

УДК 624.012

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.149.1218

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ І ДИМОВИХ ТРУБ ТА ЇХ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ

ЯРОВИЙ С. М.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
ЯРОВИЙ Ю. М.², канд. техн. наук, доц.,
ТИТЮК А. О.³, канд. техн. наук, доц.,
ДАНИЛЬЧЕНКО О. О.⁴, аспір.

^{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, ORCID ID: 0000-0003-2886-9456

² Кафедра теоретичної і будівельної механіки Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +380 (63) 611-76-30, e-mail: yriy.yarovyy@kname.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-1951-9798

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, ORCID ID: 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, ORCID ID: 0009-0003-9434-8920

Анотація. Постановка проблеми. Металеві димові та вентиляційні труби становлять критичний структурний компонент технологічних систем промислових підприємств, від надійності яких безпосередньо залежить неперервність виробничих процесів. У процесі тривалої експлуатації ці інженерні конструкції перебувають під постійним впливом складного комплексу деструктивних факторів, включаючи інтенсивні силові навантаження, динамічні коливання, агресивне корозійне середовище та суттєві температурні деформації. Комплексний вплив зазначених чинників несприятливо позначається на експлуатаційній надійності та довговічності труб, що з плином часу призводить до виникнення, накопичення та прогресування різноманітних дефектів та пошкоджень. За результатами численних обстежень технічного стану металевих димових та вентиляційних труб було здійснено систематизацію та класифікацію виявлених дефектів відповідно до їхнього типу, розміру та ступеня небезпеки. Статистична обробка даних дала змогу виявити закономірності пошкоджуваності, визначити найпоширеніші категорії дефектів та оцінити ступінь їхньої потенційної загрози для безпеки виробничих процесів. Крім того, у дослідженні розроблено класифікацію пошкоджень за рівнями небезпеки, що служить основою для ухвалення своєчасних рішень стосовно ремонту або реконструкції труб. Розроблені практичні заходи для усунення наявних дефектів, а також профілактичні методи, спрямовані на запобігання їх подальшій появі дефектів. Реалізація таких підходів буде сприяти підвищенню надійності та стабільності роботи промислових підприємств, зменшенню ризику аварій і продовженню експлуатаційного терміну металевих димових та вентиляційних труб.

Ключові слова: металеві димові та вентиляційні труби; пошкоджуваність конструкцій; категорії небезпечності; статистичний аналіз пошкоджень; надійність і довговічність

DAMAGEABILITY OF METAL VENTILATION AND SMOKE PIPES AND THEIR STATISTICAL ANALYSIS

YAROVYI S.M.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
YAROVYI Yu.M.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, ORCID ID: 0000-0003-2886-9456

² Department of Theoretical and Structural Mechanics, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +380 (63) 611-76-30, e-mail: yriy.yarovyy@kname.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-1951-9798

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, ORCID ID: 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, ORCID ID: 0009-0003-9434-8920

Abstract. Problem statement. Metal smoke and ventilation pipes are essential components in the operation of many technological processes at industrial enterprises, and their failure often leads to a complete shutdown of production. Throughout their long service life, these structures are continuously exposed to various factors: mechanical and dynamic loads, aggressive corrosive environments, as well as significant temperature fluctuations. The combined influence of these conditions adversely affects the operational reliability and durability of the pipes, eventually causing the formation, accumulation, and progression of different types of defects and damages. Based on the results of numerous inspections of the technical condition of metal smoke and ventilation pipes, the identified defects were systematized and classified according to their type, size, and hazard level. Statistical analysis of the collected data made it possible to establish patterns of damage occurrence, highlight the most common defect categories, and assess the potential risk they pose to the safety of industrial processes. Furthermore, a classification of damages according to hazard levels has been developed, forming the basis for timely decision-making regarding repair or reconstruction of the pipes. Practical measures have been proposed for eliminating existing defects, as well as preventive methods aimed at avoiding their further development. Implementation of these approaches will improve reliability and continuity of industrial operations, reduce accident risks, and extend the service life of metal smoke and ventilation pipes.

Keywords: metal smoke and ventilation pipes; structural damage; hazard categories; statistical analysis of damage; reliability and durability

Постановка проблеми. Металеві димові та вентиляційні труби є важливими елементами промислових підприємств, функцією яких є відведення димових та вентиляційних газів, що утворюються в процесі виробництва (рис. 1).



Рис. 1. Металеві димові труби КС «Південнобузька» магістрального газопроводу. Корозійний знос стовбурів труб до 5 %

У процесі тривалої експлуатації ці конструкції зазнають комплексу несприятливих факторів, таких як динамічні та силові навантаження, перепади температур й вплив агресивних корозійних середовищ [1–5; 10; 11].

Додатковим ускладненням для їх технічного стану є функціонування в умовах

складного напруженого стану, що з часом призводить до неминучих погіршень експлуатаційних характеристик. Сукупна дія зазначених факторів поступово призводить до виникнення та накопичення різноманітних дефектів та скорочує довговічність конструкцій [6; 7].

Найнебезпечніші пошкодження металевих конструкцій проявляються у вигляді тріщин у металі стовбура труби, деформацій, корозійного зносу опорних елементів та руйнуванні зварних швів. Розвиток подібних дефектів підвищує ризик виходу з ладу не лише окремих конструктивних частин, а й усієї споруди загалом, що може призвести до серйозних наслідків для безпеки виробництва та довкілля.

Попри важливість цієї проблеми, науково-технічна література містить лише фрагментарну інформацію щодо пошкоджуваності димових металевих труб та несучих веж. Відсутні систематизованих статистичних даних щодо закономірності, характеру та масштабів виникнення дефектів і пошкоджень у таких висотних конструкціях. Конструкціях істотно ускладнює розроблення науково обґрунтованих рішень щодо подовження терміну експлуатації, удосконалення

ремонтних технологій та підвищення їхньої надійності та довговічності.

У цьому контексті особливо важливим стає завдання ідентифікації та систематизації основних видів пошкоджень і дефектів металевих димових та вентиляційних труб. Їх подальша класифікація та статистичний аналіз дозволяють не визначити технічний стан контрукцій, а й спрогнозувати потинційний розвиток руйнувань [8; 12]. На основі обстеження більш ніж 150 металевих труб виконано класифікацію за видами та ступенем інтенсивності прояву дефектів, що формує базу для подальшого вдосконалення діагностичних методик і підвищення надійності таких інженерних споруд.

Мета дослідження – полягає в аналізі результатів технічного обстеження металевих вентиляційних димових труб, що відносяться до різних контруктивних типів та відрізняються умовами експлуатації. Завдання включає виявлення найпоширеніших дефектів і пошкоджень, їх систематизацію, класифікацію та оцінку рівня небезпечності.

Результати. У ході технічного обстеження значної кількості металевих димових і вентиляційних труб встановлено основні типи дефектів та пошкоджень:

- лакофарбове покриття зруйновано більше ніж на 30 % від площі поверхні та подальший корозійний знос металу (пошкодження 1) (рис.1);
- зменшення товщини стінки до 10 % через корозійний знос (пошкодження 2, рис. 2);
- локальні, виразкові та наскрізні корозійні пошкодження стінки (пошкодження 3);
- тріщини в навколошовній зоні та основному металі зварних швів (пошкодження 4, рис. 3);
- у зварних швах присутні підрізи, непровари, шлакові включення та пори (пошкодження 5);
- болтові з'єднання, включаючи анкерні ослаблені або пошкоджені (пошкодження 6);

- виникнення пошкоджень в ребрах жорсткості, траверсах і плитах опорних вузлів (пошкодження 7);

- пошкоджені металеві опори під труби (пошкодження 8);

- локальна втрата стійкості стовбура труби (пошкодження 9);

- в бетоні фундаментів присутні тріщини, що призводять до корозії робочої арматури (пошкодження 10).



Рис. 2. Корозійний знос з середини труби факельної установки понад 10 % перерізу



Рис. 3. Тріщини в основному металі, зварних швах і навколошовній зоні

На основі проведених обстежень виконано статистичний аналіз та побудована діаграма, що відображає загальну вибірку виявлених дефектів і пошкоджень (рис. 4).

Виникнення та розвиток дефектів і пошкоджень обумовлений сукупним впливом температурних, вітрових, експлуатаційних та корозійних чинників.

Однак кожен вид пошкоджень має свій основний фактор впливу.

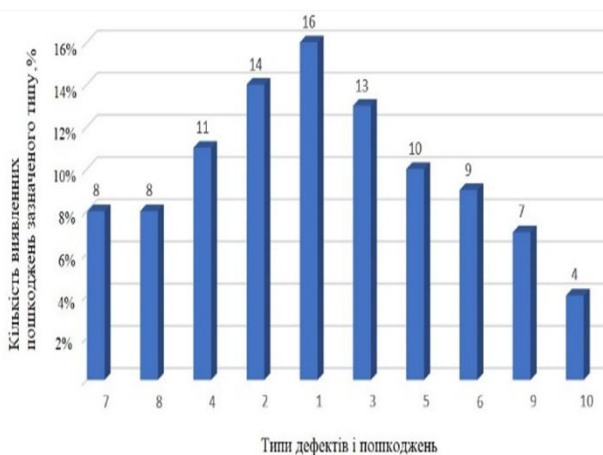


Рис. 4. Пошкоджуваність металевих стовбурів димових труб

Локальні, виразкові та наскрізні корозійні ураження стінки, що призводять до повної втрати товщини, тріщини в основному металі, зварних швах і навколошовній зоні а також локальна втрата стійкості стовбура труби спричинені переважно корозійними, температурними та динамічними впливами.

Такі дефекти як підрізи, непровари, шлакові включення та пори в зварних з'єднаннях є наслідком недостатньої якості монтажних робіт.

Пошкодженні анкерні болти, ребера, плити і траверси в опорних вузлах, пошкодження металевих опор під трубу, прояви корозії є результатом незадовільного рівня експлуатації системи.

Наскрізні корозійні пошкодження стінок стовбура труби (пошкодження 3), тріщини в основному металі та зварних швах (пошкодження 4), утрата стійкості стовбура (пошкодження 9) належать до дефектів, що створюють прямий ризик руйнування конструкції. Ці пошкодження потребують негайного усунення одразу після виявлення. Вони класифікуються як категорія небезпечності «А», а їх частка становить 31 % від загальної кількості виявлених дефектів.

До категорії небезпечності «Б» належать дефекти і пошкодження (дефекти 2, 5, 6, 7, 8, 10), які в разі подальшого розвитку можуть перетворитися на критичні

й призвести до серйозних наслідків. Усунення цих пошкоджень рекомендується виконати під час планового ремонту. Від загальної вибірки такі дефекти складають 54 %.

Руйнування захисного лакофарбового покриття (дефект 1) носить локальний характер і не загрожує несучій здатності труби. Виявлені пошкодження підпадають під категорію небезпечності «В» і мають бути усунені в рамках планового ремонту. За результатами обстежень, даний тип пошкоджень складає 16 % від загального числа дефектів і пошкоджень.



Рис. 5. Випинання (утрата стійкості) кладки футеровки димової труби

Оцінювання технічного стану внутрішньої футеровки димових та вентиляційних труб здійснювалося шляхом проведення обстежень із різних точок доступу. Для цього використовувались вхідні люки в днищі труби, верхня частина (оголовок), та спеціальні люльки-ліфти, закріплені на оголовку та розташовані всередині стовбура. У процесі досліджень були виявленні характерні дефекти та пошкодження футеровки металевих димових труб:

- відсутня або пошкоджена теплоізоляція (пошкодження 1);
- проміжки між ланками футеровки труби (пошкодження 2);
- похилі та вертикальні тріщини у футеровці труби (пошкодження 3);
- локальні руйнування футеровочного шару (пошкодження 4);

- руйнування слізникових консолей (пошкодження 5);

- випинання або обвалення кладки футеровки (пошкодження 6) (рис. 5).

На рисунку 6 представлена діаграма, яка демонструє статистичні дані про пошкодження футеровки металевих димових і вентиляційних труб.

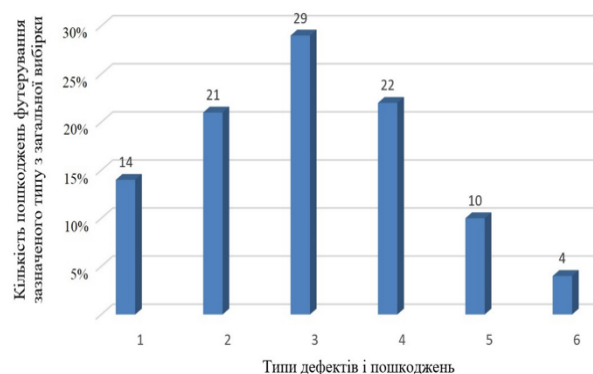


Рис. 6. Пошкоджуваність футеровки металевих димових труб

Таблиця 1

Характеристика основних дефектів і пошкоджень димових і вентиляційних труб

№ п/п	Вид і місце розташування дефекту і пошкодження	Ймовірна причина виникнення дефекту і пошкодження	Метод виявлення або ознака виникнення дефекту чи пошкодження	Заходи щодо попередження подальшого розвитку дефекту і його усунення	Категорія небезпечності
1	Нахил фундаменту димової труби більше допустимого значення	Порушення несучої здатності фундаменту	Вимірювання нахилу геодезичним методом	Укріплення основи. Випрямлення нахилу металевої труби	«А»
2	Тріщини в основному металі і швах	Мікротріщини у зварних швах, динамічні впливи вітрового навантаження	Візуальне й інструментальне обстеження	Ремонт основного металу або швів методом заварювання або підсилення накладками	«Б», «А»
3	Підвищена корозія ділянок стовбура, майданчиків і драбин (знос до 100%)	Концентратори утворення корозії. Локальна і виразкова корозія	Контроль корозійного зносу ультразвуковими приладами	Періодичність контролю корозійного зносу з урахуванням швидкості корозії в локальних зонах, ремонт стовбура заміною ділянок або підсилення	«А», «Б»
4	Наскрізні отвори у стовбурі труби	Корозійне руйнування металу через відсутність антикорозійного захисту	Візуальне й інструментальне обстеження	Ремонт стовбура, визначення несучої здатності стовбура з урахуванням ступеня зносу суміжних ділянок	«А», «Б»
5	Ослаблення затягнення болтів фланцевих стиків, анкерних болтів	Зниження затягнення болтів унаслідок релаксації матеріалу, динамічних впливів	Візуальне й інструментальне обстеження по слідам виходу конденсату димових газів	Перевірка ступеня затягнення болтів, контроль за збереженням ущільнення з'єднань царг і фрагментів труби	«Б»
6	Місцева втрата стійкості, випинання стінки стовбура, утворення гофр	Корозійний знос стінки стовбура в зоні деформації, підвищення температури експлуатації	Візуально, товщинометрія стовбура труби ультразвуковим приладом	Підсилення металевого стовбура обичайками або заміна ділянок труби	«А»
7	Обвалення футеровки	Вибух газу в газовідвідному тракті	Візуально, фотозйомка	Заміна футеровки	«А»

Температурні навантаження та силові впливи, включно з вибухами газу всередині труби, є основними факторами, що впливають на стан футерівки та спричиняють появу тріщин (дефект 3), локальних пошкоджень (дефект 4), випинання кладки (дефект 6), а також пошкодження теплоізоляції. До найбільш небезпечної категорії віднесено локальні наскрізні пошкодження футеровки та випинання чи обвалення кладки (дефекти 4 та 6). Ці пошкодження становлять суттєву загрозу руйнування всієї конструкції труби. За результатами обстежень, вони складають 43 % усіх виявлених дефектів та класифікуються як категорія небезпечності «А». У разі їх виявлення експлуатація труби повністю забороняється, виробничий процес необхідно негайно зупинити, а для відновлення працездатності споруди виконати капітальний ремонт. Вертикальні та похилі тріщини силового чи температурного походження у футеровці (дефект 3) зафіксовані у 29 % випадків. Якщо ширина розкриття таких тріщин не перевищує 0,3 мм, вони не представляють значної загрози несучим властивостям конструкції та належать до категорії «В». Їх усунення здійснюється шляхом замазування жаростійким цементним розчином з додаванням меленого шамоту. Проте з розвитком таких тріщин можливе випадіння окремих фрагментів кладки, пошкодження теплоізоляції та утворення прогарів у стовбурі труби, що може призвести до переходу дефектів у категорії «Б» або «А». Моніторинг розвитку таких пошкоджень здійснюється в рамках планових технічних оглядів, що проводяться періодично для своєчасного виявлення дефектів.

У таблиці 1 представлена інформація про основні дефекти та пошкодження, їхні характеристики, ймовірні причини виникнення, а також заходи, спрямовані на запобігання подальшому розвитку та усунення цих проблем. Також наведено категорію небезпечності дефектів для оцінки їх потенційної загрози.

До окремої групи належать, що виникають у процесі будівельно-монтажних робіт, такі як відсутність теплоізоляції (дефект 1) та утворення проміжків між ланками футеровки (дефект 2). Через такі порушення відбувається конденсація вологи на внутрішній поверхні труб, що прискорює корозійне руйнування. Подібні дефекти усувають під час планового ремонту. Виправлення дефектів категорії «В», а також деяких пошкоджень початкової стадії категорії «Б» яку розробляють проектні або експлуатаційні організації. У свою чергу, усунення дефектів категорії «А» і пошкоджень категорії «Б», які можуть швидко перейти до категорії «А», потребує виконання капітального ремонту. Для цього спеціалізовані організації розробляють технічну документацію на основі комплексного обстеження всіх конструктивних елементів труби.

Висновки

На основі результатів численних обстежень металевих димових і вентиляційних труб визначено основні типи дефектів та пошкоджень як стовбурів, так і їх внутрішньої футеровки. Для виявлених пошкоджень здійснено класифікацію за характером прояву та величиною, а також проведено статистичний аналіз їх поширеності та ступеня небезпеки. Усі основні дефекти і пошкодження були систематизовані за кількома критеріями: залежно від категорії небезпечності, з урахуванням імовірних причин виникнення, а також з позиції їхнього впливу на подальший технічний стан конструкцій. Такий підхід дав змогу не лише оцінити загальний рівень пошкоджуваності труб, але й виявити закономірності у розвитку дефектів різного походження. Отримані результати формують науково обґрунтовану базу для підвищення надійності та довговічності металевих димових і вентиляційних труб, а також створюють передумови для подальшого вдосконалення методів оцінки їх технічного стану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування із 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. Настанова щодо обстеження будівель та споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, 2024.
5. Яровий С. М., Ярова О. В. Довговічність металевих димових і вентиляційних труб при загальній втраті стійкості труби і прогарам в стінці. *Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр.* Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2020. Вип. 3 (101). С. 112–117.
6. 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 : зб. наук. пр.* Вип. 106. Київ : КНУБА, 2021. С. 120–146.
7. Яровий С. М., Ярова О. В. Довговічність металевих димових і вентиляційних труб за критеріями механіки руйнування. *Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр.* Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2021. Вип. 3 (105). С. 115–122.
8. Яровий С. М., Данильченко О. О., Чередник Д. Л. Фізико статистичний метод оцінки довговічності металевих вентиляційних та димових труб. *Будівництво та цивільна інженерія : зб. наук. пр.* Харків, 2025. Вип. 4 (112). С. 394–301.
9. Zdzislaw Pisarek. Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. 2019.
10. Ellingsen Ø. M. and oth. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. 2023.
11. Malik Anees U., Al-Muaili Fahd, Al-Ayashi Mohammad, Meroufel A. An investigation on the corrosion of flue gas sensor in boiler stack. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. № 1. 2013. Pp. 200–208.
12. Ellingsen Øyvind 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. 233 p.

REFERENCES

1. DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya zi zminoyu № 1 [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards with amendment 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 pryntsyipy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud iz zminoyu № 1 [DBN V.1.2-14:2018. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures with amendment 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 [DBN V.1.2-2:2006. Loads and impacts. Design standards with amendments no. 1 and no. 2]. Kyiv : Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2020, 72 p. (in Ukrainian).
4. DSTU 9273:2024. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' ta sporud dlya vyznachennya ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu [DSTU 9273:2024. Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition]. Kyiv, 2024. (in Ukrainian).
5. Yarovyi S.M. and Yarova O.V. Dovhovichnist' metalevykh dymovykh i ventylyatsiynykh trub pry zahal'niy vtrati stiykosti truby i proharamy v stintsii [Durability of Metal Smoke and Ventilation Pipes under General Loss of Stability of the Pipe and Burnouts in the Wall]. *Naukovyy visnyk budivnytstva : zb. naukovykh prats'* [Scientific Bulletin of Construction : coll. of scient. works]. Kharkiv : KhNUBA, KHOTV ABU, 2020, iss. 3 (101), pp. 112–117. (in Ukrainian).
6. Yarovyi S.M., Savytskyi M.V. and Slobodyanyuk S.O. Zabezpechennya nadiynosti metalevykh dymovykh i ventylyatsiynykh trub ta yikh nesuchykh vezh [Ensuring the Reliability of Metal Smoke and Ventilation Pipes and Their Supporting Towers]. *Opir materialiv ta teoriya sporud : zb. nauk. pr.* [Strength of Materials and Theory of Structures : coll. of scient. works]. Kyiv : KNUBA, 2021, iss. 106, pp. 120–146. (in Ukrainian).
7. Yarovyi S.M. and Yarova O.V. Dovhovichnist' metalevykh dymovykh i ventylyatsiynykh trub za kryteriyamy mekhaniky ruynuvannya [Durability of Metal Smoke and Ventilation Pipes According to the Criteria of Fracture Mechanics]. *Naukovyy visnyk budivnytstva : zb. naukovykh prats'* [Scientific Bulletin of Construction : coll. of scient. works]. Kharkiv : KhNUBA, KHOTV ABU, 2021, iss. 3 (105), pp. 115–122. (in Ukrainian).
8. Yarovyi S.M., Danylchenko O.O. and Cherednyk D.L. Fyzyko statystychnyy metod otsinky dovhovichnosti metalevykh ventylyatsiynykh ta dymovykh trub [Physico-Statistical Method for Assessing the Durability of Metal

Ventilation and Smoke Pipes]. *Budivnytstvo ta tsyvil'na inzheneriya : zb. naukovykh prats'* [Construction and Civil Engineering : coll. of scient. Works]. Kharkiv, 2025, iss. 4 (112), pp. 394–301. (in Ukrainian).

9. Zdzislaw Pisarek Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. 2019.

10. Ellingsen Ø. M. and oth. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. 2023.

11. Malik Anees U., Al-Muaili Fahd, Al-Ayashi Mohammad and Meroufel A. An investigation on the corrosion of flue gas sensor in boiler stack. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. No. 1, 2013, pp. 200–208.

12. Ellingsen Øyvind 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, 233 p.

Надійшла до редакції: 22.10.2025.