

В. М. Яропуд  
І. М. Купчук  
О. О. Труханська  
М. І. Стаднік

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ БЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Вінницький національний аграрний університет

У статті досліджено вплив технологічних чинників на довговічність бетонних конструкцій агропромислового комплексу. Проаналізовано особливості експлуатації бетонних і залізобетонних споруд в умовах підвищеної вологості, агресивних органічних середовищ, циклічних температурних коливань та механічних навантажень, характерних для об'єктів сільськогосподарського призначення. Визначено основні фактори, що впливають на формування структури та фізико-механічних властивостей бетону, зокрема режими ущільнення, температурної обробки, вібраційного впливу та водоцементне співвідношення.

Особливу увагу приділено застосуванню комплексної термосилової технології тверднення, яка поєднує нагрівання, ущільнення та циклічне вібрування бетонної суміші. Встановлено, що комплексний вплив технологічних чинників сприяє інтенсифікації процесів гідратації цементу, зменшенню пористості бетонного каменю, підвищенню щільності структури та покращенню контактної зони між цементним каменем і заповнювачем. Це забезпечує підвищення міцності, морозостійкості, водонепроникності та експлуатаційної довговічності бетонних конструкцій.

Обґрунтовано доцільність використання удосконалених режимів тверднення бетону для конструкцій зернохосовищ, силосів, резервуарів, гноєхосовищ та інших об'єктів агропромислового комплексу. Результати дослідження можуть бути використані при розробці енергоефективних технологій виготовлення бетонних виробів і підвищенні надійності будівельних конструкцій сільськогосподарського призначення.

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

Стаття надійшла до редакції / Received 30.03.2026  
Прийнята до друку / Accepted 28.04.2026  
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Яропуд В.М., Купчук І.М., Труханська О.О., Стаднік М.І.

### Вступ

Бетон і залізобетон є основними конструкційними матеріалами, що широко застосовуються в агропромисловому комплексі завдяки високій міцності, технологічності та здатності забезпечувати тривалу експлуатацію споруд у складних умовах навколишнього середовища. Бетонні конструкції використовуються при будівництві зернохосовищ, силосів, резервуарів, гноєхосовищ, виробничих приміщень, транспортної інфраструктури та інших об'єктів сільськогосподарського призначення. Особливістю їх експлуатації є постійний вплив підвищеної вологості, агресивних органічних речовин, циклічних температурних коливань, механічних навантажень та процесів заморожування і відтавання.

У процесі експлуатації зазначені фактори спричиняють розвиток мікротріщин, підвищення пористості, корозію цементного каменю та поступове зниження фізико-механічних характеристик бетону. Це призводить до зменшення довговічності конструкцій, погіршення їх експлуатаційної надійності та зростання витрат на ремонт і відновлення споруд. У зв'язку з цим актуальним науково-практичним завданням є підвищення довговічності бетонів шляхом удосконалення технологічних режимів їх виготовлення та тверднення [1–2]

Одним із перспективних напрямів підвищення експлуатаційної надійності бетонних конструкцій є застосування комплексного технологічного впливу на бетонну суміш у процесі формування структури матеріалу. До найбільш ефективних технологічних чинників належать режими ущільнення, температурної обробки, вібраційного впливу, а також оптимізація водоцементного співвідношення та умов тверднення. Комплексна дія зазначених факторів забезпечує інтенсифікацію процесів гідратації цементу, зменшення пористості бетонного каменю, покращення контактної зони між цементним каменем і заповнювачем, що безпосередньо впливає на міцність,

морозостійкість, водонепроникність і довговічність бетону.

Особливий інтерес становить застосування термосилових технологій тверднення, які поєднують нагрівання, ущільнення та циклічне вібрування бетонної суміші. Такі режими сприяють прискореному набору міцності, підвищенню щільності структури та скороченню тривалості технологічного циклу виробництва бетонних виробів. Водночас питання комплексного впливу технологічних чинників на довговічність бетонних конструкцій агропромислового комплексу потребують подальших досліджень, особливо в умовах дії агресивних середовищ і змінних температурно-вологісних режимів експлуатації.

У зв'язку з цим дослідження впливу технологічних чинників на довговічність бетонних конструкцій агропромислового комплексу є актуальним і має важливе значення для підвищення надійності, енергоефективності та тривалості експлуатації будівель і споруд сільськогосподарського призначення.

### Постановка проблеми

У процесі експлуатації бетонні конструкції агропромислового комплексу зазнають значних фізико-механічних і хімічних впливів, що призводить до розвитку мікротріщин, підвищення пористості та поступового руйнування цементного каменю. Особливо небезпечним є проникнення вологи та агресивних речовин у капілярно-пористу структуру бетону, що спричиняє зниження міцності та довговічності конструкцій. У зв'язку з цим важливим завданням є підвищення щільності структури бетону та забезпечення його морозостійкості, водонепроникності й тріщиностійкості [3 – 4].

Одним із перспективних напрямів підвищення експлуатаційної надійності бетонних конструкцій є застосування комплексних технологій тверднення, які поєднують вібраційне ущільнення, температурну обробку та зовнішнє привантаження бетонної суміші. Використання термосилової технології дозволяє інтенсифікувати процеси гідратації цементу, зменшити відкриту пористість та сформувати більш щільну структуру цементного каменю. Це забезпечує підвищення ранньої та проектної міцності бетону, а також покращує його стійкість до дії агресивних факторів навколишнього середовища.

Дослідження показують, що оптимізація режимів тверднення бетону суттєво впливає на експлуатаційні характеристики конструкцій агропромислового комплексу. Застосування циклічного вібрування та ізохоричного нагрівання дозволяє знизити капілярну проникність бетону, підвищити водонепроникність і морозостійкість, а також збільшити строк служби будівельних конструкцій. Водночас скорочується тривалість технологічного циклу виготовлення бетонних виробів і підвищується енергоефективність виробництва.

Таким чином, бетонні конструкції агропромислового комплексу потребують комплексного підходу до вибору складу бетонної суміші та технологічних режимів її обробки. Використання сучасних технологій тверднення бетону дозволяє забезпечити високу експлуатаційну надійність, довговічність та ефективність використання бетонних конструкцій у складних умовах сільськогосподарського виробництва.

### Основна частина

Метою дослідження є визначення впливу технологічних чинників, зокрема режимів ущільнення та температурної обробки на формування структури, фізико-механічних властивостей і довговічності бетонних конструкцій агропромислового комплексу, а також обґрунтування ефективних технологічних режимів тверднення бетону для підвищення його міцності, морозостійкості, водонепроникності та експлуатаційної надійності в умовах дії агресивних середовищ.

Бетонні конструкції широко застосовуються в агропромисловому комплексі при будівництві зерносховищ, силосів, виробничих приміщень, транспортних майданчиків, тваринницьких комплексів та складських споруд. Одним із найбільш навантажених елементів таких об'єктів є бетонні підлоги, які в процесі експлуатації піддаються дії значних статичних і динамічних навантажень, стиранню, впливу вологи, агресивних органічних речовин та циклічним температурним коливанням. У виробничих приміщеннях агропромислового комплексу навантаження на бетонні підлоги може досягати 5–7 т/м<sup>2</sup>, а в зонах руху навантажувачів і транспортної техніки – понад 10 т/м<sup>2</sup> [5–6].

Для забезпечення довговічності бетонних підлог важливе значення мають показники міцності, водонепроникності та стираності поверхневого шару. У дослідженні як приклад розглянуто бетонну підлогу промислового типу з армованим бетонним шаром товщиною 180–220 мм, улаштованим по бетонній або щебенево-піщаній основі. Для підвищення зносостійкості поверхні використовувався сухий зміцнювальний шар (топпінг) товщиною 3–5 мм. Міцність бетону за класом приймалась не нижче С25/30, а для зон інтенсивного руху техніки – С30/35.

Встановлено, що одним із основних показників експлуатаційної надійності бетонної підлоги є її стираність. Для звичайних бетонних покриттів показник стираності може становити 0,7–0,9 г/см<sup>2</sup>, тоді як використання сухих зміцнювальних сумішей дозволяє знизити цей показник до 0,3–0,5 г/см<sup>2</sup>. При цьому твердість поверхневого шару збільшується на 25–40 %, а строк експлуатації підлоги може зростати у 1,5–2 рази залежно від умов використання [7–8].

Процес набору міцності бетонної підлоги значною мірою залежить від температурно-вологісних умов тверднення. За нормальних умов тверднення при температурі +20 °С і відносній вологості понад 95 % бетон набирає близько 15 % проектної міцності через 1 добу, близько 30 % — через 3 доби та 50 % — через 7 діб. На 14 добу міцність бетону становить близько 75 %, а до 28 доби бетон досягає 100 % проектної міцності.

За умов підвищеної температури тверднення (+30 °С) процес гідратації цементу відбувається інтенсивніше. У такому випадку бетон може набирати до 20 % проектної міцності вже через 1 добу, 35 % — через 3 доби та близько 60 % — через 7 діб. Водночас при недостатньому догляді за поверхнею прискорене висихання бетону може спричинити появу усадкових мікротріщин шириною 0,1–0,3 мм, що негативно впливає на довговічність покриття.

За несприятливих умов тверднення, зокрема при температурі нижче +10 °С та недостатній вологості, процес гідратації цементу суттєво сповільнюється. У таких умовах бетон набирає лише 5 % проектної міцності через 1 добу, близько 10 % — через 3 доби та не більше 20 % — через 7 діб. Через 28 діб міцність бетону може становити лише 40–45 % від проектного значення, що призводить до формування підвищеної пористості та зниження морозостійкості матеріалу.

Проведений аналіз показує, що водоцементне співвідношення також суттєво впливає на формування структури бетонної підлоги. При збільшенні водоцементного співвідношення з 0,4 до 0,6 відкрита пористість бетону може зростати на 20–30 %, а водопоглинання — на 15–25 %. Це призводить до підвищення стираності та зниження довговічності бетонного покриття. Для бетонних підлог агропромислового призначення оптимальним є водоцементне співвідношення в межах 0,40–0,45.

Таким чином, довговічність бетонних підлог агропромислового комплексу значною мірою визначається комплексним впливом технологічних чинників: режимів ущільнення, умов тверднення, температурно-вологісного режиму та складу бетонної суміші (див. рис.1). Забезпечення оптимальних умов тверднення дозволяє підвищити міцність, зносостійкість і експлуатаційну надійність бетонних конструкцій, а також збільшити строк їх служби до 25–30 років без суттєвого ремонту поверхневого шару [9].

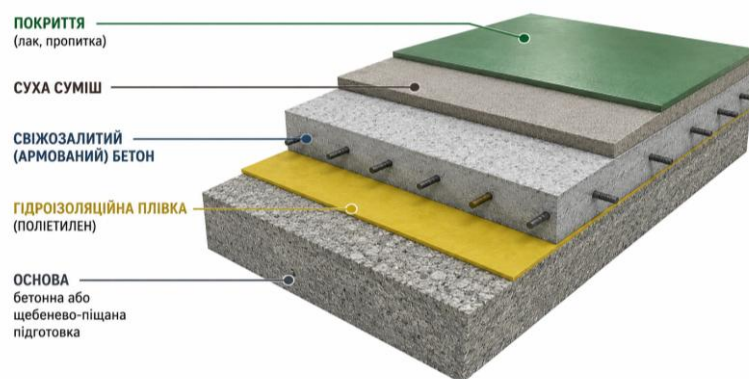


Рисунок 1 – Приклад конструкції підлоги для приміщень АПК

Аналіз графіка тверднення бетонної підлоги показує, що процес набору міцності бетону суттєво залежить від температурно-вологісних умов тверднення. На графіку наведено зміну відносної міцності бетонної підлоги у відсотках від проектної міцності залежно від часу тверднення за трьох різних умов: нормального тверднення, тверднення при підвищеній температурі та несприятливих

умов (див. рис. 2).

За нормальних умов тверднення при температурі близько +20 °С і відносній вологості понад 95 % бетон характеризується стабільним і рівномірним набором міцності. Уже через 1 добу бетон набирає близько 15 % проектної міцності, через 3 доби — 30 %, через 7 діб — близько 50 %. На 14 добу міцність бетону досягає приблизно 75 %, а на 28 добу бетонна підлога набирає 100 % проектної міцності. Такий режим тверднення забезпечує формування щільної структури цементного каменю та достатню довговічність покриття.

При твердненні за підвищеної температури (+30 °С) процес гідратації цементу відбувається інтенсивніше, унаслідок чого рання міцність бетону є вищою. У першу добу бетон набирає близько 20 % проектної міцності, через 3 доби — 35 %, а через 7 діб — близько 60 %. До 14 доби міцність становить приблизно 80 %, а на 28 добу також досягає 100 %. Підвищена температура сприяє прискоренню структуроутворення цементного каменю, однак за недостатнього догляду за поверхнею можливе утворення усадкових мікротріщин унаслідок швидкого випаровування води [9].

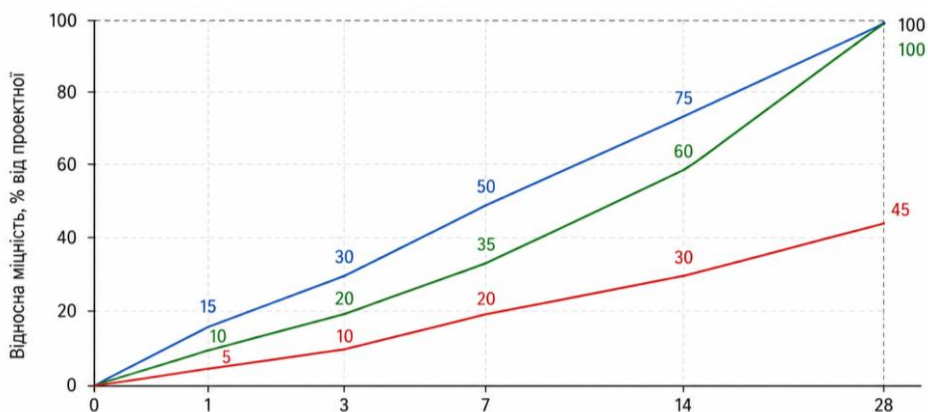


Рисунок 2 – Графік твердіння бетонної підлоги при різних умовах за 28 діб

Найгірші показники набору міцності спостерігаються за несприятливих умов тверднення, зокрема при температурі нижче +10 °С та недостатній вологості. За таких умов бетон набирає лише близько 5 % проектної міцності через 1 добу, 10 % — через 3 доби та близько 20 % — через 7 діб. На 14 добу міцність становить лише близько 30 %, а через 28 діб — не перевищує 45 %. Повільний процес гідратації цементу призводить до формування більш пористої структури бетону, зниження водонепроникності та погіршення довговічності бетонної підлоги.

Графік демонструє, що найбільш інтенсивний набір міцності бетону відбувається в перші 7–14 діб тверднення. Саме в цей період особливе значення мають температурно-вологісні умови догляду за бетонною підлогою. Забезпечення оптимальних умов тверднення дозволяє підвищити міцність, знизити стираний шар та збільшити експлуатаційну довговічність бетонних конструкцій агропромислового комплексу.

### Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що довговічність бетонних конструкцій агропромислового комплексу значною мірою залежить від технологічних чинників виготовлення та умов тверднення бетонної суміші. Особливе значення для забезпечення експлуатаційної надійності бетонних підлог мають режими ущільнення, температурно-вологісні умови тверднення, водоцементне співвідношення та використання поверхневих зміцнювальних шарів.

Визначено, що бетонні підлоги агропромислових споруд працюють в умовах інтенсивних механічних навантажень, стирання, дії води та агресивних органічних середовищ, унаслідок чого до матеріалу висуваються підвищені вимоги щодо міцності, водонепроникності та зносостійкості. Встановлено, що застосування бетонів класу не нижче С25/30, використання сухих зміцнювальних сумішей та забезпечення оптимального режиму тверднення дозволяє суттєво підвищити довговічність бетонних покриттів.

Проведений аналіз процесу набору міцності показав, що за нормальних умов тверднення бетон набирає близько 50 % проектної міцності через 7 діб та досягає 100 % міцності на 28 добу. За підвищених температур процес гідратації цементу прискорюється, що сприяє більш швидкому

набору ранньої міцності, однак потребує забезпечення належного догляду за поверхнею для запобігання утворенню усадкових мікротріщин. За несприятливих умов тверднення при низьких температурах і недостатній вологості міцність бетону через 28 діб може становити лише 40–45 % від проектного значення.

Установлено, що вібраційне ущільнення бетонної суміші та зменшення водоцементного співвідношення до 0,40–0,45 сприяють зниженню пористості бетону на 20–30 %, підвищенню водонепроникності та зменшенню стираності поверхневого шару. Використання сухих зміцнювальних сумішей дозволяє знизити показник стираності бетонної підлоги до 0,3–0,5 г/см<sup>2</sup> та збільшити строк експлуатації покриття у 1,5–2 рази.

Таким чином, комплексне врахування технологічних чинників при виготовленні бетонних конструкцій агропромислового комплексу забезпечує підвищення їх міцності, зносостійкості та експлуатаційної довговічності. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та влаштуванні бетонних підлог виробничих і складських приміщень агропромислового призначення, а також для розробки енергоефективних технологій тверднення бетонів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Саницький М. А., Маргаль І. В. Сучасні технології модифікованих бетонів для будівельних конструкцій. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 312 с.
- [2] Плугін А. А., Борзяк О. С., Плугін О. А. Довговічність бетонів в агресивних середовищах. – Харків : УкрДУЗТ, 2022. – 248 с.
- [3] Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Ефективні бетони та будівельні розчини нового покоління. – Рівне : НУВГП, 2021. – 366 с.
- [4] Ye G., Schlangen E., van Breugel K. Advances in Sustainable Concrete and Structural Durability. – Springer, 2021. – 368 p.
- [5] Neville A. M., Brooks J. J. Concrete Technology. – 3rd ed. – Pearson Education, 2022. – 442 p.
- [6] EN 206:2021. Concrete – Specification, performance, production and conformity. – Brussels : European Committee for Standardization, 2021. – 118 p.
- [7] ACI PRC-201.2-21. Guide to Durable Concrete. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2021. – 95 p.
- [8] Zhang P., Li Q., Wang J. Influence of curing conditions on strength and durability of concrete floors in aggressive environments. – Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 68. – 106120.
- [9] De Belie N., Wang Y., Bundur Z. Durability of concrete structures in agricultural and environmental conditions. – Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 295. – 123635.

### REFERENCES

- [1] Sanytskyi M. A., Marhal I. V. Modern Technologies of Modified Concretes for Building Structures. – Lviv : Lviv Polytechnic Publishing House, 2021. – 312 p.
- [2] Plugin A. A., Borziak O. S., Plugin O. A. Durability of Concretes in Aggressive Environments. – Kharkiv : UkrDUZT, 2022. – 248 p.
- [3] Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L. Efficient Concretes and Building Mortars of the New Generation. – Rivne : NUVGP, 2021. – 366 p.
- [4] Ye G., Schlangen E., van Breugel K. Advances in Sustainable Concrete and Structural Durability. – Springer, 2021. – 368 p.
- [5] Neville A. M., Brooks J. J. Concrete Technology. – 3rd ed. – Pearson Education, 2022. – 442 p.
- [6] EN 206:2021. Concrete – Specification, performance, production and conformity. – Brussels : European Committee for Standardization, 2021. – 118 p.
- [7] ACI PRC-201.2-21. Guide to Durable Concrete. – Farmington Hills : American Concrete Institute, 2021. – 95 p.
- [8] Zhang P., Li Q., Wang J. Influence of curing conditions on strength and durability of concrete floors in aggressive environments // Journal of Building Engineering. – 2023. – Vol. 68. – 106120.
- [9] De Belie N., Wang Y., Bundur Z. Durability of concrete structures in agricultural and environmental conditions // Construction and Building Materials. – 2021. – Vol. 295. – 123635.

**Яропуд Віталій Миколайович** – к.т.н., декан інженерно-технологічного факультету, доцент. Інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, email: yaropud@vsau.vin.ua, ORCID: 0000-0003-0502-1356.

**Купчук Ігор Миколайович** – к.т.н., заступник декана з наукової роботи інженерно-технологічного факультету, доцент кафедри інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, Інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, email: kupchuk@vsau.vin.ua, ORCID: 0000-0002-2973-6914.

**Труханська Олена Олександрівна** – к.т.н., доцент кафедри агроінженерії та технічного сервісу, Інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, email: olenatruhanska@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8481-8878.

**Стаднік Микола Іванович** – д.т.н. професор кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки. Інженерно-технологічний факультет, Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, email: stadnik\_mykola@vsau.vin.ua, ORCID 0000-0003-2109-6219.

V. Yaropud  
I. Kupchuk  
O. Trukhanska  
M. Stadnik

## INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Vinnitsia National Agrarian University

*The article investigates the influence of technological factors on the durability and operational reliability of concrete structures used in the agro-industrial complex. The study is aimed at identifying the most significant technological parameters that determine the formation of the concrete structure and affect its long-term performance under adverse operating conditions. The operational features of concrete and reinforced concrete structures exposed to high humidity, aggressive organic substances, cyclic temperature variations, dynamic actions, and mechanical loads characteristic of agricultural facilities are analyzed. Such conditions accelerate the deterioration of construction materials and require the application of advanced technologies to ensure the required durability of structures.*

*The main technological factors influencing the physical-mechanical properties of concrete are considered, including the water-cement ratio, compaction intensity, vibration modes, heat treatment parameters, and curing conditions. Particular attention is paid to the formation of the cement stone structure and the development of the contact zone between aggregate particles and the cement matrix. The relationship between technological processing parameters and the resulting density, strength, water resistance, frost resistance, and crack resistance of concrete is established.*

*Special attention is devoted to the application of a complex thermoforce hardening technology that combines heating, compaction, and cyclic vibration of the concrete mixture. The synergistic effect of these factors contributes to the intensification of hydration processes, more uniform distribution of moisture within the concrete mass, reduction of capillary porosity, and formation of a denser and more homogeneous structure. As a result, the concrete demonstrates improved mechanical characteristics and enhanced resistance to environmental influences.*

*The feasibility of applying optimized hardening regimes in the production of structures for grain storage facilities, silos, reservoirs, livestock buildings, manure storage facilities, and other agricultural infrastructure objects is substantiated. The obtained results can be used for the development of resource-saving and energy-efficient technologies for manufacturing concrete products, increasing the service life of building structures, reducing maintenance costs, and improving the overall reliability and sustainability of agro-industrial construction facilities.*

**Key words:** concrete, strength, waterproofness, thermoforce technology, energy efficiency, blanks, deformation, plasticity, technological process.

**Yaropud Vitalii M.** — PhD in Technical Sciences, Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Associate Professor. Faculty of Engineering and Technology, Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, email: yaropud@vsau.vin.ua, ORCID: 0000-0003-0502-1356.

**Kupchuk Ihor M.** — PhD in Technical Sciences, Deputy Dean for Research of the Faculty of Engineering and Technology, Associate Professor of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes in the Agro-Industrial Complex. Faculty of Engineering and Technology, Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, email: kupchuk@vsau.vin.ua, ORCID: 0000-0002-2973-6914.

**Trukhanska Olena O.** — PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering and Technical Service. Faculty of Engineering and Technology, Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, email: olenatruhanska@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8481-8878.

**Stadnik Mykola I.** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Faculty of Engineering and Technology, Vinnitsia National Agrarian University, Vinnitsia, email: stadnik\_mykola@vsau.vin.ua, ORCID: 0000-0003-2109-6219.