

**Віталій Яропуд**

декан інженерно-технологічного факультету, доцент.

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

ORCID: 0000-0003-0502-1356

e-mail: [yaropud@vsau.vin.ua](mailto:yaropud@vsau.vin.ua)

**Ігор Купчук**

доцент кафедри машини та обладнання сільськогосподарського виробництва

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

ORCID: 0000-0002-2973-6914

e-mail: [kupchuk@vsau.vin.ua](mailto:kupchuk@vsau.vin.ua)

**Олена Труханська**

доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

ORCID: 0000-0001-8481-8878

e-mail: [olenatruhanska@gmail.com](mailto:olenatruhanska@gmail.com)

**Стаднік Микола Іванович**

професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна

ORCID 0000-0003-2109-6219

e-mail: [stadnik\\_mykola@vsau.vin.ua](mailto:stadnik_mykola@vsau.vin.ua)

**ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОГО ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ЧИННИКІВ БЕТОНУ, ЩО ТВЕРДНЕ,  
З УРАХУВАННЯМ ПОТРЕБ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

*Анотація*

*У роботі представлено результати дослідження комплексного впливу технологічних чинників на процес тверднення бетону з урахуванням специфічних експлуатаційних потреб об'єктів агропромислового комплексу. Проаналізовано вплив складу бетонної суміші, водоцементного співвідношення, виду цементу, добавок, режимів ущільнення та умов тверднення на формування фізико-механічних характеристик матеріалу. Особливу увагу приділено забезпеченню довговічності, тріщиностійкості, волого- та хімічної стійкості бетону в середовищах, характерних для сільськогосподарського виробництва (підвищена вологість, агресивні органічні речовини, температурні коливання). Визначено оптимальні технологічні параметри виготовлення і догляду за бетоном, що дозволяють підвищити його експлуатаційну надійність та економічну ефективність застосування в спорудах агропромислового призначення. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та зведенні виробничих, складських і інженерних об'єктів АПК.*

**Ключові слова:** заготовки, бетон, деформація, водонепроникність, пластичність, міцність, термосилова технологія, енергоефективність, технологічний процес.

## **Вступ**

У кліматичних умовах, характерних для більшості регіонів України, протягом холодного періоду року, що триває в середньому до п'яти місяців, спостерігаються значні та часто різкі коливання температури навколишнього середовища. Перехід температури через нульову позначку зумовлює багаторазові цикли замерзання та розмерзання води, що міститься у порах бетонних конструкцій. У процесі замерзання вода збільшується в об'ємі, створюючи внутрішній тиск у капілярно-пористій структурі бетону.

Це призводить до утворення мікротріщин, поступового накопичення пошкоджень і, як наслідок, до зниження міцності, водонепроникності та загальної довговічності конструкцій. Таким чином, морозне руйнування є одним із ключових факторів деградації бетонів у реальних умовах експлуатації. Особливої актуальності проблема забезпечення довговічності набуває для бетонних і залізобетонних конструкцій, що застосовуються в агропромисловому комплексі. До таких об'єктів належать силоси, зерносховища, кормосховища, резервуари для зберігання рідин, гноєсховища, а також елементи транспортної та виробничої інфраструктури. Умови їх експлуатації характеризуються поєднанням підвищеної вологості, дії агресивних органічних середовищ, температурних коливань і значних механічних навантажень.

## **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Сукупний вплив цих чинників прискорює процеси корозії цементного каменю, знижує несучу здатність конструкцій і скорочує термін їх безпечної експлуатації. Для підвищення довговічності бетонних виробів, що використовуються в умовах агропромислового виробництва, необхідно забезпечити формування щільної, малопористої структури матеріалу з високими показниками міцності та водонепроникності. Саме зниження відкритої пористості й капілярної проникності безпосередньо впливає на морозостійкість бетону, його тріщиностійкість і здатність протистояти циклічним фізико-механічним навантаженням.

Досягнення зазначених експлуатаційних характеристик можливе шляхом комплексного врахування технологічних факторів на всіх етапах виготовлення бетонної суміші та формування виробів. Найбільш суттєвий вплив мають параметри ущільнення та обробки суміші, зокрема прикладений тиск, температурні режими тверднення, а також вібраційна дія. Застосування термосилових і вібраційно-ущільнювальних технологій сприяє інтенсифікації процесів гідратації цементу, зменшенню кількості пор і дефектів структури, підвищенню однорідності та щільності бетону. Кожен із зазначених технологічних чинників по-своєму впливає на формування мікро- та макроструктури матеріалу, що в подальшому визначає його фізико-механічні властивості, стійкість до дії зовнішнього середовища та довговічність у складних умовах експлуатації.

Саме тому дослідження їх комплексного впливу є важливим науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення надійності та енергоефективності бетонних конструкцій агропромислового призначення.

### *Мета дослідження*

Метою дослідження є визначення комплексного впливу технологічних чинників — ущільнення, температури та вібраційної обробки — на процес тверднення бетону та підвищення його міцності, щільності і довговічності з урахуванням умов експлуатації конструкцій агропромислового комплексу.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

У межах дослідження комплексного впливу технологічних чинників на процес тверднення бетону особлива увага приділяється інтенсифікації гідратаційних процесів цементу як визначальному фактору формування структури та експлуатаційних властивостей матеріалу.

Поставлена науково-практична задача полягає у прискоренні тверднення, підвищенні якості гідратації цементного каменю, скороченні тривалості технологічної обробки бетонних виробів, а також у забезпеченні підвищених показників ранньої та проєктної міцності, що є критично важливим для конструкцій агропромислового комплексу. Експериментальні дослідження виконувалися із застосуванням термосилового впливу на бетонну суміш, укладену у форми. У процесі тверднення в тіло суміші інтегрували електроди, за допомогою яких здійснювався безперервний контроль електричного потенціалу, що слугує індикатором інтенсивності структуроутворення та перебігу гідратаційних реакцій. Одночасно з цим бетонна суміш піддавалася привантаженню та вібраційному ущільненню з підтриманням сталого тиску протягом усього періоду віброобробки. Подальша обробка здійснювалася шляхом ізохоричного нагрівання ущільненої суміші. За умов обмеженого об'єму підвищення температури спричиняє термічне розширення компонентів системи, що, у поєднанні з зовнішнім привантаженням, забезпечує додаткове пресування бетонної структури. Такий режим сприяє зменшенню пористості, підвищенню щільності цементного каменю та покращенню контактної зони «цементний камінь – заповнювач». У процесі тепловологісної обробки здійснювався моніторинг електричного потенціалу. Досягнення його максимального значення відповідало піковій активності гідратаційних процесів, після чого проводилося повторне вібрування до моменту фіксації мінімального значення потенціалу [1].

Подальше зростання показника свідчило про відновлення структуроутворення, у зв'язку з чим цикл «нагрівання – вібрування» повторювався. Завершення обробки визначалося стабілізацією електричного потенціалу, коли його значення переставало знижуватися під дією повторної вібрації. Нагрівання бетонної суміші здійснювалося зі швидкістю 30–35 °С/год до температури 85 °С. Після досягнення заданого температурного рівня теплоподачу припиняли, а вироби витримували під тиском до охолодження нижче 55 °С. За таких режимів термосилової вібраційної обробки вже через близько 5 годин бетон досягав міцності понад 20 МПа, що дозволяло виконувати розпалублення та транспортування виробів без ризику деструктивних пошкоджень [2].

Отримані результати підтверджують, що комплексний спрямований вплив технологічних чинників — тиску, температури та циклічного вібрування —

забезпечує суттєве підвищення інтенсивності набору міцності на ранніх стадіях тверднення, а також сприяє зростанню проєктної міцності у віці 28 діб. Застосування таких режимів є перспективним для виготовлення бетонних виробів, призначених для експлуатації в умовах агропромислового комплексу, де висувуються підвищені вимоги до довговічності, щільності та експлуатаційної надійності матеріалу (рис.1).



**Рис. 1 Приклад конструкцій зерносховища з використанням бетонних елементів**

Міцність бетону є одним із ключових показників його експлуатаційної придатності, особливо для конструкцій агропромислового комплексу, де бетонні елементи піддаються циклічним механічним навантаженням, впливу вологи та температурних коливань. Зміна міцності бетону в процесі тверднення залежить від ряду факторів: складу суміші, водоцементного співвідношення, типу цементу, наявності та кількості добавок, умов ущільнення та теплової обробки. У перші години після укладання бетонна суміш проходить активну фазу гідратації цементу, коли відбувається інтенсивне формування кристалічної структури цементного каменю [3].

На ранніх стадіях міцність зростає повільно, що обумовлено формуванням первинних мікротріщин у результаті усадки та випаровування вологи. Використання термосилової технології — поєднання нагрівання, ущільнення та циклічного вібрування — дозволяє значно інтенсифікувати цей процес: пористість бетонної суміші зменшується, контакт між цементним каменем та заповнювачем покращується, а внутрішні напруження рівномірно розподіляються [4].

Підвищення температури до 85 °С у процесі ізохоричного нагрівання прискорює гідратацію цементу і сприяє більш ранньому набору міцності. При цьому повторне вібрування після пікових значень електричного потенціалу сприяє ущільненню структури та заповненню капілярних пор. Як показують експериментальні дані, уже через 5 годин термосилової обробки бетон набирає міцність понад 20 МПа, що дозволяє розпалублювати виріб і транспортувати

його без ризику деструкції. Довготривала міцність бетону (28 діб) також підвищується за рахунок покращеної кристалізації цементного каменю та зменшення відкритої пористості. Така структура забезпечує високу морозостійкість, стійкість до хімічно активних середовищ та механічних навантажень, що характерно для агропромислового комплексу — силосів, зерносховищ та резервуарів для рідких і сипких матеріалів [5].

Графічно зміну міцності можна відобразити як залежність від віку бетону: традиційна технологія характеризується повільним ростом міцності протягом перших діб, тоді як при комплексному термосиловому впливі спостерігається значний приріст вже на ранніх стадіях, з подальшою стабілізацією на проектному рівні до 28 діб (рис.2).

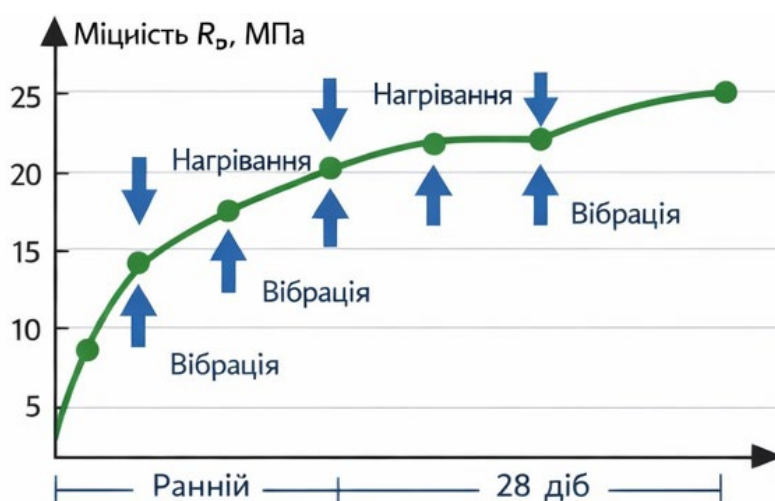


Рис. 2 Зміна міцності бетону під впливом технологічних чинників

Такий ефект дозволяє скоротити технологічний цикл, підвищити ефективність виробництва і забезпечити необхідну надійність бетонних конструкцій [6].

Бетонні конструкції займають ключове місце в інфраструктурі агропромислового комплексу завдяки високій міцності, стійкості до механічних навантажень, вологостійкості та довговічності. Вони використовуються для зберігання, транспортування та переробки зернових, кормових і рідких продуктів, а також у системах інженерного забезпечення виробничих об'єктів. Вертикальні та горизонтальні силоси для зерна і насіння виготовляються із залізобетону, що забезпечує високу міцність стінок і стійкість до тиску сипких матеріалів. Бетонні підлоги та стінки зерносховищ мають низьку пористість, що підвищує водонепроникність і запобігає утворенню плісняви. Для умов підвищеної вологості та температурних коливань застосовуються морозостійкі та хімічно стійкі марки бетону, що забезпечують тривалий термін служби конструкцій [7].

Стінки резервуарів зазвичай армовані для протистояння внутрішньому тиску і запобігання тріщинам. Аналогічні властивості необхідні для гноєсховищ і силосних траншей, де бетон контактує з агресивними органічними

середовищами. Використання спеціальних добавок і ущільненої структури бетону дозволяє запобігти ерозії стінок і підвищити довговічність [8].

Бетон застосовується і для елементів транспортної та виробничої інфраструктури, таких як фундаменти, підлоги, рампи, доріжки та під'їзні шляхи на території агропідприємств. Для технічних споруд, включаючи лінії переробки зерна та склади комбікормів, використовуються плити перекриття та балки з високою несучою здатністю. Платформи для навантаження і розвантаження сировини виготовляють із бетону високої міцності, що забезпечує довготривале використання під дією важкої техніки. Залізобетонні огорожі та стінки ізолюють технологічні зони та витримують механічні удари й навантаження [9].

Бетонні підлоги зернохосовищ і виробничих цехів армовані та мають низьку пористість, що забезпечує легке очищення та стійкість до стирання. При необхідності покриття підлоги додатково обробляються спеціальними сумішами для підвищення стійкості до хімічних речовин та механічних впливів. Таким чином, бетонні конструкції в агропромисловому комплексі одночасно виконують несучі, захисні та експлуатаційні функції, а їх довговічність та надійність безпосередньо залежить від правильного вибору технології виготовлення, складу суміші та режимів тверднення [10].

## **Висновки**

У результаті проведеного дослідження комплексного впливу технологічних чинників на процес тверднення бетону встановлено, що поєднання ущільнення, термосилового нагрівання та циклічного вібрування суттєво впливає на структуру та фізико-механічні властивості матеріалу. Застосування таких режимів забезпечує прискорений набір міцності на ранніх стадіях тверднення, підвищення проектної міцності до 28 діб та зменшення пористості бетонного каменю, що безпосередньо підвищує його морозостійкість і довговічність.

Дослідження показали, що бетонні конструкції агропромислового комплексу, включаючи силоси, зернохосовища, резервуари, гноєхосовища та елементи транспортної інфраструктури, потребують підвищеної стійкості до циклічних механічних і температурних навантажень. Використання технології термосилового тверднення дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики таких конструкцій, скоротити технологічний цикл виробництва та забезпечити надійність і довговічність бетонних виробів.

Таким чином, комплексне врахування технологічних факторів при виготовленні бетонних сумішей є ефективним інструментом підвищення міцності, щільності та експлуатаційної надійності бетонних конструкцій, що забезпечує оптимальні умови для застосування матеріалу в агропромисловому виробництві. Результати дослідження можуть бути використані для розробки технологічних регламентів виробництва бетонних виробів, адаптованих до умов агропромислового комплексу та вимог щодо довговічності і енергоефективності.

## **Список використаної літератури**

1. Саницький М. А., Маргаль І. В., Киракевич І. І. Сучасні модифіковані бетони та розчини. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 284 с.

2. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Будівельне матеріалознавство. – Рівне : НУВГП, 2017. – 448 с.
3. Плугін А. А., Плугін О. А., Борзяк О. С. Модифіковані бетони підвищеної довговічності. – Харків : УкрДУЗТ, 2019. – 236 с.
4. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. – 4th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2017. – 659 p.
5. Bentur A., Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 601 p.
6. Aïtcin P.-C. High Performance Concrete. – Updated ed. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 624 p.
7. De Schutter G., Ye G., Yuan Q. Advanced Concrete Technology: Testing and Quality. – London : ICE Publishing, 2017. – 352 p.
8. EN 206:2013 + A1:2016. Concrete – Specification, performance, production and conformity. – Brussels : CEN, 2016. – 102 p.
9. ACI 308R-16. Guide to External Curing of Concrete. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2016. – 44 p.
10. ACI 212.3R-16. Report on Chemical Admixtures for Concrete. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2016. – 69 p.

УДК 666.9

### **Vitalii Yaropud**

Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Associate Professor Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

*ORCID ID: 0000-0003-0502-1356*

*e-mail: yaropud@vsau.vin.ua*

### **Ihor Kupchuk**

Associate Professor, Department of Agricultural Machinery and Equipment  
Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

*ORCID ID: 0000-0002-2973-6914*

*e-mail: kupchuk@vsau.vin.ua*

### **Olena Trukhanska**

Associate Professor, Department of Agroengineering and Technical Service Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

*ORCID: 0000-0001-8481-8878*

*e-mail: olenatruhanska@gmail.com*

## **STUDY OF THE COMBINED EFFECT OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON CURING CONCRETE, TAKING INTO ACCOUNT THE NEEDS OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX**

### **Abstract**

*The paper presents the results of a study on the comprehensive influence of technological factors on the hardening process of concrete, taking into account the specific operational needs of agro-industrial complex facilities. The influence of the concrete mix composition, water–cement ratio, type of cement, admixtures, compaction methods, and curing conditions on the formation of the material's*

*physical and mechanical properties is analyzed. Particular attention is paid to ensuring durability, crack resistance, moisture resistance, and chemical resistance of concrete in environments typical for agricultural production (high humidity, aggressive organic substances, temperature fluctuations). Optimal technological parameters for concrete production and curing have been determined, enabling improved operational reliability and economic efficiency in the use of concrete for agro-industrial facilities. The obtained results can be applied in the design and construction of production, storage, and engineering structures within the agro-industrial sector.*

**Keywords:** blanks, concrete, deformation, watertightness, plasticity, strength, thermoforce technology, energy efficiency, technological process.

## References

1. Sanytskyi M. A., Marhal I. V., Kyrakevych I. I. Suchasni modyfikovani betony ta rozchyny [Modern Modified Concretes and Mortars]. – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2018. – 284 p.
2. Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L. Budivselne materialoznavstvo [Building Materials Science]. – Rivne : NUVHP, 2017. – 448 p.
3. Pluhin A. A., Pluhin O. A., Borziak O. S. Modyfikovani betony pidvyshchenoi dohovichnosti [Modified Concretes of Increased Durability]. – Kharkiv : Ukrainian State University of Railway Transport, 2019. – 236 p.
4. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. – 4th ed. – New York : McGraw-Hill Education, 2017. – 659 p.
5. Bentur A., Mindess S. Fibre Reinforced Cementitious Composites. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 601 p.
6. Aitcin P.-C. High Performance Concrete. – Updated ed. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 624 p.
7. De Schutter G., Ye G., Yuan Q. Advanced Concrete Technology: Testing and Quality. – London : ICE Publishing, 2017. – 352 p.
8. EN 206:2013 + A1:2016. Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity. – Brussels : CEN, 2016. – 102 p.
9. ACI 308R-16. Guide to External Curing of Concrete. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2016. – 44 p.
10. ACI 212.3R-16. Report on Chemical Admixtures for Concrete. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2016. – 69 p.4

Стаття надійшла до редакції 07.04.2026

Стаття пройшла рецензування 08.05.2026

Стаття опублікована 29.05.2026