

УДК 691.32

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.90.1195

МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ В АТМОСФЕРУ БУДІВЕЛЬНОЮ ГАЛУЗЗЮ

НІКІФОРОВА Т. Д.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
ФЕДІН В. А.², *здоб.*

^{1*} Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: t.d.nikiforova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

² Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: v.a.fedin@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8829-7520

Анотація. У статті висвітлено актуальні проблеми екологічного впливу будівельної галузі на довкілля, з особливим акцентом на процес виробництва цементу як одного з найбільш енергоємних і забруднюючих серед усіх галузей промисловості. Зазначено, що виробництво цементу є джерелом близько 8 % глобальних антропогенних викидів вуглекислого газу (CO₂), що пов'язано насамперед із процесом термічного розкладання карбонатів у виробництві клінкеру – основного компоненту цементу. Через значні обсяги виробництва і постійне зростання попиту на будівельні матеріали, негативний вплив на довкілля набуває сталого та невідворотного характеру в довгостроковій перспективі. У статті досліджуються основні джерела забруднення та пропонуються шляхи їхнього зменшення. Особливу увагу приділено пошуку ефективних і екологічно безпечних технологічних рішень, зокрема зменшенню співвідношення клінкеру до цементу, застосуванню альтернативних в'язучих матеріалів, а також впровадженню екологічних заповнювачів у склади бетонних композитів. Розглянуто можливість використання промислових відходів, таких як шлаки, летка зола, пуцолани та інші вторинні матеріали, здатні замінити традиційні компоненти цементу та бетону без втрати їх технічних характеристик.

Мета статті – полягає у всебічному аналізі можливостей та перспектив зниження рівня викидів діоксиду вуглецю (CO₂) в атмосферу в процесі виробництва цементу та бетонних композитів шляхом упровадження екологічно доцільних інноваційних рішень. Зокрема, дослідження зосереджене на оцінці ефективності використання альтернативних екологічних матеріалів як заповнювачів у бетонних сумішах, а також на вивченні їх впливу на технологічні характеристики. Метою є визначення таких матеріалів і технологій, що не лише сприяють зменшенню вуглецевого сліду, але й забезпечують відповідність сучасним технічним вимогам і стандартам будівництва. Окрему увагу приділено розробці практичних рекомендацій щодо заміщення традиційних компонентів на більш екологічно безпечні аналоги, що дозволяє інтегрувати принципи сталого розвитку у виробничі процеси будівельної індустрії. **Висновок.** Розглянуто та проаналізовано екологічні аспекти та технічні можливості зниження викидів CO₂ у процесі виробництва цементу й бетону шляхом використання альтернативних матеріалів та інноваційних підходів. Основними методами зменшення вуглецевого сліду є зниження коефіцієнта клінкеру до цементу, застосування альтернативних в'язучих матеріалів, а також використання екологічних заповнювачів.

Ключові слова: бетон; екобетон; вуглецевий слід; деревина; екологічні заповнювачі для бетонів

OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR REDUCING CO₂ EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE BY THE CONSTRUCTION INDUSTRY

NIKIFOROVA T. D.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
FEDIN V. A.², *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: t.d.nikiforova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

² Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: v.a.fedin@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8829-7520

Abstract. The article highlights pressing environmental issues associated with the construction industry, with a particular emphasis on cement production, which is among the most energy-intensive and polluting sectors of all industrial

activities. It is noted that cement manufacturing accounts for approximately 8 % of global anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions, primarily due to the thermal decomposition of carbonates during the production of clinker – the key component of cement. Given the high production volumes and the continuous growth in demand for construction materials, the environmental impact has become persistent and irreversible in the long term. The study investigates the main sources of pollution and proposes strategies for their mitigation. Special attention is given to the search for efficient and environmentally sound technological solutions, including reducing the clinker-to-cement ratio, utilizing alternative binders, and incorporating ecological aggregates into concrete composites. The possibility of using industrial by-products such as slags, fly ash, pozzolans, and other secondary materials is considered, as these can replace conventional components of cement and concrete without compromising technical performance. **The purpose of the article.** Comprehensive analysis of the possibilities and prospects for reducing carbon dioxide (CO₂) emissions in the production of cement and concrete composites through the implementation of environmentally sustainable innovative solutions. In particular, the research focuses on assessing the effectiveness of alternative ecological materials used as aggregates in concrete mixtures and evaluating their influence on technological properties. The objective is to identify materials and technologies that not only contribute to a lower carbon footprint but also meet contemporary technical requirements and construction standards. Special consideration is given to the development of practical recommendations for replacing traditional components with more environmentally friendly alternatives, enabling the integration of sustainable development principles into the manufacturing processes of the construction industry. **Conclusion.** The environmental aspects and technical possibilities of reducing CO₂ emissions in the cement and concrete production process through the use of alternative materials and innovative approaches are considered. The main methods of reducing the carbon footprint are reducing the clinker to cement ratio, using alternative binders, and using environmentally friendly aggregates.

Keywords: concrete; eco-concrete; carbon footprint; wood; ecological aggregates for concrete

Актуальність. Будівельна галузь є ресурсо- та енергоємною. Вона споживає понад 50 % усієї видобутої сировини у світі, генерує 25–33 % відходів у ЄС, викидає найвищий рівень вуглецю серед усіх галузей та відповідає за 40 % світового енергоспоживання в будівлях [1].

Викиди вуглекислого газу антропогенного походження в основному формуються з трьох джерел: спалювання викопного палива, змін екосистеми в наслідок людської діяльності, таких як вирубка лісів, та розкладання карбонатів. Найбільшим джерелом викидів від розкладу карбонатів є виробництво цементу, який з давніх часів служить важливим будівельним матеріалом. Проте різке зростання виробництва цементу почалося після другої світової війни. Сьогодні обсяги його виробництва сягають понад пів тонни на одну людину щорічно. З 1950 року обсяг виробництва цементу зріс більше ніж у 30 разів, а з 1990 року – майже в 4 рази. Це зростання значно випереджає збільшення виробництва викопного палива за останні 20 років. Основним джерелом цього явища є Китай, де виробництво цементу зросло в 11 разів із 1990 року, на що припадає 74 % світового приросту у цій галузі.

Іншим вагомим джерелом викидів CO₂ є споживання викопного палива для

виробництва цементу. Під час нагрівання сировини необхідно досягти температури понад 1 000 °C при спалюванні палива. Енергетичні викиди, зокрема від використання електроенергії, можуть збільшити технологічні викиди до 60 %. Таким чином, загальний внесок цементної промисловості у світові викиди CO₂ може досягати 8 %. Ці викиди, пов'язані з промисловими процесами та енерговитратами, часто враховуються окремо у світових звітах про викиди.

TheGlobalCarbon Project щорічно надає дані щодо викидів CO₂, спричинених використанням викопного палива та виробництвом цементу. Ці оцінки широко застосовуються для формування Global Carbon Budget. Точність таких оцінок є критично важливою, оскільки вони охоплюють усі викиди CO₂, включаючи ті, що виникають у рамках промислових процесів. Завдяки цьому дані щодо викидів від цементної промисловості є складовою частиною глобального аналізу, забезпечуючи повноту охоплення основних джерел вуглецевих викидів [2].

Постановка проблеми. Оскільки будівельна галузь є одним з найінтенсивніших джерел викидів CO₂ через використання цементу або його похідного композиту – залізобетону, однією з головних

проблем галузі на ряду зі зниженням енергоємності та ресурсоємності будівельних матеріалів, виробів та конструкцій є екологічність самих матеріалів або конструкцій при забезпеченні необхідних фізико-механічних властивостей матеріалів і характеристик конструкцій. Екологічність будівельних конструкцій може досягатись такими методами, як підвищення позитивних екологічних характеристик, або покращенням експлуатаційних характеристик, таких як збільшення експлуатаційного терміну при аналогічних викидах CO₂ при виготовленні елементів конструкцій.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає у аналізі можливостей та перспектив скорочення викидів CO₂ у атмосферу. Основні напрями дослідження направлені на використання на пошук альтернативних екологічних матеріалів у якості заповнювачів та аналізі результатів використання останніх.

Результати дослідження. Під час виготовлення елементів конструкцій з бетону, а саме з моменту початку полімеризації проходить хімічна екзотермічна реакція, яка бере участь у виробництві основного компонента цементу, клінкеру, оскільки карбонати (переважно CaCO₃, що входять до складу вапняку) розкладаються на оксиди (переважно вапно – CaO) і CO₂. Ці викиди (E) можна розрахувати наступним чином [3]:

$$E = \frac{M_r^{CO_2}}{M_r^{CaO}} \cdot f_{clink}^{CaO} \cdot f_{cem}^{clink} \cdot M_{cem}, \quad (1)$$

$M_r^{CO_2}$ – молекулярна маса CO₂; M_r^{CaO} – молекулярна маса CaO; f_{clink}^{CaO} – частка CaO в клінкері; f_{cem}^{clink} – частка клінкеру в цементі («клінкерне співвідношення»); M_{cem} – маса цементу.

Формулу (1) можна використовувати при використанні наступних методів зниження CO₂ при виготовленні цементів:

- зниження співвідношення клінкеру до цементу;
- альтернативні в'язучі матеріали.

Зменшення коефіцієнта клінкеру є одним із найефективніших способів

скоротити викиди CO₂ під час виробництва цементу, оскільки цей коефіцієнт впливає як на викиди CO₂ від виготовлення сировини, так і від спалювання палива. У 2014 році середній світовий коефіцієнт клінкеру становив 0,65. У Китаї цей показник також був на рівні 0,65 у 2018 році [4], зокрема завдяки використанню золи та шлаку. У Німеччині у 2017 році коефіцієнт клінкеру становив 0,71, а середній показник по Європі у 2016 році досягав 0,74. Окремі країни, такі як Ірландія та Данія, мали коефіцієнти близько 0,90, тоді як Нідерланди досягли значення приблизно 0,46. Незважаючи на те, що зменшення коефіцієнта клінкеру є бажаним і технічно здійсненним, доступність відповідних матеріалів-замінників може обмежувати його впровадження в окремих регіонах. Водночас важливо забезпечити ефективність використання цементу в бетоні з урахуванням його призначення та впливу на довкілля [11].

Найбільш поширеними в'язучими для виготовлення цементу є:

- мелений гранульований доменний шлак (GGBFS);
- зола винесення;
- пуцолани натуральні;
- вапняк.

Гранульований доменний шлак (GGBFS) є побічним продуктом виробництва чавуну — основної сировини для сталеплавильного виробництва. Завдяки швидкому охолодженню при виході з доменної печі, GGBFS має понад 90 % аморфної структури, а його основний (лужний) характер зумовлює латентну гідравлічну активність. Цементи з вмістом GGBFS демонструють відмінні характеристики в бетоні, зокрема покращену довговічність у деяких аспектах. Так звані шлакові цементи застосовуються з початку індустріального виробництва цементу, тобто ще з XIX століття.

Прогнозування глобальної доступності GGBFS є складним завданням, однак Міжнародне енергетичне агентство (IEA) розробило відповідний сценарій [5].

Довгострокова доступність GGBFS пов'язана з подальшим підвищенням

енергоефективності та ресурсоефективності у сталеливарному секторі, особливо через збільшення використання металобрухту в електродугових печах. Водночас, оскільки обсяги доступного брухту обмежені, значні кількості чавуну й надалі вироблятимуться з залізної руди – в тому числі й після 2020 року – що забезпечуватиме відповідні обсяги GGBFS у глобальному масштабі [5]. Проте обмежена регіональна наявність цього матеріалу може ускладнити його закупівлю виробниками цементу.

Золи винесення отримують шляхом електростатичного або механічного осадження пилоподібних частинок із димових газів, що утворюються при спалюванні вугілля у подрібненому стані. Її мінералогічний склад може бути кремнеземистим або вапняковим, залежно від типу вугілля, що використовується. Основними компонентами золи винесення є SiO_2 та Al_2O_3 , а у випадку вапнякових – також CaO . Найчастіше використовуються кремнеземиста зола винесення, яка має пуцоланові властивості й додається до цементу. Це покращує реологічні властивості бетонної суміші, сприяє довготривалому наростанню міцності та підвищенню довговічності бетону завдяки ущільненій структурі.

За винятком деяких випадків, вміст золи винесення у цементах технічного призначення зазвичай обмежується межами 25–35 %. Враховуючи референтне значення клінкерного фактору 0,75, збільшення вмісту золи до цього рівня дозволяє знизити прямі викиди CO_2 від виробництва цементу до 90 кг CO_2 на 1 тону цементу [6].

Довгострокова доступність золи винесення у світі значною мірою залежить від кількості вугільних електростанцій, чисельність яких, як очікується, буде зменшуватися через зростаючу частку відновлюваних джерел енергії. Проте дослідження, проведене Boston Consulting Group у 2018 році [7], підкреслює, що економічний розвиток країн Азії зумовить зростання попиту на енергію, а отже – й на вугілля, що сприятиме відносно стабільному виробництву золи винесення у найближчі

роки. Натомість у Європі нормативне обмеження використання вугілля поступово ускладнює доступ до цього виду вторинної сировини.

Природні пуцолани зазвичай формуються з матеріалів вулканічного походження або осадових порід, які мають відповідний хімічний та мінералогічний склад. Вони складаються переважно з аморфних або слабо кристалізованих кремнеземистих сполук, які трапляються лише в певних регіонах. У присутності води за звичайної температури такі матеріали вступають у реакцію з розчиненим гідроксидом кальцію, утворюючи фази C–A–S–H (Calcium Aluminate Silicate Hydrates – гідрати алюмінату силікату кальцію). Реакційна активність пуцоланів залежить від вмісту активного кремнезему та глинозему. Перед використанням вони потребують обробки, яка включає дроблення, сушіння та подрібнення. Їх додавання також може сприяти зниженню енергозатрат під час помелу цементу.

Глобальні геологічні запаси глини є значними, однак на даний момент лише декілька країн використовують кальциновані глини у виробництві цементу. На відміну від золи винесення або гранульованого доменного шлаку (GGBFS), кальциновані глини не є побічним продуктом і потребують наявності відповідної виробничої інфраструктури. Дослідження показали, що за умов термічної активації навіть малопридатних каолінових глини можна отримати гідний матеріал [8]. Очікується, що частка таких глини у складі цементу зростатиме в регіонах, де відсутній доступ до інших альтернативних мінеральних домішок (SCM), а в довгостроковій перспективі – і в глобальному масштабі, коли доступ до золи й шлаку стане все більш обмеженим.

Трикомпонентна суміш, що складається з клінкеру, глини та вапняку, дозволяє досягати більш високого рівня заміщення клінкеру. При клінкерному факторі 50 % такі цементи здатні забезпечити рівень міцності, співставний із портландцементом (OPC) [9]. Дослідження показали, що цементи з кальцинованими глинами мають високу

довговічність – навіть за умов сильного морозного впливу бетон на їх основі проявляє добру експлуатаційну надійність [10].

Показником якості кальцинованої глини є вміст реакційно-здатного діоксиду кремнію, мінімальний рівень якого, згідно з європейським стандартом EN 197-1, має становити не менше 25 %. Загальне зменшення викидів CO₂ у цементах, що містять кальциновані глини та вапняк як SCM (Supplementary Cementitious Materials), у порівнянні з іншими типами композитних цементів, залежать від якості глин, зокрема залишкового вмісту карбонату кальцію, необхідної енергії для термічної активації та, меншою мірою, електроенергії, потрібної для подрібнення. Кальциновані глини мають значний потенціал для заміщення клінкеру в регіонах світу, де бракує інших альтернативних SCM, за умови наявності придатних локальних глин.

Вапняк доступний практично в необмеженій кількості, і його можна просто подрібнити. Зазвичай він легкодоступний для більшості цементних заводів, і при додаванні до цементу він покращує технологічність відповідних бетонів, як правило, завдяки меншій потребі у воді відповідного цементу. Невелика частина вапняку реагує з алюмінатами цементу, утворюючи додаткові карбоалюмінати. Рівні заміни навіть до 50 % можливі, але вимагають ретельного розгляду аспектів довговічності в контексті впливу бетону на навколишнє середовище [11].

На сьогоднішній день не зважаючи на беззаперечне лідерство портландцементного клінкеру серед в'язучих матеріалів, активно розробляються та впроваджуються екологічні альтернативи, покликані зменшити вплив будівельної галузі на зовнішнє середовище.

Белітовий клінкер – містить невелику кількість аліту, але вміст беліту сягає від 40 % до 90 %. Виготовлення даного клінкеру супроводжується меншим викидом CO₂, і в порівнянні зі звичайним портландцементним клінкером, виробництво беліту зменшено на 6–8 %, але через механічні властивості беліту

подрібнення потребує додаткових потужностей для приведення його у стан готовий до виготовлення конструкцій. Белітові цементи мають низьке виділення теплоти під час реакції гідратації, отже набір міцності (механічних властивостей) бетону відбувається повільніше.

Цементи з сульфоалюмінатів демонструють властивості швидкого схоплювання та високу швидкість набуття механічних властивостей. Виготовлення таких цементів порівняно з ординарними портландцементами призводить до зменшення викидів CO₂ на 20–30 % [12], але використання рідкісного мінералу яліміту Ca₄(AlO₂)₆SO₃, який є в основі сульфоалюмінатного клінкеру призводить до надлишкових витрат виробництва при виготовленні сульфоалюмінатного клінкеру і не раціонально з економічної точки зору.

На сьогодні впровадження альтернативних в'язучих матеріалів на ринку значно ускладнюється через високі витрати на сировину, необхідність значних інвестицій і часто обмежену сферу їхнього застосування. У порівнянні зі світовим попитом на цемент, нові в'язучі, швидше за все, залишаться в межах нішевих сегментів ринку. Водночас, збільшення фінансування дослідницьких і демонстраційних проєктів, а також активізація процесу стандартизації можуть стати рушійною силою для впровадження або тестування перспективних матеріалів. Це дозволить оцінити їхній реальний вплив на загальні викиди CO₂ і визначити ефективність у довгостроковій перспективі.

Враховуючи економічну складову при виготовленні альтернатив портландцементного клінкеру можна розглянути використання замість звичайного щебню альтернативних екологічних матеріалів у якості заповнювачів, або заповнювачів із відновлювальних ресурсів. Такі заповнювачі впливають на екологічні показники бетонів:

- підвищення раціональності використання корисних копалин;
- зменшення викидів CO₂ при обробці матеріалів у стан, готовий до використання у бетонах.

Як приклад, у якості екологічного заповнювача можуть виступати деревина або відходи на основі деревини.

Відходи з деревини утворюються під час різних промислових процесів, таких як виготовлення меблів, будівельні роботи та інші види діяльності, пов'язані з використанням деревини для виробництва продукції. Зазвичай ці відходи та залишки деревини застосовуються як паливо печей або електростанцій. За різними оцінками, щорічно у світі генерується приблизно 136 мільйонів тонн деревних відходів. Накопичення таких відходів створює серйозну екологічну проблему, оскільки завдає шкоди землі та прилеглим територіям. Рациональна утилізація цих відходів є актуальним питанням, яке викликає дедалі більше занепокоєння в деревообробній галузі.

Деревобетон є швидкою, економічно вигідною та екологічно дружньою альтернативою традиційним бетонним матеріалам. Його виготовлення базується на ущільненні дрібнозернистої бетонної суміші, що дозволяє створювати однорідний матеріал з високими експлуатаційними властивостями та правильною формою. Технологія виробництва деревобетону легко адаптується до індивідуальних потреб користувачів, завдяки регулюванню таких параметрів, як склад суміші, водоцементного співвідношення і типу обладнання. Така технологія особливо перспективна в регіонах із легким доступом до необхідної сировини. Основними компонентами деревобетону є цемент, дрібний заповнювач, великий заповнювач (зокрема відходи деревини та щебінь) і вода.

Використання переробленої деревини у експериментальних деревобетонних зразках при випробуваннях на стиск показали задовільні результати, при певних відсотках

заміни крупного заповнювача на відходи з деревини, а саме 15 %. При такій кількості переробленої деревини отримано +3,06 % до міцності на стиск. Також при випробуванні на розрив, зразки з аналогічним складом, а саме 15 %, отримано +9,75 % до міцності. При випробуванні на вогнестійкість, на контрольному зразку були відсутні фізичні зміни у бетоні через нагрівання. Однак, при збільшенні відсоткового змісту деревного заповнювача відбувались зміни в бетоні у вигляді зміни кольору бетону по мірі його нагріву з світло-коричневого до темно-коричневого, що свідчило про процеси горіння легкозаймистих частин деревобетону, а саме деревини. В якості проміжного висновку по вогнестійкості можна дійти висновку, що менший вміст деревинної складової забезпечує вищу базову вогнестійкість у порівнянні з бетонами з більшим відсотковим вмістом деревинного заповнювача [13]. Таким чином, технологія виготовлення екологічних бетонів при використанні деревини або відходів на основі деревини для бетонного композиту є перспективним напрямом зменшення викидів CO₂, але з урахуванням особливих властивостей деревини та вирішенні проблемних питань використання останньої.

Висновки

Розглянуто екологічні аспекти та технічні можливості зниження викидів CO₂ у процесі виробництва цементу й бетону шляхом використання альтернативних екологічних матеріалів та інноваційних підходів. Основними методами зменшення вуглецевого сліду є зниження коефіцієнта клінкеру до цементу, застосування альтернативних в'язучих матеріалів, а також використання екологічних заповнювачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ruuska A., Häkkinen T. Material Efficiency of Building Construction. *Buildings*. 2014. Vol. 4 (3). Pp. 266–294. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings4030266>
2. Andrew R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *ESSD*. 2019. Vol. 11. Pp. 1675–1710. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
3. Boden T. A., Marland G., Andres R. J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, 2017. URL: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview_2014
4. Junxiao W., Kuang C., Yuanbo G. Evaluation and mitigation of cement CO₂ emissions : projection of emission scenarios toward 2030 in China and proposal of the roadmap to a low-carbon world by 2050. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2019. Vol. 24. Pp. 301–328.
5. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017 : Energy Technology Perspectives 2017. Excerpt Informing Energy Sector Transformations. *International Energy Agency, IEA*. Paris, 2017. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/580c0f94-0db8-4dc8-9947-66720737cb3a/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>
6. European Cement Research Academy. Development of State of the Art-techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. *European Cement Research Academy, ECRA*. Düsseldorf, 2017. URL: https://docs.wbcsd.org/2017/06/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
7. Brognaux C., Boudier E., Möncks T., Gerecs M. Why Coal Will Be Burning. Boston Consulting Group. 2018. URL: https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Why-Coal-Will-Keep-Burning-Mar-2018_rev_tcm9-187875.pdf
8. Schulze S., Pierkes R., Rickert J. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials. *Calcined Clays for Sustainable Concrete : Conference Paper*. 2015. Pp. 59–66. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_8
9. Favier A., De Wolf C., Scrivener K., Habert G. A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry. *ETH Zürich*, 2018. P. 96. URL: https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2018/10/AB_SP_Decarbonisation_report.pdf
10. Pierkes R., Schulze S. E., Rickert J. Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements. *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. 2018. Vol. 16. Pp. 366–371. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_59
11. Schneider M. The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124. P. 105792. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
12. Ulrich N., Frank D., Michael H., Julian L. Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen. *Karlsruher Institut für Technologie*. 2018. Vol. 7. P. 94.
13. Thandavamoorthy T. S. Wood waste as coarse aggregate in the production of concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016. Vol. 20 (2). Pp. 125–141. URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1016631>

REFERENCES

1. Ruuska A. and Häkkinen T. Material Efficiency of Building Construction. *Buildings*. 2014, vol. 4 (3), pp. 266–294. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings4030266>
2. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *ESSD*. 2019, vol. 11, pp. 1675–1710. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
3. Boden T.A., Marland G. and Andres R.J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, 2017. URL: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview_2014
4. Junxiao W., Kuang C. and Yuanbo G. Evaluation and mitigation of cement CO₂ emissions : projection of emission scenarios toward 2030 in China and proposal of the roadmap to a low-carbon world by 2050. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2019, vol. 24, pp. 301–328.
5. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017 : Energy Technology Perspectives 2017. Excerpt Informing Energy Sector Transformations. *International Energy Agency, IEA*, Paris, 2017. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/580c0f94-0db8-4dc8-9947-66720737cb3a/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>
6. European Cement Research Academy. Development of State of the Art-techniques in Cement Manufacturing : Trying to Look Ahead. *European Cement Research Academy, ECRA*, Düsseldorf, 2017. URL: https://docs.wbcsd.org/2017/06/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
7. Brognaux C., Boudier E., Möncks T. and Gerecs M. Why Coal Will Be Burning. Boston Consulting Group. 2018. URL: https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Why-Coal-Will-Keep-Burning-Mar-2018_rev_tcm9-187875.pdf
8. Schulze S., Pierkes R. and Rickert J. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials. *Calcined Clays for Sustainable Concrete : conference paper*. 2015, pp. 59–66. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_8

9. Favier A., De Wolf C., Scrivener K. and Habert G. A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry, ETH Zürich, 2018, p. 96. URL: https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2018/10/AB_SP_Decarbonisation_report.pdf
10. Pierkes R., Schulze S.E. and Rickert J. Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements. Calcined Clays for Sustainable Concrete. 2018, vol. 16, pp. 366–371. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_59
11. Schneider M. The cement industry on the way to a low-carbon future. Cement and Concrete Research. 2019, vol. 124, p. 105792. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
12. Ulrich N., Frank D., Michael H. and Julian L. Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen. Karlsruher Institut für Technologie. 2018, vol. 7, p. 94. (in German).
13. Thandavamoorthy T.S. Wood waste as coarse aggregate in the production of concrete. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016, vol. 20 (2), pp. 125–141. URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1016631>

Надійшла до редакції: 02.08.2025.

УДК: 908(477):72/74

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.97.1196

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА НОВІ ПІДХОДИ В МЕМОРІАЛІЗАЦІЇ ПОДІЙ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ ЗАСОБАМИ АРХІТЕКТУРИ ТА ДИЗАЙНУ

РУСАНОВА І. В.¹, канд. архітектури, доц.,
ЗАХАРОВА С. О.², канд. філос. наук, доц.,
РИЖОВА І. С.³, д-р філос. наук, проф.,
ХАРЧЕНКО К. С.^{4*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра «Дизайн», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 856-37-02, e-mail: i.rusanova2018@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-8496-6109

² Кафедра «Дизайн», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 283-17-87, e-mail: arconzp@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-6952-2558

³ Кафедра «Дизайн», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 688-21-34, e-mail: 17design2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9562-200X

⁴ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-93-37, e-mail: katerinaharchenko75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

Анотація. Постановка проблеми. Стаття базується на колективному дослідженні національної меморіальної практики увічнення подій російсько-української війни із залученням досвіду реалізації подібних меморіальних об'єктів зі світової практики. Меморіальні комплекси розглядаються в контексті історичної, культурної та колективної пам'яті. Стверджується важливість архітектурно-проектних засобів як художньої мови меморіалізації, здатної створювати не лише форму, а й надавати символи, викликати певні настрої та емоції. Висвітлюється роль меморіалів у формуванні національної ідентичності, суспільної свідомості народу. **Мета статті:** виявити сучасні тенденції та нові підходи у меморіалізації подій російсько-української війни засобами архітектури та дизайну на основі трансформації ідеологічних інституцій суспільства, формування його історичної та колективної пам'яті, національної ідентичності. Методологія: дослідження передбачає порівняння, аналіз та синтез світового та українського досвіду меморіалізації подій війни в історичному та когнітивному аспектах. **Висновок.** Реалізація ідей, задумів, концепцій та символів архітекторів та дизайнерів, як генераторів, провідної ланки в єдності багатьох фахівців, залучених до створення сучасних меморіалів, може стати ефективним інструментом для створення нової історичної ідентичності народу, що базується на матеріальному втіленні колективної пам'яті та національних традицій. Проведено аналіз художніх засобів архітектури та дизайну на трьох типах меморіалів з метою виявлення їх особливостей та реалізації в часі. Меморіали розглядаються в аспекті історичної, культурної та колективної пам'яті. Обґрунтовано роль меморіалів у формуванні української ідентичності та ідеологічних тенденцій суспільства. Практична значущість. Практична цінність цього дослідження полягає в його потенціалі для створення матеріальної складової нової національної ідентичності українського народу.