

УДК 624.046.2: 628.014

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ

**С.М. Яровий<sup>1</sup>**,  
д-р техн. наук, професор

**М.В. Савицький<sup>2</sup>**,  
д-р техн. наук, професор

**С.О. Слободянюк<sup>2</sup>**,  
д-р техн. наук, професор

<sup>1</sup>*Харківський національний університет будівництва і архітектури, Харків*

<sup>2</sup>*ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро*

DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.176-200

Проблема забезпечення надійності в роботі металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж в останній час здобула особливу значимість в зв'язку з великою кількістю випадків аварій на промислових підприємствах. Це пов'язано з тим, що багато металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж випрацювала свій проектний ресурс (50 років), під час експлуатації утворилось багато дефектів та пошкоджень. Все це потребує проведення діагностики і визначення дійсного технічного стану конструкцій, оцінки довговічності і залишкового ресурсу, виконання ремонтних робіт і забезпечення нормальної експлуатації або надійності таких споруд.

**Ключові слова:** металеві димові і вентиляційні труби, несучі вежі, надійність, навантаження, впливи, пошкодження, напруження, деформації, довговічність, залишковий ресурс.

**Вступ.** Забезпечення надійності є одним із основних завдань при проектуванні, будівництві і експлуатації будівель та споруд. В останній час проблеми надійності для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж здобула особливу значимість в зв'язку з великою кількістю випадків аварій на промислових підприємствах в Україні та закордоном.

Крім того, велика кількість металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж випрацювала свій проектних ресурс (50 років), під час експлуатації змінився режим їх роботи, підвищились навантаження та утворилось багато дефектів та пошкоджень. Все це потребує негайного проведення діагностики і визначення дійсного технічного стану конструкцій, проведення аналізу їх надійності.

**1. Постановка задачі. Аналіз публікацій.** Забезпечити надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, що експлуатуються тривалий час в складних умовах. Їх забезпечення, як правило, проводиться на основі здобутих даних при технічному обстеженні, визначенні причин виникнення пошкоджень і прогнозування їх розвитку, оцінці довговічності і залишкового ресурсу, виконанні ремонтних робіт і забезпеченні нормальної експлуатації. В основі

методології управління старінням металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж прийняті основні положення теорії надійності структурно-складних механічних систем, що взаємодіють із зовнішнім середовищем.

Визначаюче значення при оцінці надійності димових і вентиляційних труб та їх несучих веж має вихідна інформація про геометричні характеристики конструкцій, дійсні навантаження та розподіл зусиль, інформація про технічний стан та виявленні дефекти та пошкодження, чутливість металу конструкцій до динамічних, температурних і корозійних впливів і т.п.

Розвитку сучасних методів розрахунку і забезпеченню надійності будівельних конструкцій, будівель і споруд присвятили свої праці відомі вітчизняні вчені, такі як: М.С. Барабаш [1], О.П. Воскобойнік [2], О.С. Городецький, Є.А. Єгоров, А.І. Лантух-Лященко, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пічугін [3], В.А. Пашинський [11], М.В. Савицький [12], Т.В. Нікіфорова [10], В.О. Семко [14], О.В.Семко і інші.

У відомих роботах не наводяться дані щодо оцінок надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, не розроблені методи оцінки довговічності та залишкового ресурсу таких конструкцій.

**2. Загальна методологія оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.** В основі методології управління старінням металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж (МДВТіНВ) прийняті основні положення теорії надійності структурно-складних механічних систем, що взаємодіють із зовнішнім середовищем. Складовими частинами розробленої методології є [19]:

- загальна методологія управління старінням і продовження терміну експлуатації металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж (МДВТіНВ);

- класифікація впливів середовища експлуатації МДВТіНВ і методи оцінки їх впливу на розвиток процесів старіння матеріалів елементів МДВТіНВ;

- процедури моніторингу, діагностики, методи виявлення процесів старіння матеріалів елементів МДВТіНВ, включаючи руйнівний і неруйнівний контроль матеріалів;

- процедура аналізу та оцінки технічного стану МДВТіНВ;

- методики прогнозу кінетики розвитку процесів деградації матеріалів МДВТіНВ, їх впливу на зміну будівельно-технічних властивостей матеріалів і функціональних властивостей МДВТіНВ;

- підходи до розробки додаткових заходів щодо впливу на процеси деградації МДВТіНВ в результаті старіння;

- порядок організації, планування та реалізації додаткових заходів щодо управління старінням МДВТіНВ.

Основні терміни та визначення понять і показників, прийнятих в теорії надійності, а також методи їх розрахунку прийняті відповідно до нормативних документів [15], [16].

Надійність - властивість конструкцій зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих умовах експлуатації при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Надійність є комплексним поняттям і включає властивості безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності і зберігання.

Безвідмовність - властивість конструкції безупинно зберігати працездатність протягом деякого періоду часу.

Кількісними показниками безвідмовності є ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов.

Ймовірність безвідмовної роботи - ймовірність того, що в заданому інтервалі часу не виникає відмова конструкції:

$$P(t) = P\{T > t\}, \quad (1)$$

де  $t$  - поточний час;  $T$  - термін служби.

Ймовірність відмови:

$$F(t) = 1 - P(t). \quad (2)$$

Щільність розподілу ймовірності відмови:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}. \quad (3)$$

Інтенсивність відмов - умовна щільність ймовірності виникнення відмов, визначається для даного моменту часу за умови, що до цього моменту відмова не виникла:

$$h(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (4)$$

Довговічність - властивість конструкції зберігати працездатність до настання граничного стану (відмови), тобто протягом усього періоду експлуатації при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту.

Кількісними показниками довговічності є середній термін служби, гамма-процентний термін служби (ресурс).

Середній термін служби  $\bar{T}$  - математичне очікування тривалості від початку експлуатації конструкції до досягнення граничного стану.

Гамма-процентний термін служби (ресурс)  $T_\gamma$  - тривалість експлуатації, протягом якої конструкція досягає граничного стану із заданою ймовірністю  $\gamma$ , вираженою у відсотках.

Дані про безвідмовність, що містяться в точкових показниках  $\bar{T}$ ,  $T_\gamma$  менш інформативні, ніж інформація про будь-яку з функцій  $P(t)$ ,  $F(t)$ ,  $f(t)$ ,  $h(t)$ . Зазначені функції є функціями часу, кожна з яких однозначно характеризує розподіл випадкової величини (терміну служби). Знаючи одну з функцій, можливо обчислити всі інші.

Функції  $P(t)$  і  $F(t)$  являють собою інтегральні характеристики. Так як вони монотонні для будь-яких законів розподілу, то часто неможливо виявити особливість різних типів законів розподілу.

Функція  $f(t)$  є більш інформативною і характеризує різні властивості розподілу (розташування області можливих значень на осі часу, наявність і розподіл найбільш ймовірних значень, ступеня розсіювання, симетричності і ін.).

Функція  $h(t)$  являє собою узагальнену характеристику розподілу, яка несе інформацію відразу про дві функції  $f(t)$  і  $P(t)$ , або  $F(t)$ . Тому функція інтенсивності відмов є ще більш виразною характеристикою закону розподілу в порівнянні з  $f(t)$ . Функція  $h(t)$  є одним з найважливіших критеріїв при виборі теоретичної моделі розподілу терміну служби.

Показники надійності експлуатованих будівельних конструкцій, що експлуатуються, можливо отримати чотирма основними методами: 1) статистичним; 2) фізико-статистичним; 3) експертних оцінок; 4) випробування навантаженням.

Статистичний метод полягає в накопиченні та обробці даних про відмови масових однотипних конструкцій. Так як відмов будівельних конструкцій за першою групою граничних станів зазвичай не допускають, то отримати статистику відмов будівельних конструкцій за першою групою граничних станів не представляється можливим. Можливе отримання закономірностей відмов конструкцій тільки за другою групою граничних станів (наприклад, прогини і ін.). Тому в подальшому для управління старінням будівельних конструкцій МДВТіНВ цей метод не використовується.

Фізико-статистичний метод оцінки і прогнозу надійності будівельних конструкцій заснований на вивченні фізико-хімічних і механічних процесів деградації матеріалів, що відбуваються під впливом зовнішнього несприятливого середовища експлуатації конструкцій («фізики відмов») і формуванні моделі відмов на основі отриманих закономірностей.

Метод експертних оцінок технічного стану конструкцій ґрунтується на реєстрації сукупності ознак зносу будівельних конструкцій і відповідно цими ознаками деякої інтегральної оцінки.

Метод випробування та оцінки технічного стану будівельних конструкцій навантаженням полягає в отриманні інформації, що дозволяє виконати оцінку випробувань конструкції шляхом порівняння фактичних результатів з контрольними. Головним змістом інформації є залежність між величиною деформації і навантаженням на всіх етапах навантаження і екстраполяції результатів до стадії руйнування.

В основу методології оцінки надійності і управління старінням металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж (МДВТіНВ) прийнятий фізико-статистичний метод.

**2.1. Фізико-статистичний метод оцінки надійності елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.** В основу фізико-статистичного методу оцінки надійності і довговічності конструкцій МДВТіНВ покладено такі передумови [20]:

1). У відповідності з дійсністю враховується розвиток деградаційних процесів в матеріалах конструкцій при несприятливому впливі середовища, тобто розрахунок конструкцій, що взаємодіють з середовищем, виконується з урахуванням кінетики розвитку процесів деградації матеріалів.

2). Вплив середовища оцінюється за критерієм впливу на функціональні властивості несучих конструкцій.

3). Фактор часу вводиться в розрахунок в явному вигляді: регламентується термін служби конструкцій або при заданих параметрах визначається довговічність конструкцій.

4). Розглядається надійність конструкції тільки за внутрішніми властивостями у припущенні, що граничне розрахункове значення навантаження або граничні значення показників, що регламентуються нормами проектування, забезпечують функціональну надійність.

5). Закладається принцип рівнонадійності конструкцій, що проектуються для різних умов експлуатації: до кінця терміну служби або міжремонтного періоду, конструкції, які проектуються для умов експлуатації при несприятливому впливі середовища повинні мати таку ж надійність, що і конструкції, які проектуються для нормальних умов експлуатації.

6). Процес деградації конструкцій, перехід з одного дискретного технічного стану в інший описується марковським процесом або процесом Пуассона з дискретними станами і безперервним часом.

Основою фізико-статистичного методу визначення, прогнозу і забезпечення надійності конструкцій є:

а) результати досліджень фізико-хімічних процесів зміни властивостей матеріалів конструкцій в часі при впливі несприятливих середовищ;

б) детерміновані залежності, що зв'язують показники властивостей конструкцій з їх параметрами і зовнішніми факторами - навантаженням і середовищем;

в) статистичні дані про мінливість параметрів, що визначають властивості конструкцій;

г) математичні методи теорії надійності, що дозволяють отримати розподіл випадкових функцій при відомих розподілах аргументів;

д) техніко-економічна та інша інформація, що обґрунтовує той чи інший рівень надійності властивості конструкцій.

Відмови механічних систем до яких відносяться металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі (конструкції) діляться на поступові (зносні) і раптові. Основною ознакою поступової відмови є те, що ймовірність його виникнення протягом заданого періоду часу від  $t_1$  до  $t_2$  залежить від тривалості попередньої роботи системи  $t_1$ . Основною

ознакою раптової відмови є незалежність ймовірності його виникнення протягом заданого періоду часу від  $t_1$  до  $t_2$ , від тривалості попередньої роботи системи  $t_1$ .

Далі розглядається надійність конструкцій тільки за внутрішніми властивостями в припущенні, що граничне розрахункове значення навантаження або граничні значення параметрів забезпечують функціональну безвідмовність. Отже, відмови конструкцій, що експлуатуються в умовах впливу несприятливих середовищ, можна віднести до категорії поступових. У загальному випадку, з урахуванням характеру дії навантаження, відмови будівельних конструкцій відносяться до складних відмов, які включають в себе особливості двох попередніх.

Залежність деякої властивості конструкцій МДВТІНВ від їх параметрів описується деякою системою рівнянь або алгоритмом:

$$y_j = y_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{mj}), \quad (5)$$

де  $y_j$  - властивість конструкцій МДВТІНВ,  $x_{ij}$  - розрахункові параметри конструкцій.

Вплив несприятливого середовища експлуатації призводить до зміни властивостей матеріалів, що призводить до зміни деяких розрахункових параметрів конструкцій. Внаслідок цього вони є функцією цілого ряду характеристик матеріалу, зовнішніх впливів середовища і часу  $t$ :

$$x_{pj} = x_{pj}(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, t). \quad (6)$$

В силу стохастичної природи характеристик матеріалів, впливів середовища, впливу технологічних факторів в процесі виробництва, транспортування і монтажу конструкцій їх параметри є випадковими величинами  $x_{ij}$  або випадковими функціями часу (6). В результаті цього і деяка властивість конструкції також буде випадковою функцією часу:

$$Y_j(t) = Y_j[X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{ij}, \dots, X_{pj}(Z_{1j}, Z_{2j}, \dots, Z_{lj}, t), \dots, X_{mj}]. \quad (7)$$

Умова функціональної придатності конструкцій МДВТІНВ задається у вигляді обмеження:

$$Y_j(t) \geq S_j(t), \quad (8)$$

де  $S_j(t)$  - граничне значення властивості, регламентований нормами проектування або величиною зовнішніх впливів. Ці обмеження виділяють область безвідмовної роботи.

Надійність конструкцій МДВТІНВ щодо параметричних відмов (тут маються на увазі вихідні, функціональні параметри або властивості) виражається ймовірністю задоволення умови:

$$P_j(t) = P[Y_j(t) \geq S_j(t)] = P[Y_j(t) - S_j(t) \geq 0]. \quad (9)$$

Задача визначення параметричної надійності конструкцій з тої чи іншої властивості зводиться до отримання  $m$ -мірної функції щільності розподілу випадкового процесу. Імовірність безвідмовної роботи визначається як  $m$ -мірний інтеграл від згаданої функції щільності розподілу:

$$P_j(t) = \iint \dots \int_{Y_j(t) - S_j(t) \geq 0} f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, \dots, x_{mj}, t) dx_{1j} dx_{2j} \dots dz_{1j} dz_{2j} \dots dz_{lj} \dots dx_{mj}. \quad (10)$$

Функція надійності  $P_j(t)$  характеризує не тільки безвідмовність, але і довговічність конструкцій. Термін служби визначається тривалістю експлуатації конструкцій до виходу їх властивостей за допустимі межі.

Отримати функцію (10) в явному вигляді найчастіше не представляється можливим, тому що неможливо виконати зворотне перетворення залежностей властивостей конструкцій щодо часу. Тому досить визначити параметричну надійність конструкцій після закінчення певного часу її експлуатації, тобто визначити  $P_j(t)$  для фіксованих моментів часу, або, інакше, дати точкову оцінку надійності. У цьому випадку завдання зводиться до отримання  $m$ -мірної функції розподілу випадкових величин

$$f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, \dots, z_{mj}) \quad (11)$$

в перетині випадкового процесу в заданий момент часу і обчисленню виразу:

$$P_j(t = t_k) = \iint \dots \int_{Y_j(t=t_k) - S_j(t=t_k) \geq 0} f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, \dots, x_{mj}, t) dx_{1j} dx_{2j} \dots dz_{1j} dz_{2j} \dots dz_{lj} \dots dx_{mj}. \quad (12)$$

Якщо відомі щільності розподілу властивостей конструкцій  $f(Y_j)_{t=t_k}$  і величин зовнішніх впливів  $f(S_j)_{t=t_k}$ , то вираз для визначення ймовірності безвідмовної роботи (за умови, що властивості конструкцій і зовнішні впливи незалежні) має вигляд:

$$P_j(t = t_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(S_j) \left[ \int_S^{\infty} f(Y_j) dy_j \right] dS_j. \quad (13)$$

При відсутності статистичних даних про зовнішні силові впливи або детерміновані величини граничних значень властивостей:

$$P_j(t = t_k) = P\{Y_j \geq S_{j,u}\} = \int_{S_{j,u}}^{+\infty} f(Y_j) dy_j, \quad (14)$$

де  $S_{j,u}$  - зусилля від максимально можливих (розрахункових значень) навантажень на конструкції, що задаються на стадії проектування при розгляді надійності за несучою здатністю; зусилля від характеристичних навантажень при розгляді надійності за експлуатаційною придатністю.

У разі нормального розподілу функції властивості  $Y_j$  ймовірність безвідмовної роботи визначається інтегралом від щільності розподілу

$$P_j(\gamma_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\gamma_y} e^{-0.5(Y_j)^2} dy_j; \quad (15)$$

або

$$P_j(\gamma_y) = F[\gamma_y], \quad (16)$$

де  $F$  - табульоване значення функції нормованого нормального (Гауссове) розподілу;  $\gamma_y$  - характеристика безпеки, індекс надійності [16], дальність відмови [15]:

$$\gamma_y = \frac{\bar{Y} - [Y]}{\sigma_y}, \quad (17)$$

де  $\bar{Y}$  - математичне очікування функції властивості;  $[Y]$  - гранично допустиме значення властивості;  $\sigma_y$  - середнє квадратичне відхилення функції властивості.

Конструкція задовольняє вимогам надійності по  $j$ - й властивості якщо

$$P_j(t) \geq R_{j,u}, \quad (18)$$

де  $R_{j,u}$  - нормований рівень надійності  $j$ -ї властивості.

На рис. 1 наведена загальна схема формування відмови будівельних конструкцій в умовах впливу зовнішніх середовищ [10, 12]. Відмова виникає при досягненні  $Y_j$ -ї властивості конструкції граничного значення  $S_j$ , що станеться через деякий випадковий проміжок часу експлуатації.

Таким чином, фізико-статистичний метод оцінки і прогнозу надійності конструкцій МДВТіНВ в умовах впливу зовнішнього несприятливого середовища включає наступні елементи:

а) розрахункові моделі: процесів накопичення пошкоджень в матеріалах конструкцій; детерміновані моделі залежності властивостей конструкцій від визначальних параметрів; імовірнісні моделі функціонування конструкцій при відомих розподілах визначальних параметрів;

б) аналітичні, чисельні, чисельно-аналітичні й інженерні методи вирішення моделей;

в) статистичні характеристики мінливості параметрів матеріалів конструкцій, геометричних параметрів конструкцій, середовища, умов їх взаємодії;

г) нормування: термінів служби або міжремонтних термінів експлуатації конструкцій; параметрів середовища експлуатації конструкцій (корозійного впливу і т.п.); силового навантаження; граничних значень функціональних властивостей конструкцій; рівня надійності функціональних властивостей конструкцій.



На рис. 1 показані основні етапи формування закону розподілу  $p(t)$ . На початку має місце розсіювання властивості щодо свого математичного очікування, що пов'язано з мінливістю фізико-механічних характеристик матеріалів, геометричних і силових параметрів конструкцій, що залежать від технологічної культури виробництва. Даний розподіл може характеризувати "початкову" надійність конструкцій.

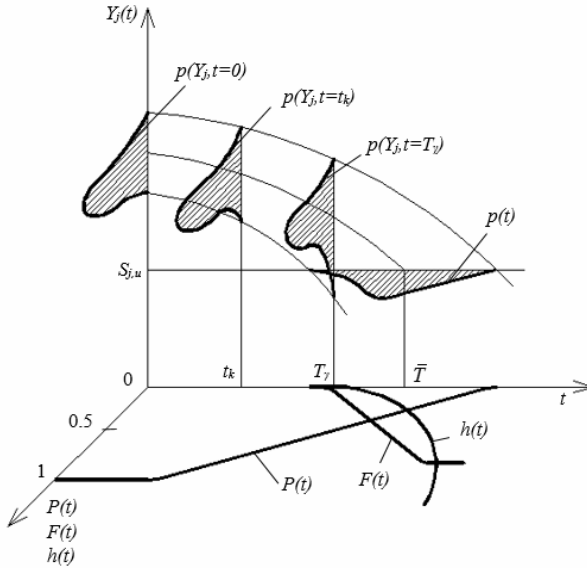


Рис. 1. Загальна схема формування відмови конструкцій в умовах впливу зовнішніх несприятливих середовищ [12]:  $P(t)$  – функція надійності;  $F(t)$  – функція ймовірності відмови;  $h(t)$  – інтенсивність відмов;  $Y_j(t)$  – функція  $j$ -ї властивості;  $S_{j,u}$  – граничне значення функції властивості;  $p(Y_j, t)$  – щільність розподілу властивості конструкцій;  $p(t)$  – щільність розподілу ймовірності безвідмовної роботи;  $T_\gamma$  – гамма-процентний термін служби (ресурс);  $\bar{T}$  – середній термін служби

Вплив зовнішнього несприятливого середовища експлуатації призводить до зміни деяких параметрів конструкцій, що визначають властивість. Процес зміни властивості в силу мінливості визначальних параметрів також є випадковим і залежить від швидкості зміни визначальних параметрів. В результаті відбувається формування закону розподілу  $p(t)$ , який визначає ймовірність виходу параметра  $Y_j$  за границю  $S_{j,u}$ , тобто ймовірність відмови  $F(t) = 1 - P(t)$  або безвідмовної роботи  $P(t)$ .

Середній термін служби конструкцій  $\bar{T}$  визначається часом досягнення математичного очікування властивості граничного значення. Якщо регламентована ймовірність безвідмовної роботи, то відповідне значення терміну служби є гамма-відсотковим ресурсом -  $T_\gamma$ .

Для побудови розподілів функцій властивостей конструкцій, які записуються в явному вигляді, можливо використання методу лінеаризації [8]. Згідно методу лінеаризації початкова функція, яка описує ту чи іншу властивість:

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (19)$$

замінюється лінійною в припущенні, що функція мало відрізняється від лінійної в області практично можливих значень аргументів:

$$y = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_m (x_i - \bar{x}_i), \quad (20)$$

де  $y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$  – значення функції при середніх значеннях аргументів;  $\left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_m$  – часткові похідні в області середнього значення аргументів.

За умови незалежності аргументів статистичні характеристики розподілу функції можуть бути виражені у вигляді:

$$y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n), \quad (21)$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2} + \sigma(x_i), \quad (22)$$

$$\mu_3(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^3 \mu_3(x_i), \quad (23)$$

$$\mu_3(y) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^4 \mu_4(x_i) + \sum_i \sum_j \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \left( \frac{\partial y}{\partial x_j} \right)^2 \sigma^2(x_i) \sigma^2(x_j), \quad i > j. \quad (24)$$

У виразах (21)...(24):  $\bar{y}$ ,  $\sigma(y)$ ,  $\mu_3(y)$ ,  $\mu_4(y)$  – відповідно, математичне очікування, середньоквадратичне відхилення, третій і четвертий центральний момент функції  $y$ ;  $\bar{x}_i$ ,  $\sigma(x_i)$ ,  $\mu_3(x_i)$ ,  $\mu_4(x_i)$  – математичне очікування, середньоквадратичне відхилення, третій і четвертий центральний момент випадкової величини  $x_i$ .

Функції, що описують функціональні властивості конструкцій, в загальному випадку не виражаються в явному вигляді, тому отримати в аналітичному вигляді розкладання функції в ряд Тейлора не представляється можливим. Тому в роботі [12] було запропоновано замінити часткові похідні функції властивості її кінцево-різницевою формою, що еквівалентно використанню апроксимації функції інтерполяційними поліномами. Центральні-різницеві апроксимації часткових похідних першого і другого порядку записуються у вигляді:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i + h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n) - y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i - h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n)}{2h(x_i)}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} = \frac{y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i + h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n)}{h^2(x_i)} - \frac{2y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n)}{h^2(x_i)} + \frac{y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i - h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n)}{h^2(x_i)}, \quad (26)$$

де  $h(x_i)$  – крок варіювання аргументу  $x_i$ .

Так як величина похибки наближення залежить від величини кроку (чим більше крок, тим більше похибка), то представляється доцільним вибирати довжину відрізка  $[\bar{x}_i - h(x_i), \bar{x}_i + h(x_i)]$ , обмежену ймовірністю значень аргументів 0,9987. У разі нормального закону розподілу  $h(x_i) = 3\sigma(x_i)$ .

Якщо відомі перші чотири моменти розподілу функції в перерізі випадкового процесу, тоді можливо підібрати апроксимуючий розподіл з сімейства розподілів Джонсона, або з класу розподілів Пірсона.

Регламентований рівень надійності конструкцій згідно Європейських норм [16] залежить від класу наслідків. Металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі відносяться до класу наслідків СС2 (табл. 1).

Всі матеріали п. 2.1 були розглянуті і опубліковані в роботах авторів [12, 19, 20].

Таблиця 1

Клас наслідків, клас надійності, індекс надійності та ймовірність безвідмовної роботи МДВТІНВ

Клас наслідків	Опис	Клас надійності	Індекс надійності/ймовірність безвідмовної роботи	
			несуча здатність	експлуатаційна придатність
СС2	Середні наслідки - втрати людського життя, економічні, соціальні наслідки або наслідки для навколишнього середовища є значними	RC2	3,8/0,9998	1,5/0,9332

**2.2. Управління старінням конструкцій металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.** Управління старінням з урахуванням деградації матеріалів МДВТІНВ полягає в реалізації заходів (технічного обслуговування і ремонту) по їх підтримці в справному або працездатному стані на основі оцінки і прогнозу технічного стану, яке оцінюється певним рівнем надійності.

Технічне обслуговування та ремонт конструкцій повинен проводитися на основі системи планово-попереджувальних ремонтів (ППР). Система технічного обслуговування і ремонту - це комплекс положень і норм, що визначають організацію і порядок проведення робіт з технічного обслуговування і ремонту будівельних конструкцій для заданих умов

експлуатації з метою забезпечення показників надійності, передбачених у нормативній документації.

Конструкції МДВТіНВ поділяються на неремонтопридатні і придатні до ремонту. Для неремонтопридатних конструкцій повинен встановлюватися ресурс, який вичерпується до кінця розрахункового терміну служби. Управління старінням для неремонтопридатних конструкцій може полягати в ослабленні або нейтралізації впливу середовища, яка викликає деградацію матеріалів конструкцій.

У загальному випадку, якщо конструкції проектується на заданий термін служби і відома закономірність зміни властивостей конструкцій з певною забезпеченістю, то для раціонально запроєктованої конструкції її ресурс повинен вичерпатися до кінця регламентованого терміну служби (рис. 2(а)).

Якщо в результаті моніторингу технічного стану конструкцій в часі і виконанні прогнозу зміни властивостей конструкцій з певною забезпеченістю буде встановлено, що термін служби (гамма-процентний ресурс) конструкцій менше регламентованого терміну служби, то необхідно виконати заходи, що впливають на швидкість зміни функціональних властивостей конструкцій (рис. 2 (б) – (д)).

На рис. 2(б) наведено випадок, коли для забезпечення безвідмовної роботи в певний момент часу повністю усувається вплив негативного середовища експлуатації конструкцій. Цей випадок, наприклад, може бути реалізований шляхом влаштування вторинного захисту (фарбування, обмазка і ін.) при впливі агресивного середовища або технологічними заходами, що усувають вплив середовища.

На рис. 2(в) наведено випадок, коли для забезпечення безвідмовної роботи в певний момент часу виконуються заходи, що уповільнюють процес деградації матеріалів і старіння конструкцій в результаті впливу негативного середовища експлуатації конструкцій.

На рис. 2(г), (д)) наведені випадки, коли для забезпечення безвідмовної роботи в певні моменти часу виконуються заходи по відновленню функціональних властивостей конструкцій в результаті ремонту, підсилення, заміни елементів конструкцій.

Для реалізації системи управління старінням необхідна регламентація рівня надійності, який повинен забезпечуватися для справного технічного стану конструкцій, термінів служби споруд або конструкцій, міжремонтних термінів експлуатації конструкцій.

**3. Основне кінетичне рівняння довговічності елементів металевих димових труб і несучих веж.** Елементи металевих димових труб і несучих веж працюють в умовах одночасної дії механічних напружень, корозійних, динамічних і високотемпературних впливів.

У більшості опублікованих робіт, присвячених швидкості розвитку пошкоджень у димових трубах, дія корозійного і температурного впливу розглядається окремо [4, 17]. На практиці найчастіше такі впливи діють одночасно.

Протягом усього життєвого циклу в конструктивних елементах димових труб і несучих вез відбувається зниження їх робочого перерізу внаслідок розвитку пластичних деформацій, зумовлених дією механічних напружень  $\varepsilon_c$ , високих температур (повзучості)  $\varepsilon_n$  і корозійного середовища  $\varepsilon_k$ .

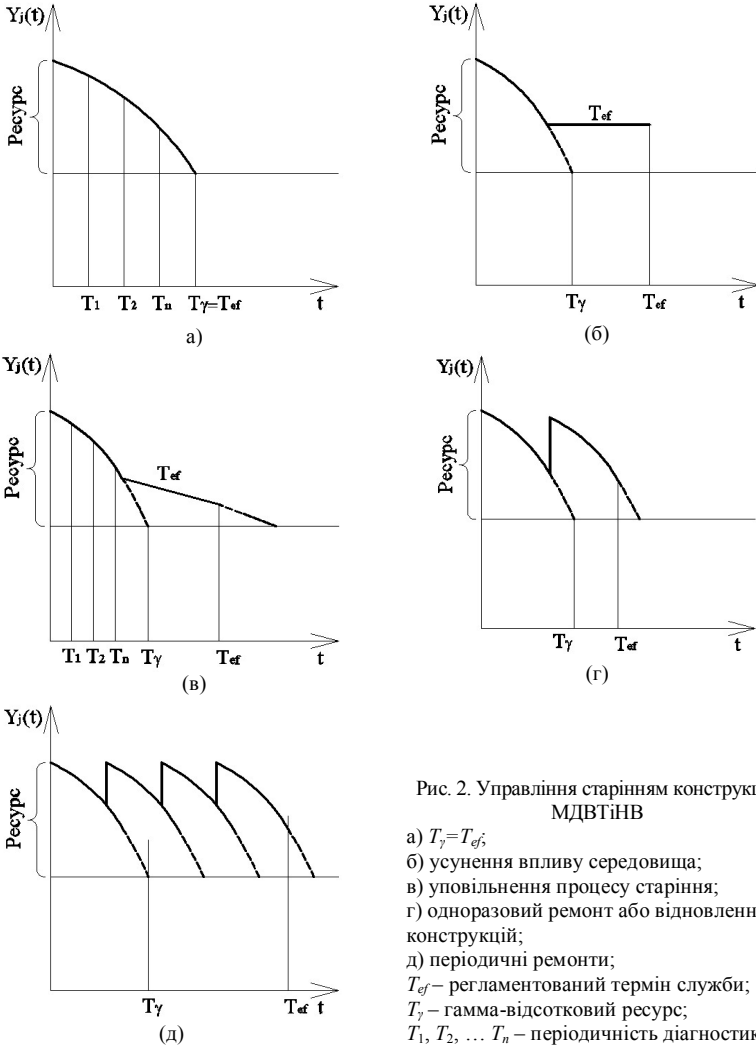


Рис. 2. Управління старінням конструкцій МДВТІНВ

- а)  $T_\gamma = T_{ef}$ ;
- б) усунення впливу середовища;
- в) уповільнення процесу старіння;
- г) одноразовий ремонт або відновлення конструкцій;
- д) періодичні ремонти;
- $T_{ef}$  – регламентований термін служби;
- $T_\gamma$  – гамма-відсотковий ресурс;
- $T_1, T_2, \dots, T_n$  – періодичність діагностики

Ступінь пошкодження робочого перерізу елементів конструкцій оцінюємо глибиною  $H$ . На основі принципу лінійного підсумування швидкість росту пошкоджень можна записати як:

$$\frac{dH}{dt} = \left(\frac{dH}{dt}\right)_c + \left(\frac{dH}{dt}\right)_n + \left(\frac{dH}{dt}\right)_k, \tag{27}$$

де  $(dH/dt)_c$  – швидкість зміни поперечного перерізу в результаті миттєвого прикладення зовнішнього навантаження;  $(dH/dt)_n$  – швидкість зміни поперечного перерізу, зумовленої деформацією повзучості;  $(dH/dt)_k$  – швидкість росту пошкоджень через механохімічну корозію.

Швидкість зростання пошкоджень у трубах і вежах зумовлена дією зовнішніх навантажень і повзучості, і може бути встановлена на основі рівнянь теорії пластичності і повзучості за такою аналітичною залежністю:

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_e = 0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m, \quad (28)$$

де  $\delta_0$  – початкова товщина стінок труб;  $A$  і  $m$  – константи, що визначають процеси деформаційного зміцнення і розміцнення металу від дії високих температур;  $\varepsilon_i$  – інтенсивність деформації.

Швидкість зростання пошкоджень у результаті хімічної корозії представлена в лінійній залежності від інтенсивності напружень  $\sigma_i$  і деформації  $\varepsilon_i$ :

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_k = v_0 \left[ (1 + k_\sigma \cdot \sigma_i) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right], \quad (29)$$

де:  $v_0$  – швидкість корозії ненапруженого металу;  $k_\varepsilon$  і  $k_\sigma$  – механохімічні параметри.

Враховуючи, що  $\sigma_i = C \varepsilon_i^n$  ( $C$  і  $n$  – константи деформаційного зміцнення сталі), рівняння (29) можна записати:

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_k = v_0 \left[ (1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right]. \quad (30)$$

У результаті отримаємо, що швидкість пошкодження елементів димових труб і несучих веж від дії зовнішнього навантаження, повзучості і корозійного зносу за час експлуатації має такий вигляд:

$$\frac{dH}{dt} = 0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m + v_0 \left[ (1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right]. \quad (31)$$

Інтегруючи рівняння (31), отримаємо основне рівняння довговічності елементів металевих димових труб і несучих веж товщиною  $t$ :

$$\tau = \int_{H_0}^{H_{np}} \frac{dH}{0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m + v_0 \left[ (1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right]}. \quad (32)$$

Геометричні і механічні характеристики для рівняння (32) визначаємо за фактичним станом димових труб і несучих веж з урахуванням наскрізних і не наскрізних пошкоджень, деформаційного старіння металу.

**4. Залишковий ресурс металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.** Нині проводиться багато досліджень в області визначення залишкового ресурсу металевих димових труб і елементів несучих веж. Існує декілька методик визначення залишкового ресурсу, які істотно відрізняються як за критеріями при визначенні залишкового ресурсу, так і за формулами визначення залишкового ресурсу [5, 6, 7, 9, 13, 17, 18, 19].

Так, Сатянов В.Г., Питлипенко П.Б. і ін. [13] у якості критерію безпечної експлуатації при визначенні залишкового ресурсу за корозійним зносом пропонують використовувати ресурс ( $R_{\text{рес}}$ ), що визначає допустимий термін безпечної експлуатації оболонок вільно встановлених труб, який розраховується за формулою:

$$R_{\text{рес}} = m \left( 1 - \frac{t_{\text{д}}}{t_{\text{еф}}} \right) / \left( \frac{t_{\text{нр}}}{t_{\text{еф}}} - 1 \right), \quad (33)$$

де  $m$  – час експлуатації димової труби від уведення в експлуатацію до моменту обстеження;  $t_{\text{нр}}$  – проектна товщина оболонки труби;  $t_{\text{д}}$  – допустима товщина оболонки;  $t_{\text{еф}}$  – ефективна товщина оболонки.

Розрахунок проводиться з використанням наступних формул:

$$t_{\text{еф}} = \sqrt{t_{\text{мін}} t_{\text{ср}}}, \quad (34)$$

$$t_{\text{мін}} = t_{\text{ср}} - z D_s, \quad (35)$$

$$t_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (36)$$

$$t_{\text{д}} = 1,05 K_{\text{д}} \cdot Z_k^n \left( 1 - \bar{Z} \right) \left( \varphi_y \cdot K_f \right)^{-0,5}, \quad (37)$$

де  $z$  – коефіцієнт, що враховує об'єм вибірки  $n > 20$ ;  $D_s$  – середньоквадратичне відхилення замірів  $t_i$  і  $t$ ;  $\varphi_y$  – коефіцієнт стійкості;  $K_f$  – коефіцієнт, що враховує вплив початкових недосконалостей оболонки труби. При вичерпанні ресурсу труби за рахунок корозійного зносу здійснюється підсилення оболонки труби і повторний розрахунок.

Ми пропонуємо розрахунок залишкового ресурсу проводити на основі даних про технічний стан конструкцій, отриманих при проведенні обстеження і виконанні перевірних розрахунків, з урахуванням наявних дефектів і пошкоджень, фактичних характеристик матеріалів [8]. На основі інформації про зміну параметрів технічного стану димових труб і несучих веж за період експлуатації здійснюється визначення залишкового ресурсу і екстраполяція значень цих параметрів до досягнення граничного стану. Залишковий ресурс визначаємо розрахунком за першим і другим граничним станом і за конструктивними вимогами. У якості параметрів при розрахунку залишкового ресурсу, що визначають технічний стан димових труб і несучих веж, пропонується визначити різні коефіцієнти запасу: по першому граничному стану  $k^1$ , по другому граничному  $k^2$  і коефіцієнт запасу за конструктивними вимогами  $k^k$ , порушення яких є пошкодженням категорії «А» (тріщини, прогари, втрата стійкості тощо). Розрахунок залишкового ресурсу передбачає відстеження зміни сукупності цих коефіцієнтів запасу за час експлуатації димової труби і елементів вежі, коли хоча б один із них досягає значення одиниці (граничного стану).

При розрахунку за першим граничним станом значення функції, що характеризують завантаженість конструкцій  $f_i^1$ , не повинне перевищувати розрахунковий опір металу  $R_i$  на різних розрахункових ділянках (перетинах) конструкції:

$$f_i^1(x_m) \leq R_y, \quad (38)$$

де  $i$  – індекс, що позначає вид розрахунку за першим граничним станом (міцність, стійкість, втомне чи крихке руйнування та ін.);  $x_m$  – різні параметри (внутрішні сили, геометричні характеристики перерізів тощо), які визначають значення функції  $f_i^1$  за першим граничним станом.

При розрахунку за другим граничним станом значення функції, що характеризують деформаційний стан  $f_j^2(y_n)$ , не повинні перевищувати граничне нормативне значення  $S_j$ :

$$f_j^2(y_n) \leq S_j, \quad (39)$$

де  $j$  – індекс, що позначає вид розрахунку переміщень або прогину (та ін.) за другим граничним станом;  $y_n$  – параметри, які визначають значення функції  $f_j^2$ . При конструктивних вимогах на різних ділянках:

$$(G^k)^p \leq (G_{\text{lim}}^k)^p, \quad (40)$$

де:  $G^k$  – конструктивний параметр (геометричні розміри елементів, міцнісні і жорсткісні характеристики тощо) на ділянці  $n$ ;  $G_{\text{lim}}^k$  – граничне значення конструктивного параметра;  $p$  – показник ступеня, що служить для уніфікації нерівності (40), причому показник  $p = 1$ , якщо за нормами потрібно, щоб  $G^k$  не перевищував  $G_{\text{lim}}^k$  і при  $p = -1$ , якщо потрібно, щоб  $G^k$  був більше  $G_{\text{lim}}^k$ .

Відношення правих і лівих частин цих нерівностей (38, 39, 40) являє собою коефіцієнти запасу  $k_{i,n}$ ,  $k_{j,n}$ ,  $k_{k,n}$  при розрахунку за першим і другим граничними станами, за конструктивними вимогами. Справний стан передбачає, що всі коефіцієнти запасу не менші за одиницю. Міцність і стійкість конструкції, відсутність втомного чи крихкого руйнування будуть забезпечені при  $k^1 \geq 1$ . Коефіцієнтом запасу за першим граничним станом  $k_f^1$  є мінімальне значення  $k^1$  в будь-якій ділянці або перетині:

$$k_f^1 = \min k^1. \quad (41)$$

Для безпечної експлуатації конструкції необхідно, щоб  $k_f^1 \geq 1$ .

Коефіцієнтом запасу за другим граничним станом  $k_G^2$  є мінімальне значення  $k^2$ :

$$k_G^2 = \min k^2. \quad (42)$$



При значеннях  $k_G^2 < 1$  нормальна експлуатація утруднюється і знижується довговічність конструкцій. Тобто, порушення вимог другого граничного стану не означає вичерпання ресурсу споруди, але утруднює нормальну експлуатацію конструкцій.

Зміни коефіцієнтів запасу протягом життєвого циклу експлуатації димової труби і несучої вежі можливо апроксимувати квадратичною залежністю (індекси  $k_f^1$ ,  $k_G^2$  і  $k^k$  опускаються):

$$k_0 - k = at^2 + k'_0 t, \quad (43)$$

де

$$a = \frac{(k_0 - k_e - k'_0 t_e)}{t_e^2}. \quad (44)$$

Параметри, які використовуються, означають:  $k$  – поточне значення коефіцієнта запасу, що відповідає часу  $t$ ;  $k_0$  і  $k_e$  – коефіцієнти запасу, що розраховуються для моментів часу  $t_0$  і  $t_e$ ;  $t_0$  – час, що відповідає початку розглядуваного періоду експлуатації;  $t_e$  – час, що відповідає кінцю розглядуваного періоду експлуатації (час проведення останнього обстеження);  $k'$  – заданий параметр, який чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу дотичної до залежності  $k_0 = k(t)$  у початковий момент часу, тобто  $k' = -dk/dt$ , при  $t = t_0$ . При задаванні параметра  $k'_0$  має виконуватись умова:

$$0 \leq k_0 \leq \frac{(k_0 - k_e)}{t_e}. \quad (45)$$

За умови рівності  $k' = (k_0 - k_e)/t_e$  залежність (43) стає лінійною функцією, при  $k'_0 = 0$  вона перетворюється на квадратичну параболу з вершиною, розташованою на осі ординат. На рис. 3 залежність (43) представлена графічно.

Екстраполяція залежності  $k_0 = k(t)$  дає час  $t_u$ , при якому коефіцієнт запасу досягає граничного значення, що дорівнює одиниці:

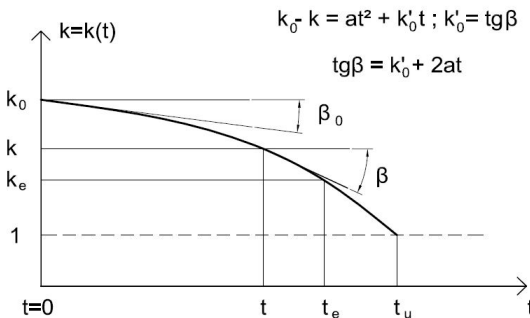


Рис. 3. Зміна коефіцієнтів запасу протягом життєвого циклу димової труби

$$t_u = -b + \sqrt{b^2 + (k_0 - 1)/a}, \quad (46)$$

де  $b = 0,5k_0/a$ .

При  $k_0 = 0$  залежність (46) спрощується:

$$t_u = t_e \sqrt{(k_0 - 1)/(k_0 - k_e)}. \quad (47)$$

Після обчислення значення  $t_u$  по всіх розрахункових перерізах димової труби або елементів вежі за всіма коефіцієнтами запасів залишковий ресурс  $T$  визначається як мінімальний з усіх розрахованих:

$$T = \min[(t_u - t_e)_n \beta_n], \quad (48)$$

де  $\beta_n$  – поправний коефіцієнт, що враховує вплив додаткових чинників на ділянці (в перерізі), що приймається за таблицю 2.

Таблиця 2

Значення поправного коефіцієнта  $\beta_n$

№	Фактор, що впливає	$\beta_n$
1	До моменту часу $t_c$ перевищено нормативний термін експлуатації: менше 1,5 разів	0,85
	більше 1,5 разів	0,70
2	При розрахунку на витривалість і експлуатовані в умовах: середньо-агресивного середовища	0,90
	сильно-агресивного середовища	0,85

Визначимо залишковий ресурс реальних димових і вентиляційних труб, несучих веж на основі результатів обстеження їх технічного стану після тривалого терміну експлуатації.

Розрахунок залишкового ресурсу визначався за першим граничним станом і конструктивними вимогами, з урахуванням року введення в експлуатацію, термінів перебування в експлуатації і дані представлені в [19].

Зазвичай проектний термін експлуатації димових і вентиляційних труб – 50 років. Аналізуючи отримані дані, можна констатувати, що навіть після тривалих термінів експлуатації (30-50 років і більше) металеві димові і вентиляційні труби мають значний залишковий ресурс. Залишковий ресурс обстежених димових і вентиляційних труб, що експлуатуються понад 50 років – не менше 20 років [19, 20].

При цьому необхідно підкреслити, що такі тривалі терміни експлуатації можливі лише при постійній діагностиці і підтримці технічного стану металевих димових і вентиляційних труб та при негайному усунуванні виявлених пошкоджень категорії «А».

**5. Забезпечення надійності металевих димових та вентиляційних труб та їх несучих веж.** На основі здобутих даних про технічний стан при обстеженні, визначенні причин виникнення пошкоджень і прогнозування їх розвитку, оцінці довговічності і залишкового ресурсу, виконанні ремонтних робіт можливо забезпечити надійність роботи металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. Для

промислових підприємств важливо забезпечити надійну експлуатацію металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, знати час до відмови в роботі, завчасно підготуватись до реконструкції, зменшити до мінімуму перериви в роботі. В залежності від технічного стану, категорії небезпеки виявлених дефектів, довговічності, залишкового ресурсу, необхідності виконання ремонтних робіт для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж запропоновано ввести три класи надійності – гарантований, граничний і незабезпечений. Показники та вимоги для кожного класу надійності наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

## Категорії надійності роботи МДВТiНВ

№	Показники	Металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі			
		нормальний (I)	задовільний (II)	непридатний до нормальної експлуатації (III)	аварійний (IV)
1	Технічний стан				
2	Категорія небезпеки дефектів	(B)		(Б)	(А)
3	Довговічність $\tau$ , років	< 50 років		визначається розрахунком по результатам технічних обстежень	вичерпана
4	Залишковий ресурс $T$ , років	< 50 років		визначається розрахунком по результатам технічних обстежень	вичерпаний
5	Підсилення	не потрібне		потрібне	не доцільне
6	Клас надійності	гарантований		граничний	незабезпечений

До гарантованого класу надійності віднесені металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі, які знаходяться в нормальному (I) та задовільному (II) технічному стані, в яких виявлені під час обстеження дефекти категорії (B), які експлуатуються на протязі до 50 років і які не потребують підсилення.

До граничного класу надійності віднесені металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі, які знаходяться в непридатному для нормальної експлуатації (III) технічному стані, в яких виявлені під час обстеження дефекти категорії (Б), які експлуатуються на протязі понад 50 років, їх довговічність і залишковий ресурс визначені розрахунком, які потребують підсилення.

До незабезпеченого класу надійності віднесені металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі, які знаходяться в аварійному (IV) технічному стані, в яких виявлені під час обстеження дефекти категорії (А), довговічність і залишковий ресурс вичерпані, підсилення котрих не доцільне.

### Висновки

1. На основі фізико-статистичного підходу запропонована загальна методологія оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.

2. На основі фактичних даних натурних обстежень розроблено типологію дефектів і пошкоджень елементів конструкцій металевих димових труб і їх несучих веж; вперше проведено статистичну оцінку величин та характеру пошкоджень; удосконалено визначення категорії безпеки основних типів дефектів і пошкоджень (категорії А, Б, В); встановлено гранично допустимі значення пошкоджень в залежності від категорії їх безпеки і технічного стану конструкцій ( категорії I, II, III, IV).

3. Вперше розроблено методику визначення довговічності  $\tau$  металевих димових труб і несучих веж з урахуванням домінуючої сумісної дії різних впливів – силового  $(dH/dt)_c$ , корозійного  $(dH/dt)_n$ , температурного  $(dH/dt)_k$  і динамічного; методики визначення довговічності металевих димових труб при загальній втраті стійкості труби і з прогарами у стінці, довговічності димових труб за критеріями механіки руйнування, що дозволяє описувати кінетику змінювання напруженого стану і визначати час до настання граничного стану елементів.

4. Вперше розроблено методику визначення залишкового ресурсу  $T$  металевих димових і вентиляційних труб з урахуванням пошкоджень та терміну експлуатації. Розрахунки за розробленою методикою свідчать про істотний залишковий ресурс конструкцій споруд понад проектний навіть після тривалих термінів експлуатації (50 і більше років). Тривалі терміни експлуатації можливі лише при належному контролі технічного стану і негайному усуненні виявлених особливо небезпечних пошкоджень (тріщин, прогарів, утрати стійкості елементів).

5. Вперше запропоновано для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж визначити три класи надійності – гарантований, граничний і незабезпечений, в залежності від технічного стану, категорії безпеки виявлених дефектів, довговічності, залишкового ресурсу, необхідності виконання ремонтних робіт.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Барабаш М. С.* Численное моделирование НДС конструкций с учетом стадий жизненного цикла зданий и сооружений / М. С. Барабаш // Международный научный журнал: International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчёту гражданских и промышленных конструкций). – 2015.–Vol. 11, Issue 1. – P. 80–90.
2. *Воскобойник О.П.* Методологія нормування технічних станів сталезалізобетонних конструкцій. Дис.. д-ра техн. наук/ ПНТУ ім. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2014. – 405 с.

3. *Гордеев В.Н.* Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.
4. *Зайнулин Р.С.* Кинетика механохимического разрушения конструктивных элементов при стационарных и нестационарных нагрузках // Малоцикловая усталость – критерии разрушения и структуры материалов. Тез. докл. V Всесоюзного симпозиума. – Волгоград, 1987. – С. 176-178.
5. *Зайнулин Р.С.* Расчеты ресурса оборудования трубопроводов с учетом фактора времени / Р.С. Зайнулин, А.Г. Вахитов, О.И. Тарабарин и др. - М.: Недра, 2003. – 50 с.
6. *Лившиц В.И.* Основные положения определения остаточного ресурса сосудов и аппаратов / В.И. Лившиц, В.Г. Татаринов // Химическое и нефтехимическое машиностроение. – 2000. – №8. – С. 8-10.
7. *Матюхин Г.В.* Диагностика и оценка остаточного ресурса элементов конструкций из низколегированных сталей / Г.В. Матюхин, А.В. Матюхин, А.В. Гридасов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – №3. – С. 28-35.
8. Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб / Х.М. Ханухов, И.И. Симонов, С.Н. Яровой и др. // Стандарт саморегулирующей организации. СТО СРО ЭТМП 03-16. – М.: 2016. – 68 с.
9. *Михайлов Г.Г.* Некоторые аспекты стратегии определения остаточного ресурса / Михайлов Г.Г., Конаков О.А., Колмаков А.А. // Безопасность труда и промышленности. – М.: – 2007. – №1. – С. 44-45.
10. *Никифорова Т.Д.* Научные основы и методы расчета конструкций заглубленных зданий с учетом внешних воздействий: дис.. д-ра техн. наук / ПДАБА. – Днепропетровск, 2016. – 390 с.
11. *Пащинський В.А.* Методологія нормування навантаження на будівельні конструкції. Автореф. Дис.. доктора техн. наук / ПДТУ. – Полтава, 1998. – 33 с.
12. *Савицкий Н. В.* Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах: дис.. д-ра техн. наук / ПДАБА. – Днепропетровск, 1994. – 410 с.
13. *Сатьянов В.Г.* Способ определения остаточного ресурса / В.Г. Сатьянов, П.Б. Питлипенко, В.А. Французов, С.В. Сатьянов, В.С. Котельников // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – №12. –С. 34-39.
14. *Семко В.О.* Оцінка надійності сталевих балок з дефектами / Полтава. – ПолНТУ, 2007. – 20с.
15. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009. – [Введені в дію з 2009-12-01] / Мінрегіонбуд України, 2009. - К.: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 30 с. (Державні будівельні норми України).
16. Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDN): ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. – [Введені в дію з 2009-07-01] / Мінрегіонбуд України, 2009. - К.: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 81 с. (Національний стандарт України).
17. *Суцев С.П.* Оценка остаточного ресурса дымовых труб по критериям снижения жесткости и долговечности их несущей способности при эксплуатации // Вопросы безопасности объектов нефтегазового комплекса. – М: ЦИЭКС, 2004. – С.35-38.
18. *Суцев С.П.* Оценка остаточного ресурса дымовых труб. – Уфа: МНТЦ «БЭСТСТ», 2003. – 50с.
19. *Яровий С.М.* Надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж: дис. д-ра техн. наук / ХНУБА, ПДАБА. – Дніпро, 2018. – 356 с.
20. *Яровий С.М.* Фізико-статистичний метод оцінки надійності елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж / С.М. Яровий, С.О. Слободянюк, А.О. Титюк // Науковий вісник будівництва. Серія «Будівництво». – Харків: ХНУБА, 2019. – Том 2, № 2(96). – С. 264-269.

## REFERENCES

1. *Barabash M. S.* Chislennoe modelirovaniye NDS konstruktivnykh s uchetom stadiy zhiznennogo tsikla zdaniy i sooruzheniy ( Numerical modeling of VAT structures taking into account the stages of the life cycle of buildings and structures ) / M.S. Barabash // International Scientific Journal: International Journal for Computational Civil and Industrial Designs ). - 2015. – Vol. 11, Issue 1. - P. 80–90.
2. *Voskoboynyk O.P.* Metodologiya normuvannya tehnicnih staniv stalezalizobetonnih konstruktivnykh (Methodology of standards for technical stanal steel metallized constructions) Dis . Dr. tech. Sciences/ PNTU im .. Yu. Kondratyuka. - Poltava, 2014. - 405 p.
3. *Gordeev V.N.* Nagruzki i vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya (Loads and impacts on buildings and structures) / V.N. Gordeev, A.I. Lantuh-Lyashchenko, V.A. Pashinsky, A.V. Perelmuter, S.F. Pichugin. - M.: Publishing House of the Association of Construction Universities, 2007. - 482 p.
4. *Zaynulin R.S.* Kinetika mehanohimicheskogo razrusheniya konstruktivnykh elementov pri statsionarnykh i nestatsionarnykh nagruzkah ( Kinetics of mechanochemical destruction of structural elements under stationary and non-stationary loads) // Low-cycle fatigue - criteria for fracture and structure of materials. Tez. Dokl.V All-Union Symposium. - Volgograd, 1987. - P. 176-178.
5. *Zaynulin R.S.* Raschetnyi resursa oborudovaniya truboprovodov s uchetom faktora vremeni (Calculations of the lifetime of the equipment of pipelines, taking into account the time factor) / Zaynulin, A.G. Vakhitov, O.I. Tarabarin and others - M.: Nedra, 2003. - 50 p.
6. *Lifshits V.I.* Osnovnyie polozheniya opredeleniya ostatochного resursa sudov i apparatov ( The main provisions of the determination of the residual life of vessels and apparatus ) / V.I. Lifshits, V.G. Tatarinov // Chemical and Petrochemical Engineering. - 2000. - №8. - P. 8-10.
7. *Matyukhin G.V.* Diagnostika i otsenka ostatochного resursa elementov konstruktivnykh iz nizkolegirovannykh staley (Diagnostics and assessment of the residual life of structural elements of low-alloy steels) / G.V. Matyukhin, A.V. Matyukhin. A.V. Gridasov // Technical diagnostics and non-destructive control. - 1991. - №3. - P. 28-35.
8. Metodika obsledovaniya tehniceskogo sostoyaniya promyshlennykh dyimovyykh i ventilyatsionnykh trub ( Methods of inspection of the technical condition of industrial flue and ventilation pipes) / Kh.M. Hanukhov, I.I. Simonov, S.N. Yaroviy and others. // Standard of self-regulatory organization. STO SRO ETMP 03-16. - M. : 2016. - 68 p.
9. *Mikhailov G.G.* Nekotoryie aspekty strategii opredeleniya ostatochного resursa (Some aspects of the strategy for determining the residual resource ) /Mikhailov GG, Konakov OA, Kolmakov A.Ya. // Safety and industry. - M. : - 2007. - №1. - P. 44-45.
10. *Nikiforova T.D.* Nauchnyie osnovy i metodyi rascheta konstruktivnykh zagrublennykh zdaniy s uchetom vneshnih vozdeystviy (Scientific basis and methods for calculating the structures of buried buildings, taking into account external influences) Dis .. Dr. Techn. Sciences / PDABA. - Dnepropetrovsk, 2016. - 390 p.
11. *Pashinsky V.A.* Metodologiya normuvannya navantazhen na budivelnI konstruktivnykh ( Methodology of normuvannya navantazhen on budivelnI designs. Author. Dis .. Doctors of Technology. Sciences / PDTU. - Poltava, 1998. - 33 p.
12. *Savitsky N.V.* Osnovnyie rascheta nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruktivnykh v agressivnykh sredah (Fundamentals for calculating the reliability of reinforced concrete structures in aggressive environments) dis .. Dr. tech. Sciences / PDABA. - Dnepropetrovsk, 1994. - 410 p.
13. *Satyanov V.G.* Sposob opredeleniya ostatochного resursa (The method of determining the residual resource) / VG Satyanov, P.B. Pitlipenko, V.A. Frantsuzov, S.V. Satyanov, V.S. Kotelnikov // Industrial Safety. - 2007. - №12. - P. 34-39.
14. *Semko V.O.* Otsinka nadiynosti stalevikh balok z defektami (Evaluation of steel beams with defects ) / Poltava. - PolNTU, 2007. – 20 p.
15. Sistema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeki budivelnih ob'Ektiv. Zagalni printsipi zabezpechennya nadiynosti ta konstruktivnoyi bezpeki budivel, sporud, budivelnih konstruktivnykh ta osnov (The system of safeguarding the safeguarding of safe roads. The main principles of protection are constructive security without construction, construction, construction, and fundamentals) DBN V.1.2-14-2009 - [Enacted from 2009-12-01] / Ministry

- of Congregation of Ukraine, 2009. - К .: ДП «Ukrhrbudinform, 2009. - 30 p. (Derzhavni Budivelni Normi Ukraine).
16. Sistema nadiynosti ta bezpeki u budivnitstvi (System nadiynosti that bezpeki at budivnitstvi) Natanova. Establish a design project (EN 1990: 2002, IDN): ДСТУ-Н Б В.1.2-13: 2008 - [Entered into force on 2009-07-01] / Ministry of Regions of Ukraine, 2009. - К .: DP "Ukrhrbudinform", 2009. - 81 p. (National Standard of Ukraine).
  17. *Sushchev S.P.* Otsenka ostatochnogo resursa dyimovyih trub po kriteriyam snizheniya zhestkosti i dolgovechnosti ih nesuchey sposobnosti pri ekspluatatsii (Assessment of the residual life of chimneys according to the criteria for reducing the rigidity and durability of their carrying capacity during operation) // Security Issues of Oil and Gas Facilities. - M: СІЕКС, 2004. - P. 35-38.
  18. *Sushchev S.P.* Otsenka ostatochnogo resursa dyimovyih trub (Assessment of the residual life of chimneys) - Ufa: ISTC "BESTST", 2003. – 50 p.
  19. *Yaroviy S.M.* Nadlynst metalievih dimovyih i ventilyatsylnih trub ta yih nesuchih vezh (Reliability of Metal Smoke and Ventilation Pipes and their Bearing Towers): dis .. Dr. tech. Sciences / HNUBA, PDABA. - Dnipro, 2018. – 356 p.
  20. *Yaroviy S.M.* Fiziko-statistichnyi metod otslnki nadiynosti elementlv metalievih dimovyih iventilyatsylnih trub ta Yih nesuchih vezh (Physico-statistical method for assessing the reliability of elements of metal chimneys and ventilation pipes and their supporting towers) / S.M. Yaroviy, S.O. Slobodianiuk, A.O. Tityuk // Scientific Bulletin of Construction. Construction series. - Kharkiv: KhNUBA, 2019. - Volume 2, № 2 (96). - P. 264-269.

*Стаття надійшла 11.03.2021*

*Яровий С.М., Савицький М.В., Слободянюк С.О.*

### **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ**

Проблема забезпечення надійності в роботі металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж в останній час здобула особливу значимість в зв'язку з великою кількістю випадків аварій на промислових підприємствах. Це пов'язано з тим, що багато металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж випрацювала свій проектний ресурс (50 років), а під час експлуатації утворилось багато дефектів та пошкоджень. Все це потребує проведення діагностики і визначення дійсного технічного стану конструкцій, оцінки довговічності і залишкового ресурсу, виконання ремонтних робіт і забезпечення нормальної експлуатації або надійності таких споруд. На основі фізико-статистичного підходу запропонована загальна методологія оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. На основі фактичних даних натурних обстежень розроблено типологію дефектів і пошкоджень елементів конструкцій металевих димових труб і їх несучих веж; проведено статистичну оцінку величин та характеру пошкоджень; удосконалено визначення категорії небезпеки основних типів дефектів і пошкоджень; встановлено гранично допустимі значення пошкоджень в залежності від категорії їх небезпеки і технічного стану конструкцій. Розроблено методику визначення довговічності металевих димових труб і несучих веж з урахуванням домінуючої сумісної дії різних впливів – силового, корозійного, температурного і динамічного; розроблено методику визначення залишкового ресурсу металевих димових і вентиляційних труб з урахуванням пошкоджень та терміну експлуатації. Розрахунки за розробленою методикою свідчать про істотний залишковий ресурс конструкцій споруд понад проектний, навіть після тривалих термінів експлуатації. Тривалі терміни експлуатації можливі лише при негайному усуненні виявлених особливо небезпечних пошкоджень (тріщин, прогарів, утрати стійкості елементів).

**Ключові слова:** металеві димові і вентиляційні труби, несучі вежі, надійність, навантаження, впливи, пошкодження, напруження, деформації, довговічність, залишковий ресурс.

*Yaroviy S.M., Savytskyi M.V., Slobodianiuk S.O.*

### **ENSURING THE RELIABILITY OF METAL SMOKE AND VEINTILATION PIPES AND THEIR CARRYING TOWERS**

The problem of ensuring the reliability of the work of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers has recently gained special significance in connection with the large number of accidents at industrial enterprises.

Methods of estimation of residual resource of bearing elements of high-rise buildings with various damage detected during diagnostics are developed. The formulas for determining the residual life of metal chimneys are given, the actual reserves of the residual resource are determined after long periods of operation for specific structures.

In this work, variants of reinforcement of the elements of chimneys and towers with the most dangerous injuries (category A) – gaps, with cracks in the main metal and welds, with loss of the overall stability of the trunk of the pipe, have been developed and substantiated. On the basis of the analysis of the summation of internal and external stresses, we obtain formulas for calculating the elastic-deformation state of metal chimneys in the zone of through cracks and holes when performing construction reinforcement works by means of welds for overlays.

The variants of amplification of smoke pipes after the destruction of stops of towers, which perceive wind loads, and as consequences of the loss of overall stability of the pipe are given.

The research results make it possible to assess the reliability of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers after long operating periods, as well as used in the development of regulatory documents when assessing the technical condition and residual life of high-rise buildings.

**Key words:** metal smoke and ventilation pipes, bearing towers, reliability, load, impact, damage, stress, deformation, durability, residual life.

*Яровой С.Н., Савицкий Н.В., Слободянюк С.А.*

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ДЫМОВЫХ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ТРУБ И ИХ НЕСУЩИХ БАШЕН**

Проблема обеспечения надежности в работе металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен в последнее время приобрела особенное значение в связи с большим количеством случаев аварий на промышленных предприятиях. Это связано с тем, что много металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен отработало свой проектный ресурс (50 лет), во время эксплуатации возникло много дефектов и повреждений. Все это требует проведения диагностики и определения действительного технического состояния конструкций, оценки долговечности и остаточного ресурса, выполнения ремонтных работ и обеспечения нормальной эксплуатации или надежности таких сооружений.

**Ключевые слова:** металлические дымовые и вентиляционные трубы, несущие башни, надежность, нагрузки, воздействия, повреждения, напряжения, деформации, долговечность, остаточный ресурс.

УДК 624.046.2: 628.014

*Яровой С.М., Савицкий М.В., Слободянюк С.О. Забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – Київ: КНУБА, 2021. – Вип. 106. – С. 176-200.*

*Проблема забезпечення надійності в роботі металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж в останній час здобула особливу значимість в зв'язку з великою кількістю випадків аварій на промислових підприємствах.*

Лл. 3. Бібліогр. 20 назв.



UDK 624.046.2: 628.014

*Yarovy S.M., Savytskyi M.V., Slobodianiuk S.O. Ensuring the reliability of metal smoke and ventilation pipes and their carrying towers // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific and technical collected articles. - Kyiv: KNUBA, 2021. - Issue 106. - P. 176-200.*

*The problem of ensuring the reliability of the work of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers has recently gained special significance in connection with the large number of accidents at industrial enterprises.*

Fig. 3. Ref. 20.

УДК 624.046.2: 628.014

*Яровой С.Н., Савицкий Н.В., Слободянюк С.А. Обеспечение надежности металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен // Сопротивление материалов и теория сооружений. – Київ: КНУБА, 2021. – Вып. 106. – С. 176-200.*

*Проблема обеспечения надежности в работе металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен в последнее время приобрела особенное значение в связи с большим количеством случаев аварий на промышленных предприятиях.*

Ил. 3. Библиогр. 20 назв.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор кафедри металевих і дерев'яних конструкцій ЯРОВИЙ Сергій Миколаєвич.

**Адреса робоча:** 61002, м. Харків, вул. Сумська, 40, Харківський національний університет будівництва та архітектури.

**Мобільний тел.:** +380976548245

**E-mail:** psp.nauka@gmail.com

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-2886-9456>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, ректор академії САВИЦЬКИЙ Микола Васильович.

**Адреса робоча:** 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури".

**Мобільний тел.:** +380503203308

**E-mail:** sav15@ukr.net

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-4515-2457>

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки СЛОБОДЯНЮК Сергій Олександрович.

**Адреса робоча:** 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24а, ДВНЗ "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури".

**Мобільний тел.:** +380662137823

**E-mail:** slobodianiuk.sergey@gmail.com

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-4874-7296>