Common analysis methods for gaseous and solid contaminants emitted from different pollution sources: a review paper / Q. M. AJAJ та ін. *Pollution Research*. 2022. С. 416–439. URL: <https://doi.org/10.53550/pr.2022.v4i102.007> (дата звернення: 18.03.2026).
7. Physicochemical characterization of particulate matter in a cement production plant / T. K. Ervik та ін. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1039/d2em00139j> (дата звернення: 18.03.2026).
8. Thai T., Bernatik A., Kučera P. Air Pollution Associated with Total Suspended Particulate and Particulate Matter in Cement Grinding Plant in Vietnam. *Atmosphere*. 2021. Т. 12, № 12. С. 1707. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12121707> (дата звернення: 18.03.2026).
9. Vărbulescu A., Hosen K. Cement Industry Pollution and Its Impact on the Environment and Population Health: A Review. *Toxics*. 2025. Т. 13, № 7. С. 587. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics13070587> (дата звернення: 18.03.2026).
10. Dust Emission Monitoring in Cement Plant Mills: A Case Study in Romania / C. Ciobanu та ін. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Т. 18, № 17. С. 9096. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph18179096> (дата звернення: 18.03.2026).
11. Кірейцева Г.В., Хоменко С.В. Впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів як інструмент євроінтеграції України. *Вісник Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КрНУ. Випуск 1/2025 (150). С. 81-91. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.10> (дата звернення: 18.03.2026).
12. Wojtacha-Rychter K., Kucharski P., Smolinski A. Conventional and Alternative Sources of Thermal Energy in the Production of Cement—An Impact on CO2 Emission. *Energies*. 2021. Т. 14, № 6. С. 1539. URL: <https://doi.org/10.3390/en14061539> (дата звернення: 18.03.2026).
13. John J. P. Parametric Studies of Cement Production Processes. *Journal of Energy*. 2020. Т. 2020. С. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/4289043> (дата звернення: 18.03.2026).
14. Mateus M. M., Neuparth T., Cecilio D. M. Modern Kiln Burner Technology in the Current Energy Climate: Pushing the Limits of Alternative Fuel Substitution. *Fire*. 2023. Т. 6, № 2. С. 74. URL: <https://doi.org/10.3390/fire6020074> (дата звернення: 18.03.2026).
15. Used Tires as Fuel in Clinker Production: Economic and Environmental Implications / A. M. Castañón та ін. *Sustainability*. 2021. Т. 13, № 18. С. 10455. URL: <https://doi.org/10.3390/su131810455> (дата звернення: 18.03.2026).
16. Al-Bakri A. Y., Ahmed H. M., Hefni M. A. Cement Kiln Dust (CKD): Potential Beneficial Applications and Eco-Sustainable Solutions. *Sustainability*. 2022. Т. 14, № 12. С. 7022. URL: <https://doi.org/10.3390/su14127022> (дата звернення: 18.03.2026).
17. Abdel-Ghani N. T., El-Sayed H. A., El-Habak A. A. Utilization of by-pass cement kiln dust and air-cooled blast-furnace steel slag in the production of some “green” cement products. *HBRC Journal*. 2018. Т. 14, № 3. С. 408–414. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2017.11.001> (дата звернення: 18.03.2026).
18. MI Z. A Facile Water Treatment Rendering Cement Kiln Dust Reusable in Clinker Manufacturing. *Journal of Waste Resources and Recycling*. 2019. Т. 1, № 1. С. 1–11. URL: <https://doi.org/10.15744/2766-5887.2.101> (дата звернення: 18.03.2026).
19. Orazov P., Nurberdiev R., Khodzhamuradov K. Cement production efficiency improving. *E3S Web of Conferences*. 2023. Т. 376. С. 03013. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337603013> (дата звернення: 18.03.2026).
20. Popov A., Chernev G. THE EFFECT OF CEMENT KILN DUST ON THE PROPERTIES OF CEMENT. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2024. Т. 59, № 6. С. 1341–1346. URL: <https://doi.org/10.59957/jctm.v59.i6.2024.8> (дата звернення: 18.03.2026).
21. Ambient (outdoor) air pollution. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-%28outdoor%29-air-quality-and-health?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 23.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 30.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026