

УДК 624.012

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.157.1253

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЕФЕКТІВ ТА ПОШКОДЖЕНЬ МЕТАЛЕВИХ НЕСУЧИХ ВЕЖ ДИМОВИХ ТРУБ ТА ЇХ ГРАНИЧНО ДОПУСТИМИ ЗНАЧЕННЯ

ЯРОВИЙ С. М.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
ЧЕРЕДНИК Д. Л.², *канд. техн. наук, доц.*,
ТИТЮК А. О.³, *канд. техн. наук, доц.*,
ДАНИЛЬЧЕНКО О. О.⁴, *асп.*

^{1*} Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-09, e-mail: psp.nauka@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2886-9456>

² Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-09, e-mail: dymytrii.Cherednik@kname.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9049-2085>

³ Кафедра залізобетонних та 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 (050) 480-18-60, e-mail: anatol-61@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4927-370X>

⁴ Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (067) 745-31-37, e-mail: sasha2001danilchenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-9434-8920>

Анотація. *Постановка проблеми.* Металеві несучі вежі, які забезпечують підтримку високих вентиляційних та димових труб, відіграють ключову роль у технологічних процесах промислових підприємств. Їхній вихід з ладу призводить до повного припинення виробничого циклу. Протягом тривалого часу експлуатації такі конструкції піддаються впливу значних силових та динамічних навантажень, температурних перепадів і корозійних процесів. Комбінація цих факторів поступово знижує їхню довговічність, провокуючи виникнення і накопичення різних дефектів та пошкоджень. В Україні наразі відсутня достатня кількість систематизованих даних та єдиних методик для статистичної оцінки пошкоджень таких споруд, що суттєво ускладнює своєчасну діагностику і планування ефективних ремонтних заходів. На основі численних обстежень технічного стану веж проведено ідентифікацію характерних дефектів і пошкоджень, їх класифікацію за типами та масштабами, а також здійснено статистичний аналіз даних, пов'язаних із пошкоджуваністю. Встановлено гранично допустимі значення пошкоджень залежно від категорії технічного стану та виконано розподіл виявлених дефектів відповідно до рівнів небезпечності. Аналіз технічного стану металевих несучих веж, який здійснювався на основі результатів щодо їх схильності до пошкоджень, сприятиме збільшенню експлуатаційної довговічності та забезпеченню безперервної роботи промислових підприємств. Крім того, це дозволяє зменшити ризик аварійних ситуацій і подовжити термін служби зазначених конструкцій.

Ключові слова: *металеві несучі вежі; димові та вентиляційні труби; дефекти та пошкодження; граничні значення пошкоджень*

STATISTICAL ANALYSIS OF DEFECTS AND DAMAGES OF METAL SUPPORTING TOWERS OF CHIMNEY PIPES AND THEIR LIMITS

YAROVIJ S.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
CHEREDNIK D.L.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYTIUK A.O.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
DANYLCHENKO O.O.⁴, *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-09, e-mail: psp.nauka@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2886-9456>

² Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-09, e-mail: dymytrii.Cherednik@kname.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9049-2085>

³ Department of Reinforced-Concrete and Masonry 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 (050) 480-18-60, e-mail: anatol-61@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4927-370X>

⁴ Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (067) 745-31-37, e-mail: sasha2001danilchenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-9434-8920>

Abstract. Problem statement. Metal supporting towers supporting high ventilation and chimneys are critical elements of the technological chains of industrial enterprises, so their downtime causes the entire production to stop. During a long period of operation, such structures operate under the influence of force and dynamic loads, temperature fluctuations and corrosive influences. The combination of these factors reduces the operational durability and causes the appearance and accumulation of defects and damage. In Ukraine, there is practically no sufficient amount of systematized data and unified approaches to the statistical assessment of damageability of such structures, which complicates timely diagnostics and effective planning of repair measures. This gap severely impedes the ability to perform accurate risk-based diagnostics, forecast remaining service life, and strategically plan cost-effective maintenance and repair interventions. Based on the results of numerous inspections of the technical condition of towers, characteristic defects and damage have been identified, their classification by type and size has been carried out, and statistical processing of data on damageability has been carried out. The maximum permissible values of damage have been determined depending on the category of technical condition, and the identified defects have been distributed by hazard categories. A systematic and data-driven assessment of the technical condition of metal smoke and ventilation pipes, based on the detailed results obtained from analyzing their damage patterns, will significantly contribute to increasing the structural durability and operational continuity of industrial enterprises, ultimately reducing the accident rate and predictably extending the safe service life of these critical exhaust systems.

Keywords: *metal load-bearing towers; smoke and ventilation pipes; defects and damage; damage thresholds*

Постанова проблеми. Металеві конструкції несучих веж, які забезпечують функціонування димових і вентиляційних труб промислових підприємств, є ключовими компонентами інженерної інфраструктури (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд веж висотою 180 м цеху азотної кислоти

Тривала експлуатація конструкцій у умовах впливу агресивних середовищ, вітрових навантажень і корозійних процесів спричиняє появу численних дефектів та пошкоджень. Це може стати причиною втрати стійкості споруд і призвести до зупинки виробничих процесів. Однак у

технічній літературі бракує достатньо систематизованих даних і єдиних підходів до статистичної оцінки пошкоджуваності таких об'єктів, що ускладнює своєчасне проведення діагностики та ефективне планування ремонтних робіт [8; 11; 12].

У літературі недостатньо інформації про ушкоджуваність металевих несучих веж. Крім того, немає статистичних даних щодо виявлених дефектів і пошкоджень конструкцій цих висотних споруд.

В результаті проведених обстежень технічного стану та експертиз з питань промислової безпеки 25 металевих несучих веж було ідентифіковано основні дефекти та пошкодження. Виявлені недоліки систематизовано відповідно до їх типів та величин. Крім того, виконано статистичний аналіз ступеня пошкоджуваності конструкцій, а також розроблено графічне представлення даних у вигляді діаграм дефектів і пошкоджень, що сприяє поглибленому розумінню їхньої природи та поширеності [5–7]. Відповідно до методичних рекомендацій [4], розроблених за участю автора, дефекти та пошкодження елементів металевих несучих веж для димових і вентиляційних труб поділяються на три категорії небезпечності. Вітчизняні нормативні документи [1–3] визначають

основні підходи до оцінки технічного стану будівель і споруд, включаючи металеві конструкції. Аналіз наукових досліджень [8–12]] свідчить про актуальність та важливість вивчення питань довговічності таких веж, класифікації дефектів та систематизації статистичних даних щодо їх пошкоджень. Це є ключовою умовою для своєчасного прийняття рішень стосовно ремонту, реконструкції або заміни конструктивних елементів.

Метою дослідження є систематизація та узагальнення результатів оцінки технічного стану металевих несучих веж, що виконують функцію підтримки димових і вентиляційних труб промислових підприємств. Основна увага приділяється ідентифікації ключових типів дефектів і пошкоджень, їх класифікації за характером прояву та рівнем потенційної небезпечності, а також проведенню статистичного аналізу пошкоджуваності елементів конструкцій на основі натурних досліджень. Робота зосереджена на детальному аналізі впливу конструктивних характеристик, таких як форма поперечного перерізу елементів, на інтенсивність розвитку дефектів у конструкціях. Додатково вивчається обґрунтування ефективності окремих конструкторських рішень, що сприяють підвищенню довговічності споруд. Одним із ключових завдань є класифікація дефектів за рівнем їх небезпечності та визначення гранично допустимих значень на основі чинних нормативних документів, що дає можливість здійснити комплексну оцінку технічного стану об'єктів і розробити практичні рекомендації щодо усунення виявлених пошкоджень, а також зменшення ризику їх подальшого розвитку.

Результати. У процесі оцінювання технічного стану та здійснення експертиз, пов'язаних із промисловою безпекою, було проведено обстеження понад 25 металевих веж. У результаті цього було зафіксовано характерні види дефектів і пошкоджень.

На основі отриманих даних визначено основні типи дефектів і ушкоджень, притаманних металевим опорним конструкціям веж, призначеним для димових і вентиляційних труб:

– руйнування захисного лакофарбового покриття, яке охоплює понад 30 % площі поверхні елементів решітки, включає такі прояви, як тріщини, лущення, розшарування та відсутність антикорозійного шару (дефект 1, рис. 2);

– корозійне зношення елементів вежі, яке перевищує 10 % (дефект 2);

– елементи решітки, які були видалені в процесі експлуатації або не встановлені на етапі монтажу (дефект 3), можуть свідчити про порушення технологічних норм або недбалість під час проведення монтажних робіт;

– локальні деформації (згини) елементів решіткової конструкції вежі (дефект 4);



Рис. 2. Пошкодження захисного лакофарбового покриття, що перевищує 30 % загальної площі поверхні вежі



Рис. 3. Міжцілинна корозія виникла між парними кутиками розпірки вежі, що призвело до руйнування зварних швів



Рис. 4. Понаднормовий проміжок між елементом діафрагми вежі і ковзним упором труби

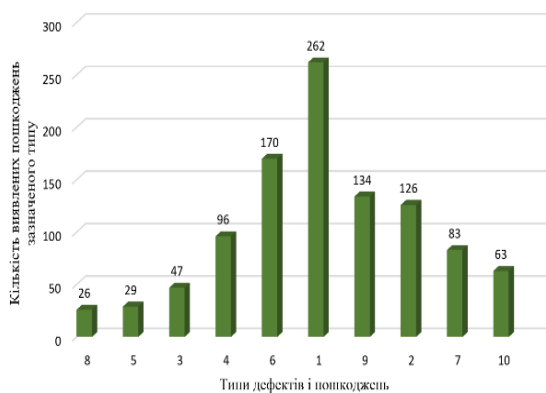


Рис. 5. Пошкоджуваність несучих конструкцій витяжних веж

- тріщини в зварних швах та руйнування зварних з'єднань кріплення елементів решітки (дефект 6, рис. 4);
- втрата стійкості фасонки опорних розкосів вежі (дефект);
- деформація несучих та огорожувальних елементів башти, а також анкерних болтів (дефект 9, рис. 5);
- міжщільнна (міжпакента) корозія елементів вежі (дефект 5, рис. 3);
- пошкодження опор на діафрагмах вежі, що утримують димову трубу у фіксованому положенні, а також значні проміжки між самою трубою та опорами (дефект 7, рис. 4);
- тріщини в бетоні фундаментів, руйнування бетону фундаменту та замонолічування несучої металевої балки під вежу (дефект 10).

Причини виникнення дефектів і пошкоджень у конструктивних елементах несучих веж здебільшого аналогічні до тих,

які спостерігаються у металевих трубах. Водночас вони вирізняються тим, що у замкнених елементах конструкції відсутній вплив температурних коливань і корозійних процесів зсередини.

Виявлені дефекти та пошкодження поділено за типами та розмірами, проведено статистичний аналіз частоти їх появи, а також побудовано відповідні діаграми (рис. 5).

Одним із найбільш типових видів пошкоджень елементів металевих гратчастих веж є деградація захисного лакофарбового покриття та утворення поверхневої корозії металу в конструкціях. Розподіл площі пошкоджень варіюється залежно від висоти споруди, що обумовлено різним рівнем агресивності впливу зовнішнього середовища (рис. 3).

Максимальні прояви корозійних уражень відзначаються в нижній частині вежі, у безпосередній близькості до промислових цехів і установок, де спостерігається найбільший рівень агресивності навколишнього середовища. У верхніх ділянках інтенсивність корозійних процесів поступово зменшується внаслідок зниження впливу агресивних факторів.

Тріщини та руйнування зварних швів, що забезпечують закріплення елементів решітки, зумовлені тривалим впливом динамічних вітрових навантажень, ставлять під загрозу структурну цілісність конструкції. Усунення таких дефектів має здійснюватися негайно після їх виявлення.

При експлуатації веж у середовищі з високою агресивністю (швидкість корозії близько 1 мм на рік) продукти корозії, що накопичуються в міжщільнному просторі, можуть призводити до руйнування зварних швів (рис. 3).

Розбіжності між ковзним упором та елементами діафрагми труби, що перевищують проектні показники, під впливом вітряних навантажень і зміни температур можуть призвести до їх виведення з експлуатації та втрати стійкості конструкції труби (рис. 4).

Втрату стійкості фасонки опорних розкосів вежі зазвичай спричиняють вібраційні навантаження та конструктивні

недоліки вузлів. Такий дефект може призвести до втрати стійкості як окремого елемента, так і всієї конструкції вежі. При виявленні цієї проблеми необхідно негайно здійснити посилення фасонки.

Руйнування бетонних фундаментів спричиняється корозією арматури та хомутів через недостатню морозостійкість і водонепроникність бетону.

Корозійний знос металевих конструкцій несучих веж у процесі тривалої експлуатації значною мірою визначається формою поперечного перерізу їхніх елементів. На основі польових обстежень витяжних веж виконано аналіз ушкоджень елементів із різними типами перерізів, у яких рівень корозійного зносу перевищує 10 %.

У дослідженні розглядалися елементи з такими типами поперечного перерізу: круглий (замкнений) із труб, тавровий та хрестовий із кутиків, а також елементи, виготовлені з прокатних двотаврів, швелерів і зварних двотаврових профілів. На рисунку 6 представлено діаграму пошкоджуваності елементів веж з різними типами поперечного перерізу за умови корозійного зносу понад 10 %.

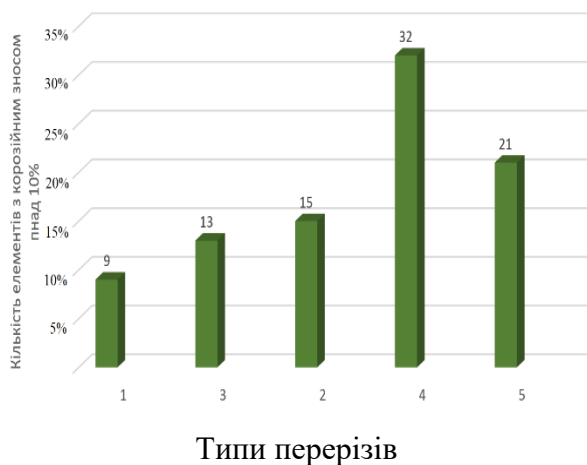


Рис. 6. Ступінь пошкодження елементів вежі з різними поперечними перерізами при корозії, яка перевищує 10 %:

1 – елементи трубчатого перерізу; 2 – елементи таврового перерізу; 3 – елементи хрестового перерізу з кутиків; 4 – елементи двотаврового складеного перерізу; 5 – елементи з прокатних двотаврів і швелерів

Варто зазначити, що аналіз цих даних ускладнюється різною кількістю веж з

неоднаковими типами перерізів поясів, а також розбіжностями у тривалості та умовах їх експлуатації. Незважаючи на це, результати однозначно свідчать, що елементи з круглим перерізом демонструють найнижчий рівень корозійного зносу, тоді як найбільші пошкодження виявлено у таврових і хрестових елементів, виготовлених із кутиків. Це підтверджує доцільність застосування круглого замкненого перерізу для несучих елементів поясів веж, що гарантує рівностійкість та високу корозійну стійкість.

На підставі результатів обстежень металевих веж усі виявлені недоліки й руйнування були класифіковані з огляду їхнього технічного стану, категорії небезпеки і залежно від цих показників визначені їх гранично допустимі величини та узагальнені у вигляді таблиці 1 [3].

У таблиці подано способи виявлення та типові ознаки виникнення дефектів і руйнувань, а також описано заходи, спрямовані на запобігання їх подальшому прогресуванню. Усі зареєстровані дефекти та руйнування класифіковано за трьома категоріями небезпеки - «А», «Б» та «В»

На підставі даних таблиці можна зробити висновок, що наявність дефектів категорії «В» вказує на перший (I, нормальний) або другий (II, задовільний) технічний стан конструкції. Виявлення ж дефектів категорії «Б» свідчить про третій стан (III, непридатність до нормальної експлуатації).

Дефекти категорії «А» визначають аварійний технічний стан конструкції. До цієї категорії належать найбільш небезпечні пошкодження, що безпосередньо загрожують цілісності та несучої здатності металевих веж.

До категорії «А» віднесено:

– корозійний знос несучого металу загалом > 30 %; локальна інтенсивна корозія зі зносом > 70 % у найбільш навантажених та вразливих вузлах: опори, фланці, кріплення допоміжних конструкцій (світлофорних майданчиків, драбин);

Таблиця 1

**Дефекти та пошкодження металевих веж, що підлягають контролю,
та їх гранично допустимі величини**

№ п/п	Дефекти або пошкодження	Гранично допустимі значення при технічному стані			
		Нормальному (I)	Задовільному (II)	непридатному для нормальної експлуатації(III)	аварійному (IV)
		Категорії небезпечності дефектів			
		«В»		«Б»	«А»
1	Відхилення осі вежі f від вертикалі	$f \leq (0,006-0,008)H$	$f \leq 0,006-0,008)H$	Встановлюється розрахунком	Значення більші розрахункових
2	Тріщини в основному металі і зварних швах елементів веж	Не допускаються			Наявні
3	Вм'ятини на поверхні елементів вежі, відхилення від проектних розмірів	Не більше 1 % розміру у розглядуваному перерізі	Встановлюються розрахунком		Значення більші розрахункових
4	Корозійний знос елементів вежі в опорній частині, у зоні фланцевих з'єднань, у місцях кріплення світлофорних майданчиків і драбин	Не допускається	До 15 % площі перерізу елемента	Встановлюється розрахунком	Понад 50 % площі перерізу елемент
5	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби	Не допускаються	Не допускаються	Наявні	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби
6	Руйнування антикорозійного покриття	Не допускається	До 40 % площі покриття	Понад 40 % площі покриття	100 % площі покриття
7	Пошкодження горизонтальних ковзних упорів (труби у вежі)	Не допускається	Не більше одного	Не більше двох на різних рівнях	Два і більше на одному рівні, більше двох на різних рівнях

– наявність тріщин та наскрізних пошкоджень: тріщини в основному металі несучого елемента; тріщини в зварних швах (кріпильних, монтажних, конструктивних); наскрізні отвори або розриви в тілі елементів вежі, що виникли внаслідок корозії чи механічного пошкодження;

– зріз болтів, що виконують несучу функцію в з'єднаннях елементів;

– втрату локальної стійкості (випирання) фасонки та стержневих елементів;

– дефекти або руйнування горизонтальних ковзних упорів, що

забезпечують фіксацію стовбура труби в металевій вежі;

– дефекти або руйнування вузлів підвісу (опорних вузлів) в основі вежі та елементів демпфіруючих пристроїв (гасителів коливань).

Критичні дефекти категорії «А», що загрожують руйнуванням, необхідно усувати негайно.

Усування дефектів та пошкоджень категорії «В», а також окремих незначних дефектів категорії «Б», проводиться на підставі технічної документації, розробленої проектно-конструкторськими підрозділами експлуатуваної організації.

Ліквідація дефектів категорії «А» та пошкоджень категорії «Б» з ризиком швидкого переходу до вищої категорії здійснюється виключно за проектно-кошторисною документацією на капітальний ремонт, розробленою профільними організаціями після комплексного технічного обстеження всіх вузлів та елементів вежі.

Висновки

На основі аналізу результатів численних обстежень металевих несучих веж димових та вентиляційних труб було виявлено та класифіковано основні типи дефектів і пошкоджень, що виникають внаслідок тривалої експлуатації під впливом силових, динамічних, температурних навантажень та корозійних факторів.

Проведено класифікацію та подальший статистичний аналіз основних дефектів і

пошкоджень елементів металевих несучих веж та їх залізобетонних фундаментів за характером прояву та величиною.

Отримані дані були систематизовані відповідно до категорій технічного стану конструкції та категорій небезпечності виявлених дефектів.

Для кожної категорії технічного стану та кожного рівня небезпечності були встановлені гранично допустимі значення параметрів дефектів і пошкоджень.

Результати досліджень дозволяють обґрунтувати можливість подальшої безпечної експлуатації несучих металевих веж, встановити гранично допустимі параметри пошкоджень для різних категорій технічного стану та небезпечності, а також забезпечити їх довговічність у складних експлуатаційних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування зі зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 105 с.
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд із зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 36 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування із зміною № 1 та № 2. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2020. 72 с.
4. ДСТУ 9273:2024. Настава щодо обстеження будівель та споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, 2024.
5. Яровий С. М., Савицький М. В., Слободянюк С. О. Забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. *Опір матеріалів та теорія споруд*. Вип. 106. Київ : КНУБА, 2021. С. 120–146.
6. Яровий С. М., Ярова О. В. Довговічність металевих димових і вентиляційних труб за критеріями механіки руйнування. *Науковий вісник будівництва*. Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2021. Вип. 3 (105). С. 115–122.
7. Яровий С. М., Яровий Ю. М., Титюк А. О., Данильченко О. О. Пошкоджуваність металевих вентиляційних і димових труб та їх статистичний аналіз. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 6 (030). С. 149–155.
8. Pisarek Z. Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 99. Pp. 45–53.
9. Ellingsen O. M., Larsen T., Skallerud B., Hjorth-Hansen E. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. Vol. 233. Article 105310.
10. Malik A. U., Al-Muaili F., Al-Ayashi M., Meroufel A. An Investigation on the Corrosion of Boiler Stack Components in Aggressive Environments. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 1. Pp. 200–208.
11. Cook R., Henshall J. Inspection and Condition Assessment of Tall Steel Chimneys and Lattice Towers. *Structural Engineering International*. 2018. Vol. 28, issue 3. Pp. 345–352.
12. Holický M., Marková J. Reliability Assessment of Existing Steel Structures Based on Inspection Data. *Engineering Structures*. 2014. Vol. 68. Pp. 59–67.

REFERENCES

1. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya zi zminoyu № 1* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Standard design from change no. 1]. Kyiv : Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022, 105 p. (in Ukrainian).

2. *DBN V.1.2-14:2018. Zahal'ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud iz zminoyu № 1* [DBN V.1.2-14:2018. The fundamental principles of ensuring reliability and constructive safety continued to emerge from change no. 1]. Kyiv : Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022, 36 p. (in Ukrainian).
3. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya iz zminoyu № 1 ta № 2. Chinniy z 2007-07-01* [DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya and pour in. Design standards based on changes no. 1 and no. 2. Valid from 2007.07.01]. Kyiv : Ministry of Regional Development and Life of Ukraine, 2020, 72 p. (State Standards of Ukraine). (in Ukrainian).
4. *DSTU 9273:2024. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' ta sporud dlya vyznachennya ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu* [DSTU 9273:2024. Installance of careful development of materials for the identification and assessment of their technical state]. Kyiv, 2024. (in Ukrainian).
5. Yarovy S.M., Savytskyi M.V. and Slobodyanyuk S.O. *Zabezpechennya nadiynosti metalevykh dymovykh i ventilyatsiynikh trub ta yikh nesuchykh vezh* [Ensuring the Reliability of Metal Smoke and Ventilation Pipes and Their Supporting Towers]. *Opir materialiv ta teoriya sporud* [Strength of Materials and Theory of Structures]. Issue 106, Kyiv : KNUBA, 2021, pp. 120–146. (in Ukrainian).
6. Yarovy S.M. and Yarova O.V. *Dovhovichnist' metalevykh dymovykh i ventilyatsiynikh trub za kryteriyamy mekhaniky ruynuvannya* [Durability of Metal Smoke and Ventilation Pipes According to the Criteria of Fracture Mechanics]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. Issue 3 (105), Kharkiv : KhNUBA, KHOTV ABU, 2021, pp. 115–122. (in Ukrainian).
7. Yarovy S.M., Yarovy .Yu.M., Tytyuk A.O. and Danylchenko O.O. *Poshkodzhuvanist' metalevykh ventilyatsiynikh i dymovykh trub ta yikh statystychnyy analiz* [Damageability of metal ventilation and chimney pipes and their statistical analysis]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2025, no. 6 (030), pp. 149–155. (in Ukrainian).
8. Pisarek Z. Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 99, pp. 45–53.
9. Ellingsen O.M., Larsen T., Skallerud B. and Hjorth-Hansen E. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023, vol. 233, article 105310.
10. Malik A.U., Al-Muaili F., Al-Ayashi M. and Meroufel A. An Investigation on the Corrosion of Boiler Stack Components in Aggressive Environments. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. 2013, vol. 1, pp. 200–208.
11. Cook R. and Henshall J. Inspection and Condition Assessment of Tall Steel Chimneys and Lattice Towers. *Structural Engineering International*. 2018, vol. 28, iss. 3, pp. 345–352.
12. Holický M. and Marková J. Reliability Assessment of Existing Steel Structures Based on Inspection Data. *Engineering Structures*. 2014, vol. 68, pp. 59.

Надійшла до редакції: 11.02.2026.

Прийнято після рецензування: 10.04.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.