

## БЕТОН: ІСТОРІЯ ВИНИКНЕННЯ ТА ШЛЯХ ЙОГО ПРОГРЕСУ ЯК ПЕРЕДОВОГО БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Л. Баранович, магістр архітектури, аспірант

ORCID ID: 0000-0002-4521-311X

А. Баранович, магістр архітектури

ORCID ID: 0000-0001-5783-7897

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2024.25.078>

**Баранович Л., Баранович А. Бетон: історія виникнення та шлях його прогресу як передового будівельного матеріалу**

Ще на початках свого історичного шляху людина зрозуміла, що спорудження міцного, стійкого до зміни погодних умов і середовища укриття, здатне зберегти здоров'я та життя. Експериментуючи з різними доступними їй природними матеріалами, вона здобувала знання про їхні властивості та характеристики, які матеріали набували за тих чи інших умов, навчалася поєднувати їх між собою, створювати зовсім інші, відмінні від попередніх, будівельні матеріали і конструкції.

Із початком науково-технічного прогресу наприкінці XVIII ст. людина почала найактивніше працювати над створенням будівельного матеріалу, який би задовольняв темпи росту і розвитку цивілізації. Таким прогресивним матеріалом став бетон. Беручи свої витоки ще з давніх часів, він, у час активної індустріалізації, активно розвинувся завдяки невтомній праці різних науковців, які експериментували над рецептом, щоразу досягаючи дедалі нових і нових характеристик для цього будівельного матеріалу, компонуючи його з іншими матеріалами, наслідком чого стало значне збільшення міцності бетону як на стиск, так і на розтяг. З'явилися різні види бетонних сумішей, придатних для найрізноманітніших робіт, починаючи від будівельних і закінчуючи медициною.

Досліджено історичний шлях виникнення бетону, від найдавніших часів до сьогодення. Описано складові та мінералогічні добавки, які входили до бетонної суміші в різні періоди, й те, які фізичні характеристики мав бетон при затвердінні. Розглянуто вплив бетону на проектування споруд та їхню архітектуру, конструктивне вирішення тощо.

Прогресивним проривом стала поява залізобетону наприкінці XIX ст., що цілковито змінила принципи спорудження та підходи до конструювання будівель і споруд, піднявши їх на значно вищий рівень. Почали споруджувати будівлі та споруди із великими пролітністю, висотою та віконними прорізами.

**Ключові слова:** бетон, цемент, бетонна суміш, будівельні технології, будівельні матеріали, вапняк, пісок, гіпс, залізобетон, армування, конструкція, наукові дослідження, історія, міцність на стиск, модуль пружності.

### **Baranovych L., Baranovych A. The history of the emergence of concrete as a progressive building material**

At the outset of its historical journey, humanity recognized the necessity of building strong, weather-resistant, and durable shelters to preserve health and ensure survival. Through experimentation with various natural materials at their disposal, people gained insights into the properties and characteristics of those materials under different conditions. This knowledge allowed them to combine these materials, giving rise to new and distinct building materials and structures.

With the advent of scientific and technological advancements in the late 18th century, a more concerted effort emerged to develop a building material capable of keeping pace with the rapid growth and development of civilization. This innovative material became concrete. Although it has roots in ancient times, concrete underwent significant evolution during the era of industrialization, fueled by the dedicated efforts of various scientists who experimented with its composition to continuously enhance its characteristics. They integrated it with other materials, greatly improving its strength in both compression and tension. This led to the emergence of various types of concrete mixtures, suitable for diverse applications, ranging from construction to medicine.

This article traces the historical development of concrete, from ancient civilizations to modern times. It briefly outlines the components and mineral additives incorporated into concrete mixtures across different periods, as well as the physical properties exhibited by concrete upon hardening. Additionally, it explores the impact of concrete on structural design, architecture, and construction solutions.

A groundbreaking advancement occurred with the introduction of reinforced concrete at the end of the 19th century, fundamentally transforming construction principles and design approaches. This innovation enabled the construction of buildings and structures featuring large spans, considerable heights, and expansive window openings.

**Keywords:** concrete, cement, concrete mix, construction technologies, building materials, limestone, sand, gypsum, reinforced concrete, reinforcement, structure, scientific research, history, compressive strength, modulus of elasticity.

**Постановка проблеми.** Історичні споруди, з них уже стоять не одну сотню років. Секрети і технології зведення цих споруд турбують і

археологів, і архітекторів, і будівельників. Дослідивши і проаналізувавши склад будівельних матеріалів, з яких були зведені ці споруди, зокрема із бетону, ми зможемо покращити власні технології виготовлення бетонних сумішей, досягнути кращих характеристик міцності бетону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Сьогодні саме історичний шлях бетону та зміни у його складі протягом історичних періодів до наших днів майже не досліджували. Нечисленні публікації як українських, так і закордонних дослідників, ознайомлюють нас із загальними відомими даними. З-поміж українських науковців це питання вивчали Дорошенко О. Ю. та Дорошенко Ю. М. За кордоном еволюцію бетону досліджували А. Камосш, Р. М. Феррейра, Р. В. Стейгер.

**Постановка завдання.** Завдання нашого дослідження – з'ясувати історичний шлях еволюції складу бетонної та цементної суміші у різних кутках світу.

**Виклад основного матеріалу.** У ранніх цивілізаціях людина використовувала ті будівельні матеріали, які були легкодоступні у природі: камінь, дерево, глина, метали, шкіра, рослинні волокна. Із збільшенням потреб людини зросли і вимоги до будівельних матеріалів. Важливими характеристиками стали більша міцність, довговічність, кращий зовнішній вигляд. Це наштовхнуло на розвиток будівельних матеріалів.

Першим матеріалом, над яким людина свіdomo почала працювати, мабуть, була глина. Люди намагалися виготовити з м'якої податливої та формованої глини штучний стійкий камінь. Іншими матеріалами, які людина освоїла у ранні періоди, є гіпс та вапно, які мали зв'язувальні властивості.

Дослідники А. Камосш і Р. М. Феррейра стверджують, що «...між 9000 і 7000 роками до н. е. вапняк уже використовувався як матеріал для облицювання та підлоги і змішувався з каменем для утворення бетонних підлог. Розкопки на південному сході Галілеї, у місті Єрихон, показали наявність підлоги, виготовленої з матеріалу, схожого на бетон. У Вавилоні використовувались блоки глини та бітуму як зв'язуючий матеріал» [5, с. 1572]. Також учені-археологи виявили сліди раннього бетону в Сирії, які мають вік 6500 років до н. е.

У європейській частині світу, а саме на берегах Дунаю в Югославії, виявили ще одну форму раннього бетону, датовану 5600 роком до н. е. Її використовували для укладання підлог у хатах, на вапняковій основі. Як зазначає Р. В. Стейгер, цей матеріал окрім червоного вапняку, мав у своєму складі пісок, гравій та воду [6].

В Азії бетон уперше виявили на північному заході Китаю у провінції Ганьсу, близько 3000 роком до н. е. Стейгер описує його як матеріал «...зеленувато-чорного кольору, він використовувався для підлог та містив цемент, змішаний з піском, розбитим керамічним посудом, кістками та водою...» [6].

У 3600 роках до н. е. в Єгипті використовували примітивний бетон для виготовлення саманих блоків, в'язучим у яких була липка глина з ріки Ніл, згодом застосовували гіпс, а потім вапно (великий пірамідальний комплекс у Гізі). До наших днів збереглася фреска, на якій зображено застосування бетону єгиптянами (рис. 1). Вона датується 1950 роком до н. е. і виконана на стіні в м. Теба.

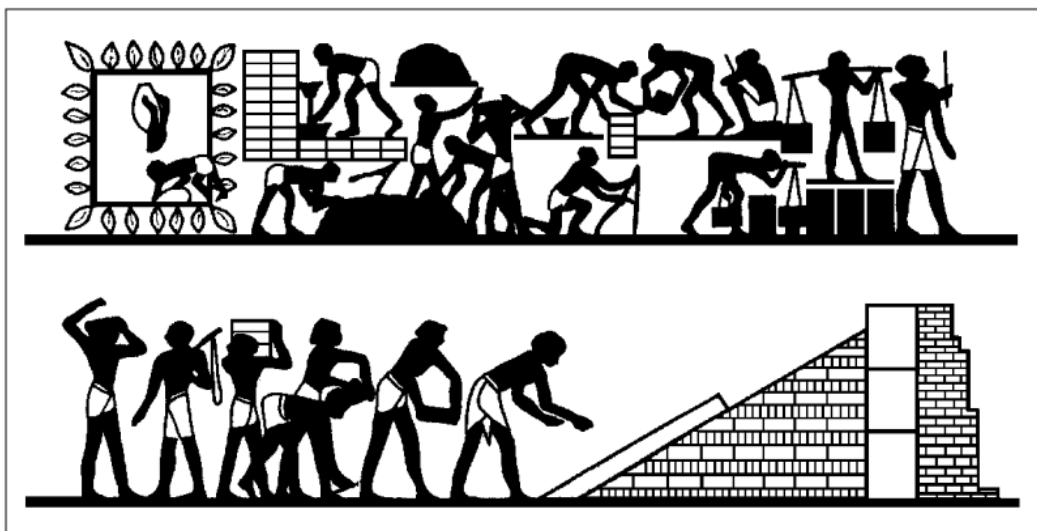


Рис. 1. Будівництво з бетонного розчину в давньому Єгипті на муралі в м. Теба, що біля м. Луксор, 1950 р. до н. е. У верхній частині робітники наповнюють глиняні горщики водою, яка потім змішується з вапном для створення розчину. Нижче будується стіна з бетонної кладки [6]

Греки пішли далі: почали випалювати вапняк, змішувати його з піском, і лише тоді він поєднувався з каменем – пуццоланом із острова Санторіні. «Пуццолан (італ. *Pozzuoli* – назви міста Пуццуолі в районі Везувію, поблизу Неаполя, Італія) – пилюваті ущільнені, здебільшого пухкі відклади (породи) вулканічного походження (суміш вулканічного попелу та ін. пірокластів, а також пемзи), що утворюються внаслідок виверження кислих лав» [3]. Ця суміш набувала гідравлічних властивостей, складова якої дозволяла розчину тверднути як на повітрі, так і у воді. Цей розчин греки використовували як покриття стін з обпалених цеглин. Близько 1000 року до н. е. у Каміросі на о. Родос, Греція, був побудований резервуар для зберігання води, виконаний із бетону такого складу.

Учені провели лабораторні дослідження й виявили незвично хороші фізичні та хімічні властивості цього бетону, які не втратили своїх ознак дотепер. Було визнано, що дозування матеріалів (кремнеземистого гравію, середнього та дрібного вапнякового заповнювача, вулканічного ґрунту, вапна та в'язучих, які надають бетону такі характеристики як пористість та хорошу водонепроникність), їхня пропорція була настільки вдало підібрана, що зараз цей бетон має міцність на стиск близько 13,5 МПа.

Завоювавши греків у 168 році до н. е. Римська імперія перейняла їхні будівельні технології. Саме римляни дали назву новому будівельному матеріалу, «бетон», що походить від латинського слова *concretus*, і означає «зростаючий разом або складений». Перші зразки римського бетону, які було виявлено, мали приблизний вік 300 р. до н. е. Римляни не просто користувалися способами та методами виготовлення бетону, які розробили до того греки, вони ще й технологічно вдосконалили рецепт. Цемент змішували з вапном і вулканічним

попелом, який містив кремній і алюміній. Цей попіл добували поблизу м. Пуццолі (Італія), тому й назвали його поззолановим цементом.

Коли греки зводили свої будівлі із застосуванням таких конструктивних елементів як кам'яні колони та балки, римляни розробили такі конструктивні форми як арки та куполи. Вони давали змогу створювати великі простори із прольотами та висотою, які досі не мали аналогів. Для зведення таких складних конструкцій римські будівничі використовували бетон. Цей будівельний матеріал використовували в імперії у великих масштабах, і хоча він був неармованим, споруди, зведені під час правління Римської імперії, стоять дотепер.

Використання перших бетонних сумішей описує Р. В. Стайгер у таких спорудах як Колізей (завершений в 82 р. н. е., рис. 2), Пантеон (завершений у 128 р. н. е., рис. 3), Базилика Константина (рис. 4) та фундаменти будівель форуму. Якщо розглянути заповнювальний матеріал, який використовувався при зведенні стін Пантеону, то можна простежити ось що: у фундаментах та нижніх стінах завтовшки 6 метрів стародавні зодчі використали важкий базальт, поступово із зведенням стін конструкція полегшувалась – цегла, туф, а ближче до купола діаметром 43,3 метра – пемза [6].

До наших днів дійшла праця римського архітектора, військового та цивільного інженера Марка Вітрувія Полліона (близько 80–70 р. до н. е. – близько 15 р. до н. е.) «Десять книг про архітектуру» (*De architectura*), у якій викладено не лише архітектурно-композиційні аспекти розміщення, планування та декорування житла та інших споруд у просторах поселень, а й інженерні основи у проектуванні поселень і будівель, а що найголовніше – у другій книзі він описує будівельні матеріали, їхнє виробництво та використання.



Рис. 2. Колізей (завершений у 82 р. н. е.)  
(фото із відкритих джерел)



Рис. 3. Пантеон (завершений у 128 р. н. е.)  
(фото із відкритих джерел)



Рис. 4. Базилика Константина (306–337 рр. н. е.) (фото із відкритих джерел)

Внесок римської цивілізації в культуру Європи, Азії та Африки неоціненний. Але, на жаль, через великі розміри імперії було досить непрактичним транспортувати вулканічний попіль з Італії. Тому після падіння Римської імперії 476 р. до н. е. використання такого рецепту бетону майже припинилося, замість римського використовували розчини на основі вапняків та бетонів.

Дорошенко О. Ю. справедливо зауважив, що наслідком невміння римлян проектувати бетонні конструкції, які працюватимуть із навантаженням, спрямованим на розтяг та вигин, стало те, що вони чудово навчили їх працювати на стиск. Варто також виокремити хіміко-мінералогічний склад цих бетонів, адже довговічність римських будівель, зведених із використанням бетону, вражає [1, с. 100].

Цікавим відкриттям стали знайдені під час розкопок у Нортгемптоні (Велика Британія) саксонські бетонні міксери, які датуються 700 роком до н. е. (рис. 5). Р. В. Стайгер у своїх працях описував їх як форми мілких мисок, що були вирізані у кам'яних породах, з центральним отвором для стовпа, до центральної осі якого були прикріплені лопатки для змішування та плічка для приведення в дію або з допомогою людини або тварини [6]. Новий розвиток у будівельній справі надали нормани 1066 року, привізши на туманний альбїон покращену технологію виготовлення бетону. У цей період було зведено з бетону абатство Редінг у Беркширі (1130 рік), яке стоїть і досі, широко цей матеріал використовувався і в будівництві замків, зокрема у спорудженні Білої вежі в Тауері (Лондон), собору Солтсбері (1265 рік), який має бетонний фундамент, тощо.

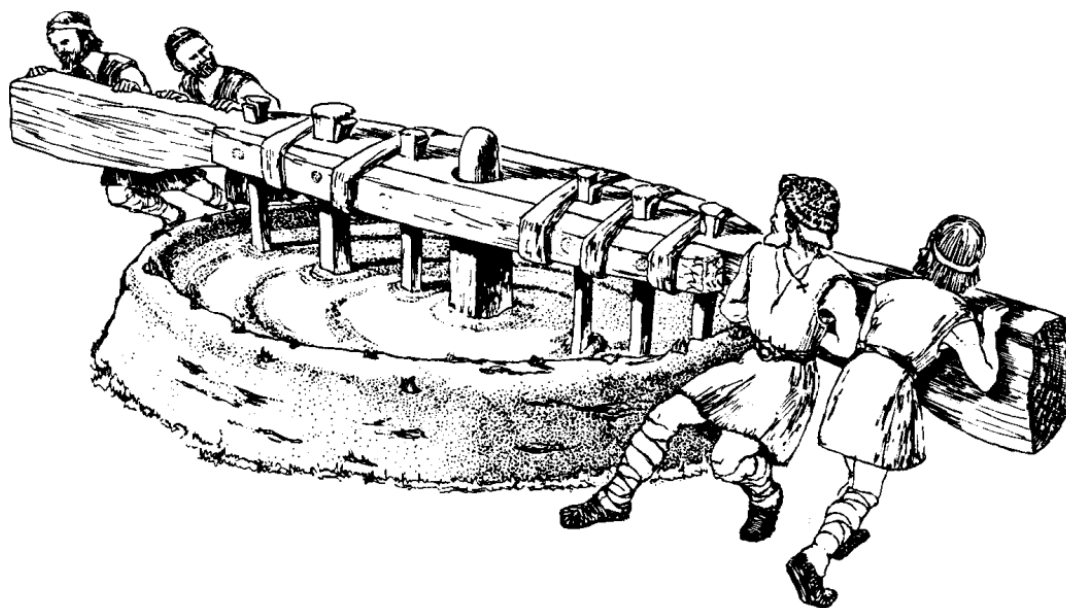


Рис. 5. Залишки саксонського бетономішувача [6].  
Загальний вигляд та принцип роботи

У стародавній Русі до будівельної суміші майстри додавали такі органічні сполуки як сир, лляну січку разом із лляним насінням, відвар ялинової кори тощо. Ці речовини мали гідрофобні властивості. Відомо, що при гасінні вапна використовували разом із водою коров'яче молоко. Досліди М. І. Хічеровича показали, що через вміст у молоці казеїну, білка, молочного цукру, 3–3,5 % жиру у вигляді прямої емульсії (так зване масло у воді), яке складається з гліцеридів олеїнової, пальмітинової і стеаринової кислот, надавали розчинам водостійких властивостей.

Для армування та підвищення міцності й довговічності вапняних розчинів широке застосування мало включення у конструкцію органічних волокон (домішки полови або вичесу льону), які при гнитті прискорювали карбонізацію вапна [2].

У 1756 році британський інженер Джон Смітон, методом спроб та помилок, розробив на той час цемент досить високої якості, поєднавши спалений синій вапняк Абертоу, вапняк із Південного Уельсу та італійський Поззолан із Чивітавекії. Ця комбінація забезпечила досить хороші характеристики, зокрема й гідралічні. Смітон звів маяк на скелях Единстоуна в Англійському каналі на відстані 14 миль на південний захід від Плімута у 1759 році. Хоча 1859 року маяк і перебудували, та фундамент, який заклав Смітон, стоїть дотепер.

У 1796 році британський священник Джеймс Паркер запатентував матеріал, який назвав «римський цемент». До його маси додавали глину, яку збирали у річці Темзі. Цей матеріал використали під час будівництва першого тунелю під судноплавним річковим каналом із цегли під річкою Темзою.

У 1812 році французький інженер-винахідник Луї Вікат почав досліджувати причини гідратації вапняку. Процес тривав п'ять років, і результати своїх спостережень інженер виклав у праці «Експериментальні дослідження з вапняків для будівництва, бетонів та звичайних розчинів», опублікованій 1818 року. Стаття подавала результати експериментів, які показали, що комбінація випаленого вапняку та глини утворює цемент із досить хорошою міцністю. Здобуті знання він використовував під час спорудження моста Суяк у Франції, який став першим бетонним мостом (без арматури).

У 1824 році англієць Джозеф Аспдін, використовуючи схожі процеси виробництва, з тими, які використав Вікат, розробив портлендський

цемент. Застосовуючи вищу температуру нагріву, він отримав три кальцій силікат, що дозволило підвищити міцність бетону, порівняно з тою, що отримав Вікат.

Офіційним роком винаходу цементу вважають 1844-й. Як зазначає Дорошенко О. Ю. у своїй праці, у той час Ісаак Чарльз Джонсон сформулював дві фундаментальні умови для виготовлення цементу, а саме правильне співвідношення між собою вихідних компонентів та їхнього випалювання до температури близько 1450 °С [1, с. 100].

У Парижі на всесвітній виставці 1855-го року Жозеф-Луї Ламб представив човен із бетону (ферроцементу), який змінили на дротяну сітку та залізні пруті. У патенті, який він отримав 1856 року, винахід описували так: «...це покращений будівельний матеріал, який можна застосовувати замість деревини в архітектурних і військово-морських спорудах, а також для реалізації різних побутових цілей, де дуже важливо уникати вогкості» [4].

Садівник-підприємець Жозеф Моньє взяв на озброєння ще не надто популярний залізобетон і почав виготовляти бетонні ящики для квітів, на які отримав патент у 1866 році. Згодом він із цього матеріалу виготовляв миски, ящики, водопровідні труби, резервуари. Розвиваючи свої вміння, згодом він розробив і отримав патент на посилені балки, палі, які застосовуються для спорудження огорожі залізничних і автомобільних доріг. У 1875 році він спорудив міст для пішоходів у м. Шазеле (Франція), який мав ширину 4 м та проліт 16,5 м (рис. 6).

Залізобетон поступово набирал популярності, ставав цікавим для інженерів-будівельників. А. Камоеш і Р. М. Феррейра описують цей період у своїх працях. Почали з'являтися та патентуватися нові будівельні вироби: конструкції плити із використанням залізобетону (1852 р., Франсуа Койньє), конструктивна система залізобетону (1854 р., В. Вілкінсон). Водночас почали з'являтися перші будівлі із цього матеріалу: Порт-Честер, Нью-Йорк, 1871–1875 рр., В. Е. Вард), Будинок на вулиці Рю Франклін у Парижі (1902–1905 рр., О. Перре), тощо. Своєю популяризацією з 1890 року бетон завдячує працям та досягненням таких учених як Франсуа Хеннебік, Консідер, Рабю та Меснаже, які експериментальними й теоретичними дослідженнями встановили основні закони опору, що застосовуються до залізобетону [5, с. 1575].



Рис. 6. Перший міст із залізобетону, у Шазеле, Франція, автор Жозеф Моньє, 1875 рік

Із початком ери залізобетону на початку ХХ ст. уже можна було створювати сміливіші архітектурні об'єкти, яким притаманні велика пролітність, висота, великі віконні прорізи (рис. 6).

На основі залізобетону виник у 1960-х роках високоміцний залізобетон з міцністю від 30 МПа, що стало можливим завдяки додаванню в масу суперпластифікаторів та деяких мінеральних домішок. Це дозволило збільшити висоту споруджуваних будівель.

Отже, для досягнення відповідних характеристик, а саме високої міцності на стиск із значеннями  $f_k = 80$  МПа на 28 день та  $f_m = 103.5$  МПа на 56 день, а також високого модуля пружності бетону із значенням  $E_{56} = 48$  Гпа на 56 день та значенням  $E_{90} = 44$  Гпа на 90 день, до рецептури бетону ввели 13 % золи вольфраму, 10 % силікатної пилу із співвідношенням вода/в'язкість 0.3 [5, с. 1576].

Ультрависокоміцний бетон, який був нещодавно розроблений, завдячує своїми характеристиками не лише портландцементу, а й алюмінієвому цементу або цементу з дуже низьким вмістом  $C_3A$ . Завдяки цьому можна зменшити пористість бетону і відповідно підвищити його міцність. Залежно від того, як досягається висока щільність, розроблено різні типи ультрависокоміцного бетону, напри-

клад, DSP (зігнуті з малими частинками), MDF (макрівільні від дефектів) або RPC (реактивний порожковий бетон) тощо.

**Висновки.** Досліджуючи технології зведення споруд, які створила людина сотні років тому і які витримали випробування часом, природними стихіями та антропогенними чинниками впливу, сучасні науковці-інженери можуть навчитися у давніх зодчих і будівничих невідомих для себе способів та технік спорудження будівель, покращити сучасні види бетонів, надати їм таких же довговічних характеристик. Вивчаючи хімічний і мінералогічний склад бетонів історичних споруд, що збереглися до нашого часу і майже не зазнали руйнувань, можна суттєво вплинути на подальше формування будівельної справи у цьому напрямку.

Сьогодні відомо багато видів бетонів: звичайний, спеціальний, гідротехнічний, легкий, дорожній, конструкційно-теплоізоляційний, жаростійкий, кислотостійкий, електропровідний, ущільнений, декоративний бетони, а також бетони для біологічного захисту, товарні бетони та розчини, бетони для зимового бетонування тощо.

#### Бібліографічний список

1. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Історія розвитку і використання цементного бетону в будівництві. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія.* 2010. Вип. 7. С. 99–102.

URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal\\_2010\\_7\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2010_7_22) (дата звернення: 14.04.2024).

2. Історія застосування хімічних добавок до бетону. URL: <http://www.m-techgroup.com.ua/istoriya-zastosuvannya-himichnyh-dobavok-do-betonu/> (дата звернення: 20.04.2024).

3. Пуццолан. URL: <https://geodictionary.com.ua/node/3779> (дата звернення: 17.04.2024).

4. Хто, коли і де винайшов бетон (придумав) – історія винаходу (походження). URL: <https://1beton.in.ua/vyrobnytstvo/53-khto-koli-i-de-vinajshov-beton.html> (дата звернення: 22.04.2024).

5. Technological evolution of concrete: from ancient times to ultra high performance concrete. A. Camões & R.M. Ferreira. Structures and Architecture – Cruz (Ed.), 2010 Taylor & Francis Group, London. URL: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/17654/1/ICSA2010\\_AC%26RMF\\_final.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/17654/1/ICSA2010_AC%26RMF_final.pdf) (дата звернення: 12.04.2024).

6. The History of Concrete\_tcm77-1305920 (washington.edu). URL: <https://pita.ess.washington.edu/tswanson/wp-content/uploads/sites/9/2018/10/The-History-of-Concrete.pdf>

*Стаття надійшла 20.08.2024*