

Демченко К.В.

аспірант

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка***Demchenko Kseniia**

Postgraduate Student

Taras Shevchenko National University of Kyiv

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА ЦЕМЕНТУ

MODERN TECHNOLOGIES AS A TOOL TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF ENVIRONMENTAL MODERNIZATION AT CEMENT PRODUCTION

У статті висвітлено сучасний рівень екологічного впливу, зумовленого виробництвом цементу, окреслено перспективи лімітування негативних наслідків у подальшому. Визначено пріоритетні завдання для української цементної галузі, виконання яких дозволить підвищити рівень екологічності процесу виробництва. З урахування основних джерел викидів двоокису вуглецю, запропоновано шляхи екологізації процесу виробництва цементу з урахуванням найкращого світового досвіду. До запропонованих шляхів підвищення ефективності екологічної модернізації цементного виробництва суб'єктами господарювання віднесено наступні: зниження рівня енергоспоживання, заміна традиційних видів палива на альтернативні, зниження рівня клінкерного фактору у цементі, використання технології уловлювання вуглецю. Наведено досвід впровадження описаних технологій на промислових підприємствах України.

Ключові слова: виробництво, екологічна модернізація, промислове підприємство, підприємництво, екологічні інновації, ефективність.

The current state of science and progress does not yet allow for a radical reduction in environmental damage from cement production, as the technological process involves the release of large amounts of carbon dioxide during clinker baking, and the generation of significant amounts of dust due to the need to grind raw materials and clinker itself. By its very nature, cement production is one of the most resource- and energy-intensive industries. The article highlights the current level of environmental impact caused by cement production and outlines the prospects for limiting the negative impact in the future. Priority tasks for the industry should include rationalization of resource use, optimization of technological processes related to clinker firing, and the search for modern energy sources that can be integrated into the production system. In addition to measures related to changes in the production process, cement itself needs to be transformed. The key goal of cement improvement is to achieve a reduction in the average clinker share and product composition. Taking into account the main sources of carbon dioxide emissions, the ways of greening the cement production process are proposed, taking into account the best international practices. The proposed ways to increase the efficiency of environmental modernization of cement production by business entities include the following: reducing energy consumption, replacing traditional fuels with alternative ones, reducing the level of clinker factor in cement, and using carbon capture technology. The experience of implementing the described technologies at industrial enterprises of Ukraine is presented. The article emphasizes that the most important thing in conducting an EIA is the complexity and rationality of the chosen approaches, since the transformation of cement production takes place in different planes: technological, legal, and managerial. That is, the optimization of production technology should be accompanied by the establishment of an effective production control system, development of an effective management approach for the implementation and introduction of an innovation management system.

Key words: production, environmental modernization, industrial enterprise, entrepreneurship, environmental innovations, efficiency.

Постановка проблеми. Сучасний стан досягнень науки та прогресу поки не дозволяє радикально знизити екологічну шкоду від виробництва цементу, адже технологічний процес пов'язаний з вивільненням великої кількості двоокису вуглецю у процесі випікання клінкеру, утворенням значної кількості пилу через необ-

хідність подрібнення сировини та самого клінкеру. По своїй суті цементне виробництво є одним із найбільш ресурсо- та енергомістких виробництв, у структурі усього промислового енергоспоживання займає 7%. За оцінками Сembureau [2], використання бетону до 2050 року зросте в середньому на 15%. Що стосується

антропогенного впливу, то галузь цементного виробництва за обсягами викидів CO₂ займає друге місце серед інших секторів світової економіки із часткою 5-8% [9]. Тому перехід до низьковуглецевої економіки та сталого екологічного розвитку постає як неможливий без екологічної трансформації цементної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед вітчизняних учених значна увага приділена питанням розвитку сучасних екологічно ефективних видів цементу, зокрема ця тема досліджується у роботах таких авторів: М. Саницький, Т. Кропивницька, Т. Круць, І. Гев'юк [12; 13]. С. Плашихін [15] у своїх працях досліджує аспекти впровадження найкращих доступних технологій у процес виробництва цементу. Авторами С. Кривільовою, В. Власенко, Д. Цвіркуном [6] досліджено можливі шляхи боротьби з промисловим пилом при виробництві цементу з метою зниження негативної дії на екосистему. Німецьким дослідником М. Шнайдером [9] вивчено основні технологічні та інноваційні тренди у цементному виробництві. Комплексне дослідження стану та перспектив екологізації цементного виробництва проведені дослідниками Європейської цементної асоціації [2; 3; 7]. Попри наявність значної кількості публікацій та досліджень на дану тему, узагальнення різних підходів до екологічної трансформації процесів виробництва цементу є актуальним та важливим, адже дасть змогу розробити актуальні рекомендації для української цементної галузі стосовно оптимальних шляхів проведення екологічної модернізації виробництва.

Формулювання завдання дослідження. Розробити пропозиції щодо підвищення ефективності екологічної модернізації цементного виробництва суб'єктами підприємства через використання сучасних технологічних інновацій, враховуючи актуальний стан екологічної трансформації виробництва цементу в Україні.

Виклад основного матеріалу дослідження. З огляду на зазначені проблеми, пов'язані з виробництвом цементу, пріоритетними завданнями для галузі мають стати раціоналізація ресурсовикористання, оптимізація технологічних процесів пов'язаних із випалом клінкеру, а також пошук сучасних енергоносіїв, які можна інтегрувати у систему виробництва. Окрім заходів, пов'язаних із зміною виробничого процесу, трансформації потребують і сам цемент як продукт виробництва. Ключовою метою вдосконалення цементу є досягнення зниження середньої частки клінкеру у складі продукту.

Основними джерела викидів CO₂ при виробництві цементу виступають викиди від процесу кальцинації (54%), другими за часткою є викиди від спалювання палива (43%), найменшу частку складають непрямі викиди, пов'язані зі споживанням електроенергії (12%) [8, с. 75].

Існують чотири основні шляхи зниження рівня екологічної шкоди, зокрема, скорочення викидів CO₂ від виробництва цементу:

- зниження показника енергоспоживання;
- заміна традиційних видів палива на альтернативні;
- зниження клінкерного фактору у цементі;
- використання технології уловлювання вуглецю.

Зниження показника енергоспоживання

Відповідно до даних Європейської Агенції [4] з дослідження цементу (European Cement Research

Academy) середній світовий рівень споживання теплової енергії при виробництві сірого клінкеру становить 3,510 МДж/т клінкеру (без врахування енерговитрат на сушку палива). Це середній показник, розрахований на основі показників енергоспоживання 900 печей випалу різного типу та конфігурації. Граничні значення енергоспоживання зафіксовані при використанні мокрої технології – 5,7 МДж та 3,0 МДж для сухої технології. Обсяг споживання енергії при виробництві цементу залежить від декількох факторів: спосіб виробництва, конструкція обертової печі, специфічні хімічні і фізичні властивості сировини, властивості пального, технологічний рівень виробництва. Вчені прийшли до висновку, що технологічний необхідний мінімум енергоспоживання, до якого теоретично можна знизити витрати енергії на випал клінкеру складають від 1,85 до 2,8 МДж на 1 тону клінкеру в залежності від мінерального складу сировини та хімічного перебігу реакції спікання клінкеру.

До головних заходів технічного напрямку з підвищення ефективності енергоспоживання при виробництві цементу є ті, які передбачають зміну технології виробництва на більш ощадливу (наприклад з мокрої на суху або напівсуху). Особливо це актуально для української цементної галузі, да завжди традиційною була мокра технологія виробництва, що зумовлено специфікою місцевої сировинної бази. Та попри усталеність технологічних підходів до виробництва, яка зумовлена тривалим періодом експлуатації пічного обладнання, складністю та дороговизною технічного переобладнання, перехід на менш енерговитратні суху та напівсуху технологію виробництва дає значні екологічні поліпшення та економічні переваги. Перед усім, перехід від мокрої технології до сухої вирішує проблему енергоємності виробничого процесу: від 5450 до 6800 КДж на тону виготовленого цементу і від 2700 до 3700 КДж на тону при сухій технології. Внаслідок зниження частки енергоносіїв у структурі матеріальних витрат, зменшується і кількість викидів вуглекислого газу та інших шкідливих сполук, середній рівень пічних газів стає нижче на 30-40% у порівнянні з мокрою технологією [15, с. 23]. Також при переході на суху технологію значно знижується виробниче споживання води. Оскільки вартість енергоносіїв складає інколи до 50% собівартості продукції, вирішення проблеми надмірного енергоспоживання через впровадження екологічних інновацій у виробничий процес перетворюється у екзистенційну необхідність для цементних виробників з метою збереження своїх ринкових позицій та досягнення відповідності умовам конкурентної боротьби.

Загалом мокра технологія виробництва вважається застарілою і у будь-якому випадку потребує заміни. Проте перехід на іншу технологію часто є складним та навіть суперечливим. До прикладу, при сухій технології виробництва рівень пилоутворення значно вищий, ніж при мокрій, а обжигові печі є складнішими у експлуатації, а також дуже чутливими до зміни хімічного складу сировини, що робить їх менш універсальними. Тому до питання модернізації треба підходити комплексно. Важливо розглянути і проміжні варіанти осучаснення виробництва, які можуть лімітувати негативний вплив існуючої технології та є менш затратними.

Заміна традиційних видів палива на альтернативні

Як вже було зазначено раніше, обрання спільною країн курсу на сталий розвиток стало причиною перегляну застарілих підходів до господарювання. Головним виразником змін у промисловому секторі, який є одним із найбільш енергоємних, а заміна традиційних видів палива, спалювання яких призводить до вивільнення великої кількості парникових газів. Згідно даних Європейської агенції навколишнього середовища (European Environment Agency) [5], серед країн ЄС відбувся зсув у структурі використовуваних паливних ресурсів. Країнами досягнуто значного зниження загального рівня використання натурального газу (в середньому вдвічі з 2004 по 2021 рік).

За даними Європейської Академії з вивчення цементу (European Cement Research Academy) [4], використання альтернативних видів палива для потреб цементної

індустрії у світовому розрізі в середньому складає 16%, з яких 6% припадають на спалювання біомаси. Решта 84% паливно-енергетичних ресурсів охоплюють усі традиційні види палива, які і раніше забезпечували енергетичні потреби цементного виробництва.

Що стосується країн ЄС, то для них характерне переважне використання твердого відновленого палива у якості альтернативного, а також змішаних промислових відходів та відпрацьованих шин. Частка відходів біомаси є трохи нижчою, ніж загалом у світі, і складає 5% [3, с. 9]. На рис. 2 зображено розподіл часток альтернативних видів палива у загальній структурі споживання цементними виробниками країн ЄС.

Загалом, середня часта заміщення традиційних видів палива на альтернативні є різною як за регіонами, так і за окремими підприємства. Виробники, які провели модернізацію усіх функціонуючих печей, досягають

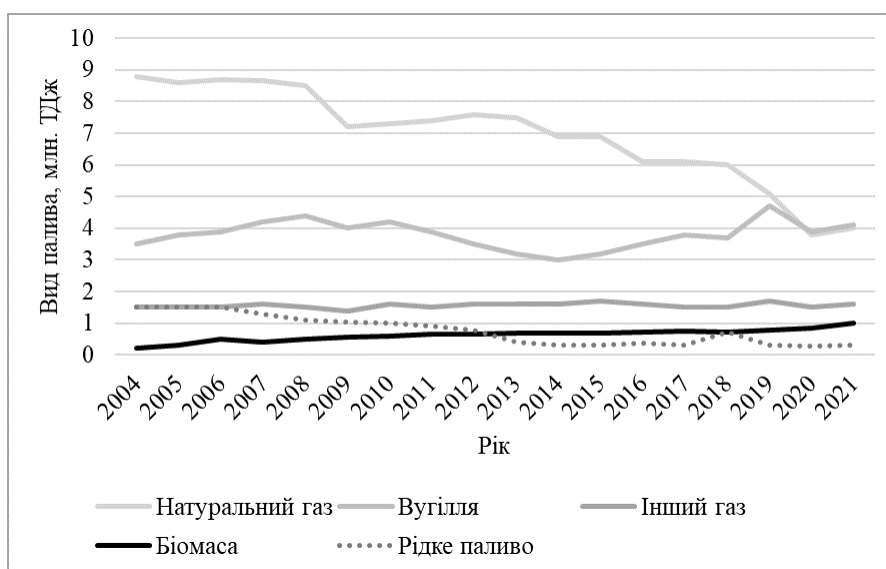


Рис. 1. Динаміка використання різних видів палива промисловими підприємствами країнами ЄС у 2004–2021 рр.

Джерело: побудовано на основі [5]

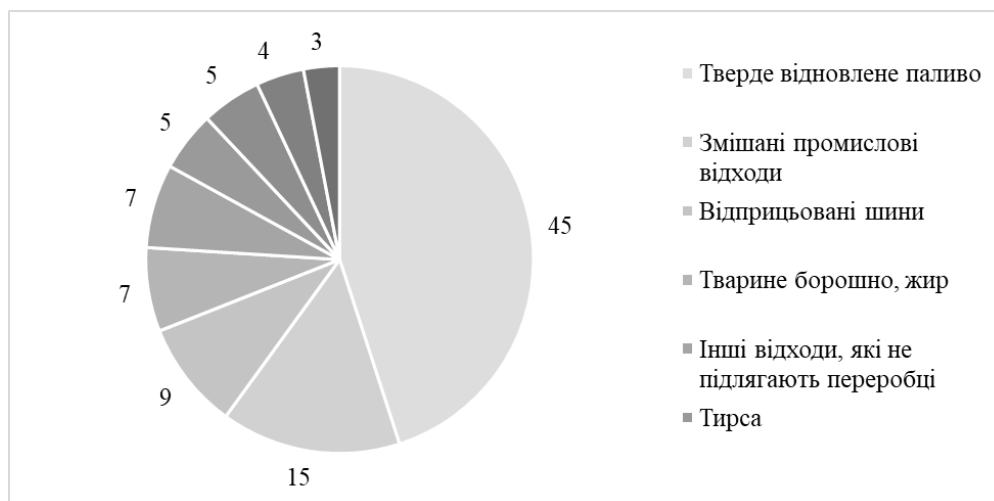


Рис. 2. Структура використання палива з вторинних відходів виробниками цементу країн ЄС у 2020 році, %

Джерело: складено на основі [3, с. 10]

рівня заміщення традиційного палива на альтернативні види до 30% та 17% при заміщенні на біомасу. Проте такі показники не є свідчення максимально допустимої норми заміщення. Деяким європейським виробникам вдалось знизити рівень використання традиційних видів палива до 40% для цементної галузі загалом, та навіть до рівня 5% для деяких окремих заводів [4, с. 15]. З огляду на те, що викиди CO₂, спричинені спалювання традиційного палива, складають приблизно третину у загальній структурі вуглецевого сліду, можливість заміщення такого виду палива більш декарбонізоване постає як надзвичайно важливе та перспективне для цементної індустрії. Окрім можливості уникнути генерувати надлишкові парникові гази такий підхід до модернізації дозволяє паралельно сприяти вирішенню проблеми накопичення, обробки та утилізації різних видів відходів, які у будь-якому випадку необхідно або спалювати, або залишати на полігонах, що також спричинює виникнення парникових газів.

Труднощі на шляху до заміщення традиційного палива на альтернативне пов'язані перш за все з неоднорідністю наявної паливної сировини, а також її обмеженою кількістю. Хімічний склад таких видів альтернативного палива, як доменний шлак, зола бурого вугілля, карбідний шлам, газобетонне борошно або залишки вапна від цукрової промисловості. Відмінність декарбонізованої фракції одного й того ж матеріалу обмежує його використання у великій кількості та у певній мірі здорожує виробничий процес. Використання альтернативної сировини ставить нові вимоги до тестування цієї сировини та визначення її придатності до використання у процесі виробництва клінкеру та сумісності з наявним виробничим обладнанням (відповідність вимогам до калорійності, відсутності зайвих домішок).

Співспалювання

Особливого значення та поширення у сучасних реаліях сміттевого накопичення набувають способи співспалювання різних видів сміття у якості альтернативного палива та традиційного палива, яке використовують у процесі виготовлення клінкеру. В середньому у країнах Євросоюзу кожний рік спалюється приблизно 7 млн т альтернативного палива на промислових установках. Серед європейських країн також значно поширене спалювання таких відходів як відпрацьовані шини, осади стічних вод. Окрім зниження рівня використання викопної сировини описаний підхід дозволяє знизити питомі витрати енергії на випал клінкеру та просунути вперед у вирішенні питання накопичення сміття. Опосередкований екологічний ефект також викликаний тим, що при накопиченні сміття на полігонах також виділяються парникові гази, а у випадку простого спалювання сміття також виникають витрати енергії та викиди забруднюючих речовин. Головними передумовами до впровадження співспалювання сміття у печах для випалу клінкеру є узяття курсу на обмеження практики захоронення сміття на полігонах та на організацію контрольованого збору та торгівлі відходами на рівні держави. Також вагомим аспектом у поширенні цього способу є погодження та прийняття практики спалювання сміття з боку громадськості. Безумовно, що з боку підприємства використання сміття

як палива ставить нові вимоги до технічного контролю за викидами забруднюючих речовин та заходів до їх уловлювання.

Українські суб'єкти підприємництва цементної галузі також підтримують світову тенденцію заміщення традиційного палива на альтернативне попри наявні технологічні та організаційні труднощі. Зокрема, ПрАТ «Кривий Ріг Цемент» розпочав перехід на використання лузги соняшника для забезпечення технологічного процесу просушування сировини. Керівництвом підприємством встановлено, що очікувані обсяги скорочення викидів парникових газів можуть досягати 30 тис. т на рік [11]. Також менеджмент підприємства планує впровадити використання RDF палива, тобто твердого відновленого палива з 2024 року.

Зниження клінкерного фактору

Сembureau визначає середнє значення клінкерного фактору серед європейських виробників цементу на рівні 80% та постулює амбітну екологічну мету для підприємств знизити цей показник до 70% [7]. Це може бути досягнуто декількома шляхами: заміщенням сировинних компонентів на відходи інших галузей, які мають цементуючі здатності; розробка сучасних видів цементу з новими характеристиками.

Заміщення сировинних компонентів на відходи інших галузей промисловості може бути багатоваріантним. Наприклад, технологи пропонують використовувати шлаки чорної та кольорової металургії. Це дозволить знизити частку алюмосилікатного компоненту або карбонатного компонентів до 20% у структурі сировинної суміші. Золошлакові відходи здатні замінити до 50% карбонатного компоненту у сировині і до 70% алюмосилікатного. Кооперація із металургійними підприємствами здатна забезпечити заміщення 100% золівмісного компоненту у сировинній суміші [15, с. 41]. На сьогодні увага вчених також присвячена дослідженню можливості використання кальцинованої глини та карбонізованої бетонної крошки, так як згідно до прогнозів обсяги відходів від вугільних електростанцій та доменних печей з часом будуть зменшуватись. Також відома успішна практика використання цементу з новими характеристиками.

Практика декарбонізації цементного виробництва через заміщення частини сировини з вуглецевою частиною на безвуглецеву активно застосовується на підприємстві ПрАТ «Кривий Ріг Цемент». У випадку підприємства у якості замітника використовується доменний шлак, частка заміщення є найвищою по країні та складає 20% від усієї сировинної суміші. Окрім цього, частину сировини замінюють відпрацьованим золошлаком від ТЕЦ, частка заміщення до 5%. Загалом таке заміщення дозволяє скорочувати викиди вуглекислого газу у пропорції 300-350 кг на 1 т заміщення сировини доменним шлаком [11].

Нові види цементу

Європейська асоціація цементу CEMBUREAU [10] визначає розробку сучасних низькоенергоємних цементів з пониженим клінкерним фактором (65-50% як одне із рішень проблеми енергоємності та високої інвазивності цементного виробництва у навколишнє природне середовище.¹ На сьогодні вітчизняні науковці

¹ The role of cement in the 2050 Low Carbon Economy. 2013. 64 p. URL: https://cembureau.eu/media/cpvoin5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneyconomy_2013-09-01.pdf (accessed January 22, 2024).

[12] займаються розробкою лужно-сульфатноактивованих композиційних цементів, в основу яких покладена ідея оптимізації гранулометричного складу головних компонентів та управління процесом раннього структуроутворення цементуючої сировини через вплив на перебіг хімічних реакцій. Також вітчизняні науковці [13] фокусують свою увагу на розробці клінкер-ефективних бетонів на базі оптимізованих високоякісних порландцементів марок СЕМ І 42,5R, СЕМ ІІ/А-S 42,5R, СЕМ ІІ/А-LL 42,5R, СЕМ ІІ/А-Р 42,5R виробництва ПрАТ «Івано-Франківськцемент» та створенні композиційного порландцементу з високою ранньою міцністю. На ПрАТ «Кривий Ріг Цемент» працівники теж займається розробкою нового жаростійкого бетону у склад якого входять шлаки феросплавних виробництв.

Використання перших двох способів, а саме скорочення енергоспоживання та підвищення клінкер-ефективності цементів з метою оптимізації екологічного навантаження вважаються вже традиційним для галузі та активно використовується останні десятиріччя, що стосується заходів, пов'язаних із використанням альтернативних видів палива та уловлювання вуглецю – то вони дозволять скоротити негативний вплив у випадку, коли внесення змін до технологічної складової виробництва більше не дозволяє це робити.

Технологія уловлювання вуглецю

Технологія уловлювання вуглецю (ТУВ) унікальна тим, що не змінюючи технологічний процес виготовлення цементу дозволяє подолати усталені норми викидів та значно знизити їх. Для виробництва цементу таке рішення дасть змогу скоротити викиди вуглекислого газу попри технологічно передбачені норми забруднення. Попри свою вартість ця технологія постає як один з тих кроків, які промислові підприємства будуть вимушені здійснити на шляху зниження свого вуглецевого сліду у недалекому майбутньому. Чим більшою буде вартість викидів вуглецевих одиниць, тим швидше активізується впровадження ТУВ на підприємствах. На

сьогодні вартість уловлювання вуглекислого газу складає від 40 до 120 дол. США за 1 с. CO₂. Вартість транспортування акумульованих сполук є варіативною та залежить від об'ємів газу, відстані для транспортування та умов зберігання. Досвід США показує, що вартість транспортування наземними трубопроводами складає від 2 до 14 дол. США. Вартість зберігання тони CO₂ починається з 10 дол. США та є неоднаковою у різних регіонах [1]. Окрім цього, експерти прогнозують поступове зниження вартості імплементації ТУВ по мірі збільшення досвіду комерціалізації цієї технології.

Висновки. Дослідивши основні напрями негативного впливу процесу виробництва цементу на навколишнє природне середовище в світі та в Україні, було визначено пріоритетні завдання та технологічні заходи, які дозволять досягти зниження рівня антропогенного тиску цементної промисловості на довкілля. Враховуючи те, що виробництво цементу є надзвичайно енергоємним процесом, який зумовлює утворення значної кількості парникових газів та інших небезпечних речовин, запропоновано звернути увагу суб'єктів підприємства галузі на технологічні заходи, пов'язані зі зниженням енергоємності продукції через перехід на сучасні технології виробництва. Також підкреслено важливість зниження рівня клінкерного фактору у складі цементу через заміщення частини сировини на дербонізовану сировину. Запропоновано у якості інструменту лімітування обсягів викидів CO₂-еквіваленту використовувати альтернативні види палива з нижчими питомими викидами двоокису вуглецю чи ті, які вже пройшли фазу декарбонізації та на які вже було витрачено енергію. У якості сучасного інноваційного рішення по зниженню вуглецевого сліду цементного виробництва запропоновувати застосовувати ТУВ. Розроблені рекомендації базуються на сучасних досягненнях науки, мають практичну цінність та можуть бути використані керівництвом вітчизняних підприємств цементної галузі.

Список використаних джерел:

1. Baylin-Stern A., Berghout N. Is carbon capture too expensive? IEA. URL: https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive?utm_content=buffercd81&utm_medium=social&utm_source=linkedin.com&utm_campaign=buffer (дата звернення: 22.01.2024).
2. Cembureau Activity Report. 52 p. URL: <https://cembureau.eu/media/1sjf4sk4/cembureau-activity-report-2020.pdf>
3. Cembureau Key Facts & Figures. 2023. 12 p. URL: <https://cembureau.eu/media/lfqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf> (дата звернення: 22.01.2024).
4. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. Duesseldorf, Geneva : CSI/ECRA Technology Papers, 2017. 190 p. URL: https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
5. Emissions and energy use in large combustion plants in Europe. European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-and-energy-use-in?activeAccordion=309c5ef9-de09-4759-bc02-802370dfa366> (дата звернення: 22.01.2024).
6. Krivileva S., Vlasenko V., Tsvirkun D. Industrial dust control in cement production as a factor in significantly reducing the negative impact of cement plants on the environment. *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series : New solutions in modern technologies*. 2019. No. 5(1330). P. 124–131. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.16> (дата звернення: 22.01.2024).
7. Lower clinker cements. URL: <https://www.cembureau.eu/innovation/lower-clinker-cements/> (дата звернення: 22.01.2024).
8. Pathway to a Low-Carbon Economy. URL: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/cost%20curve%20pdfs/pathways_lowcarbon_economy_version2.ashx (дата звернення: 22.01.2024).
9. Schneider M. Innovation and technical trends in cement production. *Internationale Baustofftagung*, Weimar. 2018. P. 75–80.
10. The role of cement in the 2050 Low Carbon Economy. 2013. 64 p. URL: https://cembureau.eu/media/cpvoins5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneyconomy_2013-09-01.pdf (дата звернення: 22.01.2024).
11. Головчук Ю. ПрАТ «Кривий Ріг Цемент»: потенціал сталого розвитку. *ECOBUSINESS. Екологія підприємства*. 2021. № 3. URL: <https://e.ecolog-ua.com/ekolohiya-pidpryemstva-2021-3/prat-kryvyy-rih-tsement-potentsial-stalohozvytku> (дата звернення: 22.01.2024).

12. Кропивницька Т. Концепція ефективних наномодифікованих лужноактивних композиційних цементів із високою ранньою міцністю. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2019. № 912. С. 99–107. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/46664> (дата звернення: 22.01.2024).

13. Саницкий М. та ін. Модифіковані швидкоотверднучі клінкер-ефективні бетони. *Будівельні матеріали та виробн.* 2019. № 1-2(101). С. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2020-101-04> (дата звернення: 22.01.2024).

14. ООН закликає будувати екологічно чисті міста. Responsible future. URL: <https://responsiblefuture.com.ua/oon-zaklikaie-buduvati-ekologichno-chisti-mista/>

15. Плашихін С. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. Київ : Центр ресурсоефект. та чистого виробництва, 2020. 96 с.

References:

1. Baylin-Stern A., Berghout N. Is carbon capture too expensive? IEA. Available at: https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive?utm_content=bufferccd81&utm_medium=social&utm_source=linkedin.com&utm_campaign=buffer (accessed January 22, 2024).

2. Cembureau Activity Report. 52 p. Available at: <https://cembureau.eu/media/1sjf4sk4/cembureau-activity-report-2020.pdf>

3. Cembureau Key Facts & Figures (2023). 12 p. Available at: <https://cembureau.eu/media/1fqjyve5/key-facts-figures-2021.pdf> (accessed January 22, 2024).

4. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. Duesseldorf, Geneva: CSI/ECRA Technology Papers (2017). 190 p. Available at: https://ecra-online.org/fileadmin/redaktion/files/pdf/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf

5. Emissions and energy use in large combustion plants in Europe. European Environment Agency. Available at: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/emissions-and-energy-use-in?activeAccordion=309c5ef9-de09-4759-bc02-802370dfa366> (accessed January 22, 2024).

6. Krivileva S., Vlasenko V., Tsvirkun D. (2019) Industrial dust control in cement production as a factor in significantly reducing the negative impact of cement plants on the environment. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, no. 5(1330), pp. 124–131. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.05.16> (accessed January 22, 2024).

7. Lower clinker cements. Available at: <https://www.cembureau.eu/innovation/lower-clinker-cements/> (accessed January 22, 2024).

8. Pathway to a Low-Carbon Economy. Available at: https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/cost%20curve%20pdfs/pathways_lowcarbon_economy_version2.ashx (accessed January 22, 2024).

9. Schneider M. (2018) *Innovation and technical trends in cement production*. Internationale Baustofftagung, Weimar, pp. 75–80.

10. The role of cement in the 2050 Low Carbon Economy (2013). 64 p. Available at: https://cembureau.eu/media/cpvoins5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneyconomy_2013-09-01.pdf (accessed January 22, 2024).

11. Holovchuk Yu. (2021) PrAT "Kryvyi Rih Tsement": potentsial staloho rozvytku. ECOBUSINESS. *Ekolohiia pidpryyemstva*, no. 3. Available at: <https://e.ecolog-ua.com/ekolohiia-pidpryyemstva-2021-3/prat-kryvyi-rih-tsement-potentsial-staloho-rozvytku> (accessed January 22, 2024).

12. Kropyvnytska T. (2019) Kontseptsiiia efektyvnykh nanomodyfikovanykh luzhnoaktyvnykh kompozytsiinykh tsementiv iz vysokoiu rannoio miitsnistiu. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika"*, no. 12, pp. 99–107. Available at: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/46664> (accessed January 22, 2024).

13. Sanytskyi M. та ін. (2019) Modyfikovani shvydkotverdnuchi klinker-efektyvni betony. *Budivelni materialy ta vyrobny*, no. 1-2(101), pp. 24–28. DOI: <https://doi.org/10.48076/2413-9890.2020-101-04> (accessed January 22, 2024).

14. ООН zaklykaie buduvaty ekolohichno chysti mista. Responsible future. Available at: <https://responsiblefuture.com.ua/oon-zaklykaie-buduvaty-ekolohichno-chysti-mista/>

15. Plashykhin S. (2020) *Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnystva*. Kyiv: Tsentr resursoefekt. ta chystoho vyrobnystva, 96 p.