

УДК 624.9:624.07:628.5

**ПРОГНОЗУВАННЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСУ МЕТАЛЕВОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ
КОЛЬОРОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, кандидати техн. наук В. Д. Жван, О. В. Лобяк,
О. М. Назаренко, асп. С. В. Микитась

**FORECASTING THE FINAL RESOURCE OF THE METAL CHIMNEY PIPE
OF NON-FRONTIER METALLURGY**

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, candidats of eng. scien. V. D. Zhvan, O. V. Lobyak,
O. M. Nazarenko, postgraduate student S. V. Mykytas

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.302064>



Анотація. Виконано комплексне дослідження корозійних процесів, пошкоджень і несучої здатності металевої димової труби, що відводить газодимову суміш, утворювану в технологічних процесах кольорової металургії, і розроблено методику прогнозування її остаточного ресурсу. Виконано аналіз складу і температурно-вологісного режиму зазначеної суміші, встановлено ступінь агресивної дії середовища, яке спричиняє корозію труби зсередини. У результаті аналізу результатів замірів товщини стінки труби визначено глибину корозійних ушкоджень і швидкість корозії. Показано, що інтенсивність корозії за висотою труби відрізняється. Виконано аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням корозійних пошкоджень, визначено найбільш навантажену небезпечну зону і її конструкції, визначено граничні значення товщини стінки та глибини корозійного пошкодження в перерізах, які забезпечують виконання умов до несучої здатності. Виходячи з величин швидкості корозії для всіх перерізів визначено час досягнення граничного стану.

Показано, що без заходів із ремонту і захисту остаточний ресурс труби не перевищує дев'ять років. Для збільшення остаточного ресурсу труби до 18 років рекомендовано замінити верхню частину труби, а понад 18 років – здійснити антикорозійний захист її внутрішньої поверхні. Показано, що додаткове понад 18 років збільшення остаточного ресурсу дорівнюватиме терміну служби покриття, за умови своєчасного відновлення якого остаточний ресурс труби може бути доведений до 70–80 років.

Ключові слова: димова металева труба, агресивні гази, корозія, прогнозування довговічності.

Abstract. A comprehensive study of corrosion processes, damage and load-bearing capacity of a 45-m-high metal smoke pipe, which removes the gas-smoke mixture formed in the technological processes of non-ferrous metallurgy, was carried out, and a methodology for forecasting its final resource was developed. As a result of the analysis of the composition and temperature-moisture regime of the specified mixture, it was established that it is a gaseous medium aggressive to steel and causes corrosion of the pipe from the inside. As a result of the analysis of the results of the pipe wall thickness measurements, it was established that the corrosion rate was 0.12–0.26 mm/year, which corresponds to the medium aggressive degree of action of the gaseous medium on carbon steel. According to the intensity of corrosion, the pipe is divided into three conventional zones: the lower non-ventilated stagnation zone of corrosion of medium intensity below the chimney inlet; the average well-ventilated zone of less intense corrosion above the chimney inlet; the upper zone of condensate formation and the most intense corrosion. Analysis of the stress-strain state of the pipe taking into account corrosion damage showed that the most loaded dangerous zone of the structure is the place where the horizontal chimney cuts in, and the bearing capacity of the pipe is provided with a material utilization factor of 0.62–0.65. The limit values of the wall thickness and depth of corrosion damage in the cross-sections, which ensure the fulfillment of the conditions for the bearing capacity, have been determined. Based on the values of the corrosion rate, the time to reach the limit state was determined for all sections. In the lower, middle and upper zones of the pipes, the limit state will be reached after 18, 25 and 9 years, respectively, so without measures for repair and protection, the final resource of the pipe does not exceed 9 years. To increase the final service life of the pipe, it is recommended to replace the upper part of the pipe up to 18 years, and after 18 years - to protect the inner surface with heat-resistant organic silicon or epoxy enamel. Additional over 18 years of increase in ultimate life will equal the service life of the coating. Provided timely restoration of the anti-corrosion coating, the final resource of the pipe can be brought to the durability indicators of reinforced concrete and brick pipes of 70-80 years.

Keywords: smoke metal pipe, aggressive gases, corrosion, durability prediction.

Вступ. У багатьох об'єктах промисловості та паливно-енергетичного комплексу для забезпечення тяги під час згоряння палив і відведення продуктів згоряння використовуються димові труби [1]. До другої половини ХХ століття застосовувалися переважно цегляні труби. У разі якісного зведення та належного утримання завдяки достатнім фізико-механічним характеристикам і хімічній інертності кераміки такі труби мали високу довговічність. Багато труб поважного віку

збереглися у настільки доброму стані, що на них встановлюють пристрої мереж мобільного зв'язку. Проте через ускладненість зведення індустріальними способами будівництво цегляних труб поступово зійшло нанівець. Останні 30 років в Україні труби висотою понад 60 м будуються переважно залізобетонними збірними або монолітними, до 60 м – металевими. Незважаючи на значно меншу масу, більш високу індустріальність виготовлення, монтажу та навіть демонтажу й утилізації

металевих труб, їх застосування в разі висоти понад 60 м стримується збільшенням металоємності через необхідність облаштування каркасів, ускладненістю облаштування відтяжок у щільній промисловій забудові тощо.

Припускається, що металеві труби в разі використання футерування та/або сучасних засобів захисту від корозії, за довговічністю не поступаються цегляним і залізобетонним [1]. Проте через порівняно нетривалий досвід будівництва та експлуатації металевих димових труб, різноманітний хімічний склад газодимових сумішей багато аспектів прогнозування їхньої довговічності та раціонального розподілу ресурсів на поточні та капітальні ремонти залишаються невивченими.

Стаття підготовлена за матеріалами досліджень корозійного стану металевої димової труби, якою відводяться гази, утворювані технологічними процесами кольорової металургії [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довговічність конструкцій і матеріалів розглядається різними кінетичними і статистичними теоріями. За флуктуаційною (кінетичною) теорією Журкова [3], матеріал деградує внаслідок розриву хімічних зв'язків у ньому під впливом теплових флуктуацій і напружень, а довговічність τ як час від прикладання навантаження до руйнування визначається рівнянням

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{V - \gamma \sigma}{RT}}, \quad (1)$$

де τ_0 – постійна, що для всіх матеріалів дорівнює $10^{12} - 10^{13}$ с;

V – енергія активації процесу розриву зв'язку;

γ – параметр, що враховує неоднорідність структури матеріалу та розподілу напруження;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Застосування цього рівняння до металевих димових труб не є достатнім, оскільки воно не враховує корозійних процесів і зменшення перерізу конструкцій через них.

Питання довговічності металевих димових труб докладно вивчені в роботах [4, 5]: на основі положень теорії надійності розробляється фізико-статистичний метод оцінювання надійності елементів цих труб [4]; створюються загальна методологія оцінювання надійності та управління старінням елементів труб, методики визначення довговічності та залишкового ресурсу, пропонуються кінетичне рівняння довговічності та рівняння залишкового ресурсу [5]. Імовірність відмов і час їх досягнення розраховуються виходячи з емпіричних коефіцієнтів, які враховують процеси деградації елементів від корозії, пластичних деформацій тощо. Проте ці коефіцієнти мають узагальнений характер і в конкретних випадках їх слід уточнювати залежно від хімічного складу, температурно-вологісного режиму середовища тощо, які через технологічні процеси можуть бути дуже різноманітними [6-8].

Визначення мети та завдань дослідження. Мета досліджень – уточнення методики визначення залишкового ресурсу металевої димової труби електропечей кольорової металургії. Завдання

досліджень: аналіз результатів натурального обстеження труби; оцінювання показників кінетики корозійного пошкодження; аналіз напружено-деформованого стану конструкції труби; прогноз остаточного ресурсу та рекомендація з його подовження.

Основна частина дослідження Конструкція і поточний стан труби.

Досліджувана труба призначена для відведення газодимової суміші, що утворюється в електропечах під час плавлення мідного брухту. Труба циліндрична висотою 45 м, діаметром 1820 мм, з товщиною стінки 12 мм до висоти 28 м, 8 мм – верхніх 17 м, зварена з листової сталі марки С235, без футерування.

Зовнішній вигляд труби наведений на рис. 1. Труба відтяжок не має, у верхній частині має спіральні ребра, між позначками +7,76 і +9,49 – прямокутний виріз для під'єднання газоходу розміром 1730×950 мм (рис. 1, б). Встановлена на залізобетонному фундаменті (рис. 1, в) із бетону класу за міцністю С15/20, марки з морозостійкості F75, армованому сіткою 200×200Ø10A240 та закріплена за анкерні болти через

кронштейни зі сталі С235 товщиною 12 мм (рис. 1, г).

На момент обстеження труба експлуатувалася 20 років, з яких останні п'ять – після удосконалення процесу очищення газодимової суміші шляхом встановлення нових фільтрів. Стінки труби мають корозійні пошкодження по всій її довжині, знизу мінімальні, у верхній частині максимальні аж до наскрізних біля верхівки (рис. 2).



Рис. 1. Металева димова труба: а – загальний вигляд; б – врізання газоходу; г, д – кріплення до фундаменту

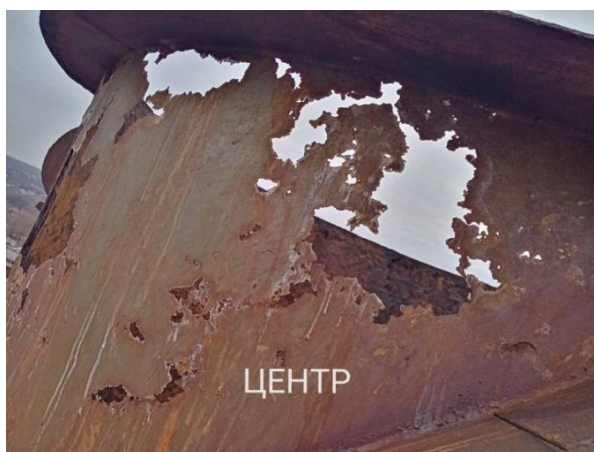


Рис. 2. Наскрізні корозійні ушкодження стінок верхівки труби

Методика прогнозу остаточного ресурсу труби. Виходячи з конструктивних особливостей і поточного стану труби за основу аналізу взяли швидкість корозії, мм/рік, зниженням міцності матеріалу за рахунок корозії зневажили. Запропонована така послідовність прогнозування залишкового ресурсу:

1) аналіз хімічного складу і температурно-вологісного режиму середовища (газодимової суміші) із визначенням ступеня агресивної дії і швидкості корозії, мм/рік;

2) вимірювання поточної товщини стінок труби, визначення глибини корозії, розрахунок швидкості корозії;

3) порівняння швидкості корозії, визначеної за ступенем агресивної дії середовища і за даними товщинометрії, обґрунтування величини швидкості корозії для прогнозування довговічності;

4) аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням пошкоджень, визначення критичних зон із максимальними напруженнями і граничних величин товщини стінки, за яких настає відмова за несучою здатністю;

5) розрахунок часу, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного значення, як остаточного ресурсу.

Аналіз швидкості корозії за ступенем агресивної дії середовища.

Характеристика середовища, що відводиться через трубу: джерела агресивних газів – ділянка вогневого рафінування міді, печі полум'яні, пост підігріву ковша, розливу металу, максимальні витрати викиду $V = 12,356 \text{ м}^3/\text{с}$. Оскільки точні дані про температурно-вологісний режим і склад середовища відсутні, показники концентрації потенційно агресивних речовин прийняті за встановленими величинами гранично допустимих концентрацій, вологісний (температурно-вологісний) режим – найбільш несприятливий.

Потенційно агресивні речовини за даними про гранично допустимі викиди: суспендовані тверді частинки, не диференційовані за складом – до $10 \text{ мг}/\text{м}^3$ або $m = 0,12356 \text{ г}/\text{с}$; оксид і діоксид азоту в перерахунку на діоксид азоту – до $m = 0,253298 \text{ г}/\text{с}$; оксид вуглецю – до $m = 0,262565 \text{ г}/\text{с}$. Розрахована за вказаними величинами витрат концентрація викидів у потоці середовища, що відводиться, $C = 1000m/V$ складає: діоксиду азоту NO_2 – $20,5 \text{ мг}/\text{м}^3$; діоксиду вуглецю CO_2 – $21,25 \text{ мг}/\text{м}^3$.

Оскільки на поверхнях труби за перепаду температур можливе утворення конденсату, температура середовища в ній,

очевидно, перевищує $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, а відносна вологість перевищує 50% (продукти згорання палив містять воду), вологісний режим середовища, за роботою [9], можна вважати вологим.

За цими характеристиками визначено ступінь агресивної дії середовища за роботою [9]. У разі середньорічної концентрації понад $0,3\text{ мг/м}^3$ агресивна дія твердих аерозолів (твердих частинок) має оцінюватись і враховуватись. Оскільки у твердих продуктах згорання твердих палив часто містяться гідроксиди лужних металів, аналізований твердий аерозоль вважатимемо добре розчинним гігроскопічним. Ступінь дії добре розчинного гігроскопічного твердого аерозолу на металеву конструкцію, що експлуатується на відкритому повітрі у вологому режимі, – сильно агресивний.

Діоксид азоту NO_2 за концентрації $20,5\text{ мг/м}^3$ належить до групи газів С. Ступінь дії газу групи С на металеву конструкцію, що експлуатується на відкритому повітрі у вологому режимі, – сильно агресивний.

Діоксид вуглецю CO_2 за концентрації $21,25\text{ мг/м}^3$ належить до групи газів А. Ступінь дії газу групи А на металеву

конструкцію, що експлуатується на відкритому повітрі у вологому режимі, – середньо агресивний.

До зміни технологічного процесу очищення склад газоподібного середовища труби, очевидно, відповідав вказаному в первинному проекті. Вміст кислих газів у попередній період експлуатації був вищий, ніж останні п'ять років, отже ступінь дії середовища міг досягати сильно агресивного впродовж усього терміну експлуатації труби.

Оцінено кінетику корозії за роботою [9]. Результати оцінювання наведено на рис. 3, з якого видно, що для сильно агресивної дії середовища (твердого аерозолу та газу діоксиду азоту NO_2) швидкість руйнування поверхневого шару незахищеної металеві конструкції може перевищити $0,5\text{ мм/р.}$, а зниження міцності в зоні корозії за рік перевищити 15% .

У випадку середньо агресивної дії середовища (фактичні показники викидів менші ГДК або режим середовища менш вологий до нормального) швидкість руйнування поверхневого шару незахищеної металеві конструкції може бути в межах $0,1\text{--}0,5\text{ мм/р.}$ (рис. 3), а зниження міцності в зоні корозії за рік – у межах $5\text{--}15\%$.

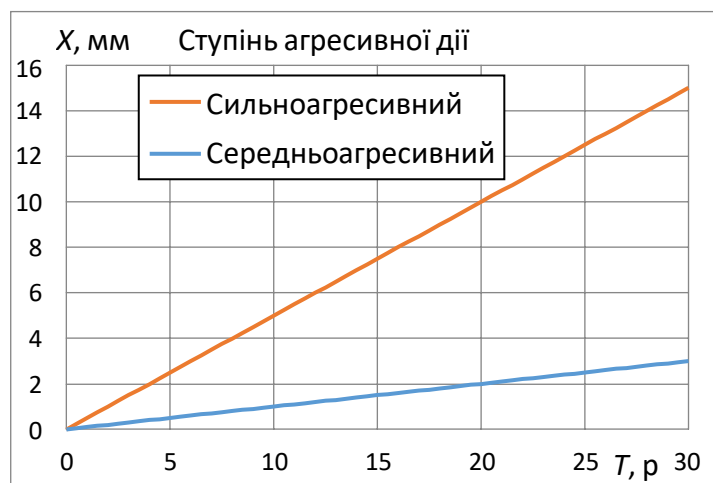


Рис. 3. Кінетика корозії (залежність глибини корозійного руйнування X , мм, від часу T , роки) незахищеної металеві конструкції за середньо агресивного та сильно агресивного ступеня дії середовища

Аналіз швидкості корозії за результатами товщинометрії. Результати вимірювань товщини стінки труби a по всій висоті наведені на рис. 4, *а*. Глибина корозійних пошкоджень, мм, по висоті (рис. 4, *б*) визначена в такий спосіб:

$$X = a_0 - a_t, \quad (2)$$

де a_0 і a_t – первинна і поточна товщина стінки відповідно.

Розподіл швидкості корозії, мм/р., по висоті (рис. 4, *в*) визначено як

$$v = X/T, \quad (3)$$

де T – тривалість експлуатації, 20 років.

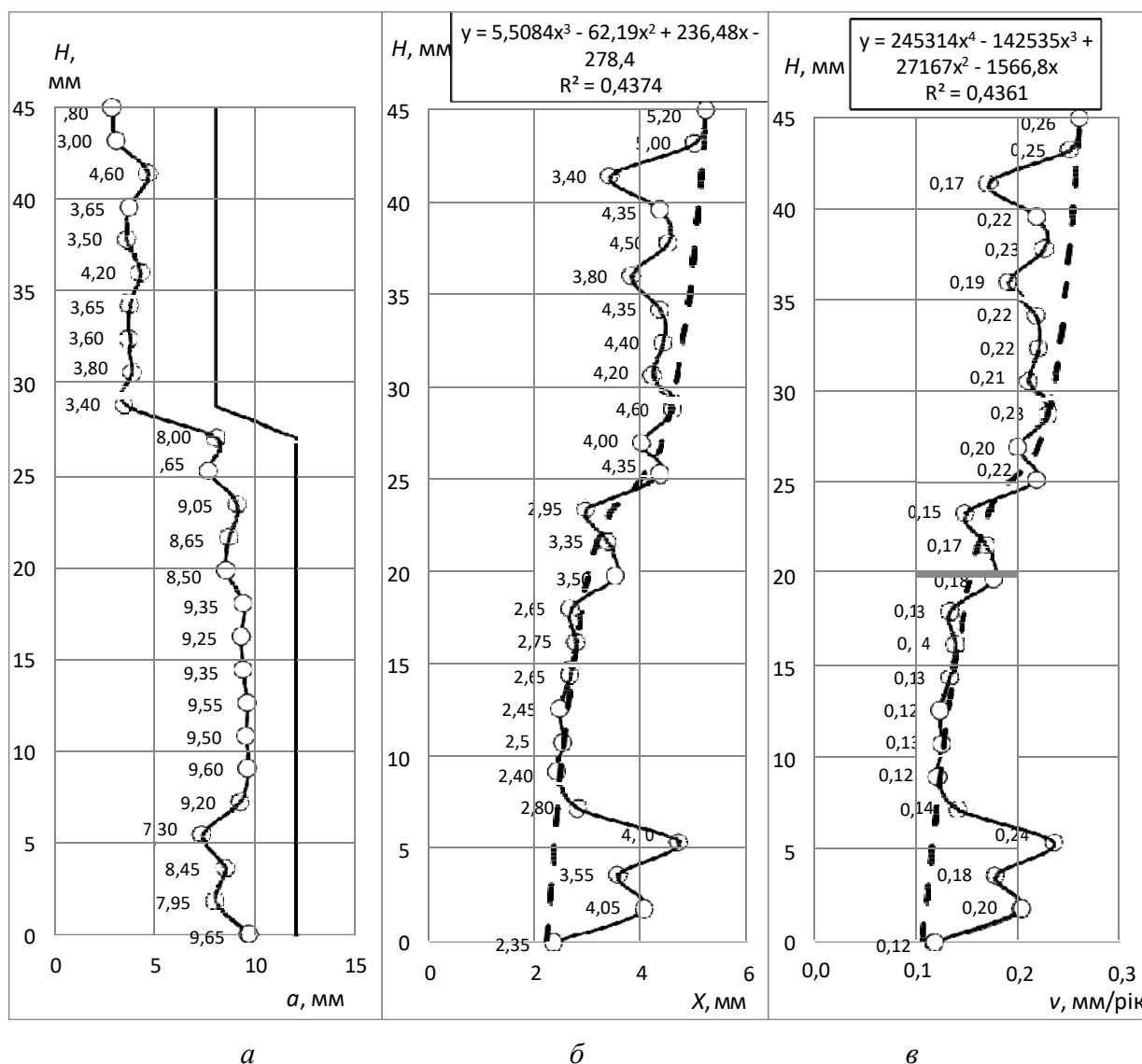


Рис. 4. Розподіл по висоті H :
а – первинної (суцільна лінія) і залишкової товщини стінки труби;
б – глибини корозійного ушкодження X ; *в* – швидкості корозії v

Аналіз конструктивних особливостей труби (рис. 1), характеру та глибини корозійних ушкоджень та швидкості корозії

(рис. 2, 4), показав, що її умовно можна поділити на три зони, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розподіл труби на зони корозії

Частина труби за висотою, м		Зона за інтенсивністю корозії	Глибина корозії X, мм	Швидкість корозії V, мм/р.
Верхня	25–45	Зона утворення конденсату і найбільш інтенсивної корозії	3,40–5,20	0,17–0,26
Середня	6–25	Добре вентилявана зона найменш інтенсивної корозії над уводом димоходу	2,40–3,50	0,12–0,18
Нижня	0–6	Невентильована застійна зона корозії середньої інтенсивності нижче уводу димоходу	2,35–4,70	0,12–0,24

Із рис. 4 і табл. 1 видно, що фактичні показники швидкості корозії знаходяться в межах 0,1–0,5 мм, отже, ступінь агресивної дії відповідає середньо агресивному з деякими відмінами для різних зон по висоті труби.

Аналіз напружено-деформованого стану труби виконано з урахуванням корозійних пошкоджень, зокрема результатів товщинометрії, наведених на рис. 4. Розрахунки виконувалися методом скінченних елементів за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР 2018 Pro (ліц. №1/6638). Розрахункова схема (рис. 5) складена з універсальних скінченних

елементів оболонки (для стовбура). Спіральні ребра у верхній частині не враховувались. Розрахунковий опір сталі марки С253 прийнято рівним 230 МПа.

Вихідні кліматичні дані для розрахунку, прийняті за дод. Е ДБН В.1.2-2:2006 для м. Запоріжжя: характеристичне значення вітрового тиску – 460 Па; характеристичне значення тиску вітру при ожеледі – 260 Па; характеристичне значення товщини ожеледі – 19 мм. Температурний режим експлуатації: $T_{вн} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{зовн} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Опис розрахункових комбінацій навантажень наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахункові комбінації навантажень

Власна вага труби	Вітрове навантаження на трубу	Нерівномірний нагрів ($t_{вн} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{зовн} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Вітрове навантаження на трубу, вкриту ожеледдю	Вага ожеледі на стовбурі труби
+	+	–	–	–
+	+	+	–	–
+	–	–	+	+
+	–	+	+	+

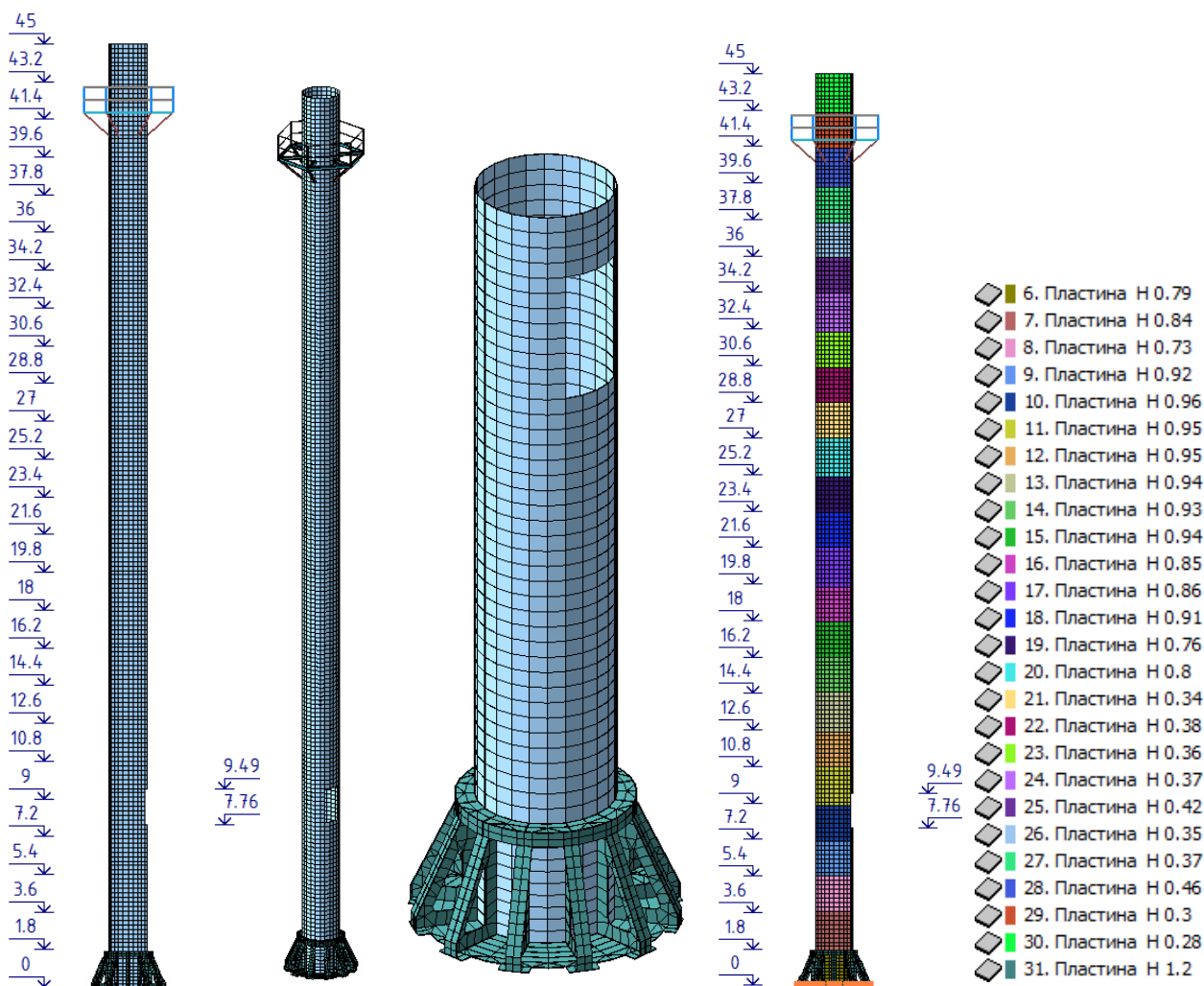


Рис. 5. Розрахункова схема

Отримані в результаті розрахунків поля напружень у стінках труби наведені на рис. 6, величини напружень у перерізах, для яких визначали товщину стінок труби, – у табл. 3.

Оцінювання несучої здатності і експлуатаційної надійності здійснено коефіцієнтами використання перерізів (коефіцієнтами вичерпання несучої здатності (табл. 3)) за методом граничних станів. Несуча здатність труби з урахуванням поточних даних товщинометрії забезпечується з

коефіцієнтом використання 0,65 за першою групою граничних станів (міцність) та 0,62 – за другою групою (жорсткість), максимальні відхилення становлять 280 мм.

Визначено також граничні значення товщини стінки $a_{гр}$ та глибини корозійного пошкодження $X_{гр}$ у перерізах, які забезпечують виконання умов щодо несучої здатності (табл. 3). Найбільш несприятливі значення $a_{гр}$ та $X_{гр}$ – 6,48 мм і 3,12 мм відзначаються в місці врізання газоходу (відмітка 9,0 м), яке є найбільш небезпечною зоною конструкції.

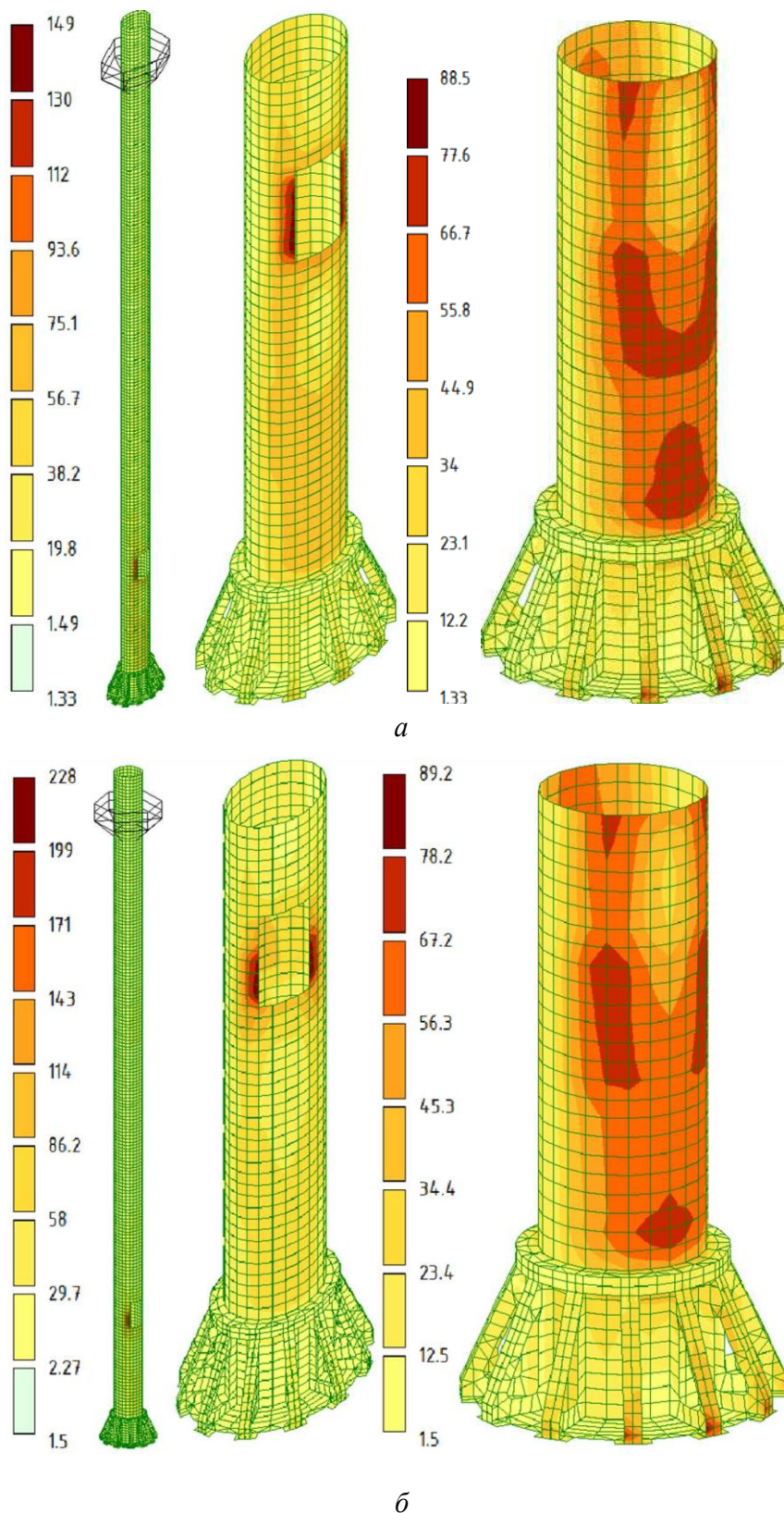


Рис. 6. Поля напружень у стінках труби, МПа: *a* – товщиною за товщинометрією (рис. 3); *б* – зі зменшеною до граничного значення 6,48 мм товщиною в місці врізання газоходу

Таблиця 3

Результати розрахунку та часу досягнення граничного стану

Зона труби	H , м	Поточна товщина стінки a_t , мм	V , мм/р.	Напруження, МПа	Коефіцієнт використання	Гранична величина за розрахунком, мм		Час досягнення граничного значення $t_{гр}$ роки
						товщини стінки $a_{гр}$	глибини пошкодження $X_{гр}$	
верхня	45,0	2,80	0,26	19	0,08	0,46	2,34	9,0
	43,2	3,00	0,25	26,4	0,11	0,51	2,49	10,0
	41,4	4,60	0,17	29,9	0,13	0,62	3,98	23,4
	39,6	3,65	0,22	20,2	0,09	0,54	3,11	14,1
	37,8	3,50	0,23	20,6	0,09	0,6	2,9	12,6
	36,0	4,20	0,19	22,9	0,1	0,67	3,53	18,6
	34,2	3,65	0,22	27,3	0,12	0,72	2,93	13,3
	32,4	3,60	0,21	30,5	0,13	0,76	2,84	13,5
	30,6	3,80	0,23	35,1	0,15	0,81	2,99	13,0
	28,8	3,40	0,20	40,3	0,18	0,88	2,52	12,6
середня	27,0	8,00	0,22	31,5	0,14	0,98	7,02	31,9
	25,2	7,65	0,15	25,5	0,11	1,17	6,48	43,2
	23,4	9,05	0,17	26,5	0,12	1,29	7,76	45,6
	21,6	8,65	0,18	32,6	0,14	1,36	7,29	40,5
	19,8	8,50	0,13	37,1	0,16	1,54	6,96	53,5
	18,0	9,35	0,13	38,8	0,17	1,7	7,65	58,8
	16,2	9,25	0,14	40,9	0,18	1,85	7,4	52,9
	14,4	9,35	0,13	42,9	0,19	1,96	7,39	56,8
	12,6	9,55	0,12	54,9	0,24	2,26	7,29	60,8
	10,8	9,50	0,13	139,8	0,61	6,28	3,22	24,8
	9,0	9,60	0,12	148,9	0,65	6,48	3,12	26,0
	7,2	9,20	0,14	70,5	0,31	2,98	6,22	44,4
нижня	5,4	7,30	0,24	86,6	0,38	3,04	4,26	17,8
	3,6	8,45	0,18	86,9	0,38	3,4	5,05	28,1
	1,8	7,95	0,20	60,8	0,26	2,58	5,37	26,9
	0	9,65	0,12	54,3	0,24	2,8	6,85	57,1

Розрахунок часу, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного значення, для кожного виміряного перерізу труби:

$$T_{zp} = X_{zp} / v, \quad (4)$$

Результати розрахунку наведені в табл. 3 і на рис. 7, із якого видно, що в нижній, середній і верхній зонах труб на відмітках 5,4, 9 і 45 м граничний стан буде досягнуто через 17,8, 24,8 і 9 років, відповідно (рис. 8). Отже, без заходів із ремонту і захисту остаточний ресурс труби не перевищуватиме дев'яти років.

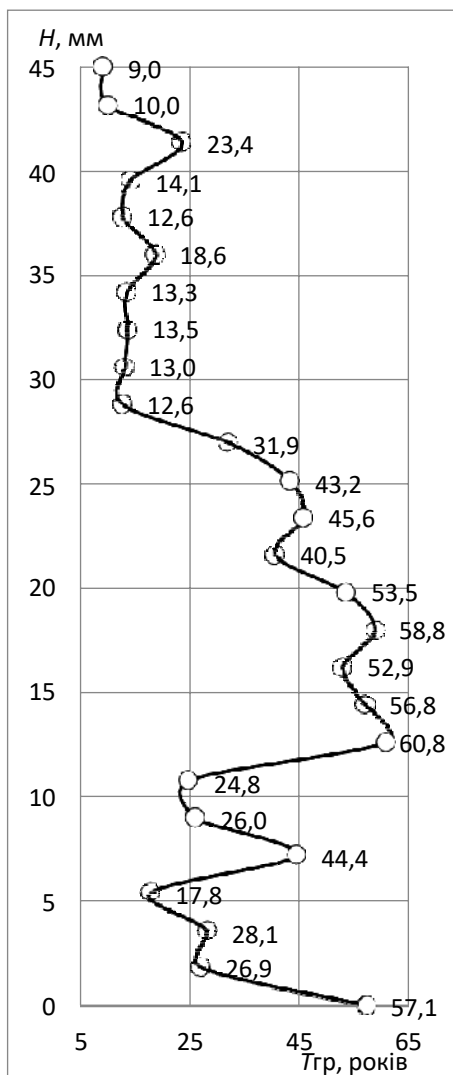


Рис. 7. Розподіл за висотою часу досягнення граничної величини глибини корозійного пошкодження конструкції труби $T_{гр}$

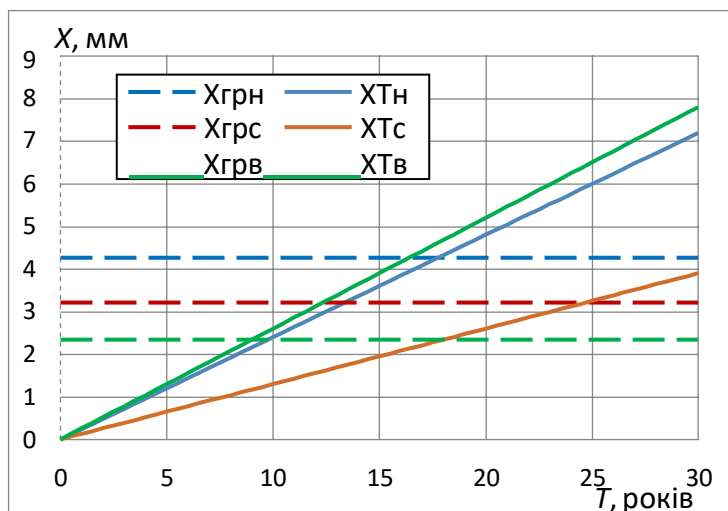


Рис. 8. Залежність від часу T глибини корозійного пошкодження конструкції труби в нижній $X_{Тн}$, середній $X_{Тс}$ і верхній $X_{Тв}$ зонах та граничні величини глибини корозійного пошкодження в нижній $X_{Грн}$, середній $X_{Грс}$ і верхній $X_{Грв}$ зонах

Рекомендації з подовження ресурсу димової труби. Для подовження терміну служби труби рекомендовано такі заходи з ремонту і захисту від корозії:

- для збільшення остаточного ресурсу з 9 до 18 років рекомендовано замінити верхню частину труби з товщиною стінки 8 мм [10], а також виконати підсилення місця врізання димоходу; верхню частину труби виконати з вуглецевої сталі або корозійностійкої хромонікелевої сталі;

- збільшення остаточного ресурсу понад 18 років рекомендовано нанести на внутрішню поверхню і заміненої і залишеної частини труби антикорозійне покриття, термін служби якого визначатиме величину цього збільшення; у разі виконання замінюваної частини труби з корозійностійкої хромонікелевої сталі антикорозійне покриття на цій частині не потрібне.

Як антикорозійне покриття рекомендовано кремнійорганічне чи епоксидне термостійке покриття IV групи товщиною 130 мм, нанесене у п'ять шарів (для епоксидного за умови забезпечення товщини кількість шарів допускається зменшити), або газотермічне напilenня шару алюмінію товщиною 200–250 мм. За умови своєчасного відновлення антикорозійного покриття остаточний ресурс труби може бути доведений до показників довговічності залізобетонних та цегляних труб 70–80 років.

Висновки. Виконано комплексне дослідження корозійних процесів, пошкоджень і несучої здатності металеві димової труби висотою 45 м, що відводить газодимову суміш, утворювану в технологічних процесах кольорової металургії і розроблено методику прогнозування її остаточного ресурсу. У результаті аналізу складу і температурно-вологісного режиму зазначеної суміші встановлено, що вона є агресивним до сталі газоподібним середовищем і спричиняє корозію труби зсередини.

У результаті аналізу результатів замірів товщини стінки труби встановлено, що глибина корозійних ушкоджень за 20 років експлуатації досягла 2,35–5,2 мм, у верхівці труби до окремих наскрізних пошкоджень, швидкість корозії склала 0,12–0,26 мм/р., що відповідає середньому агресивному ступеню дії газоподібного середовища на вуглецеві сталі.

За інтенсивністю корозії труба поділяється на три умовні зони: нижня (від 0 до 6 м) – невентильована застійна зона корозії середньої інтенсивності нижче вводу димоходу (швидкість корозії 0,12–0,24 мм), середня (6–25 м) – добре вентильована зона менш інтенсивної корозії над вводом димоходу (0,12–0,18 мм/р.); верхня (25–45 м) – зона утворення конденсату та найбільш інтенсивної корозії (0,17–0,26 мм/р.).

Аналіз напружено-деформованого стану труби з урахуванням корозійних пошкоджень показав, що найбільш навантаженою небезпечною зоною конструкції є місце врізання горизонтального димоходу, а несуча здатність труби забезпечена з коефіцієнтом використання матеріалу 0,62–0,65. Визначено граничні значення товщини стінки та глибини корозійного пошкодження в перерізах, які забезпечують виконання умов до несучої здатності. Найбільш несприятливі значення 6,48 мм і 3,12 мм відповідно відзначаються на відмітці 9 м біля місця врізання димоходу.

Виходячи з величин швидкості корозії для всіх перерізів визначено час досягнення граничного стану. У нижній, середній і верхній зонах труб на відмітках 5,4, 9 і 45 м граничний стан буде досягнуто через 18, 25 і 9 років відповідно, отже, без заходів із ремонту і захисту остаточний ресурс труби не перевищує дев'яти років.

Для збільшення остаточного ресурсу труби до 18 років рекомендовано замінити верхню частину труби, а понад 18 років – здійснити захист внутрішньої поверхні термостійкою кремнійорганічною або епоксидною емаллю. Додаткове понад

18 років збільшення остаточного ресурсу дорівнюватиме терміну служби покриття. За умови своєчасного відновлення антикорозійного покриття остаточний

ресурс труби може бути доведений до показників довговічності залізобетонних та цегляних труб 70–80 років.

Список використаних джерел

1. Ельшин А. М. Дымовые трубы. Москва: Стройиздат, 2001. 296 с.
2. Оцінка впливу викидів на корозію металевої труби на Запорізькому заводі кольорових металів і розробка заходів із захисту від корозії: звіт з НДР за договором №17/0723. Харків: ТОВ «Харківбудндрпроект», 2023.
3. Основи теорії тверднення, міцності, руйнування і довговічності портландцементу, бетону і конструкцій із них. Т. 3. Теорія міцності, руйнування і довговічності бетону, залізобетону і конструкцій із них / А. М. Пługін, А. А. Пługін, О. А. Калінін та ін.; за ред. А. М. Пługіна. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/331533663_Fundamentals_of_the_theory_of_hardening_strength_destruction_and_durability_of_Portland_cement_concrete_and_structures_made_of_them_Vol3_Theory_of_strength_destruction_and_durability_of_concrete_reinf.
4. Яровий С. М., Слободянюк С. О., Титюк А. О. Фізико-статистичний метод оцінки надійності елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. *Науковий вісник будівництва*. 2019. № 2 (96). С. 264-269.
5. Serhii Yaroviy, Mykola Savytskyi, Serhii Slobodianiuk. Ensuring the reliability of metal smoke and veintilation pipes and their carrying towers. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 106 (2021) 176-200. DOI: 10.32347/2410-2547.2021.106.176-200.
6. Fahrudin Kurniawan, Wawan Trisnadi, M. Munaji, Rizal Arifin. Investigasi mekanisme korosi pada pipa pemanas udara di Pabrik Gula Pagotan Madiun. *Turbo Jurnal Program Studi Teknik Mesin* 10(1) 2021. DOI: 10.24127/trb.v10i1.1352.
7. Afrizal Vachlepi. Characterization of Iron Metal Corrosion in Liquid Smoke Coagulant. *Procedia Chemistry* 16 (2015) DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.073
8. Mengke Zhao, Jian Rui Feng, Qian Li, Jin Lin Corrosion behavior and failure mechanism of ball grid array packages in fire smoke atmospheres. *Engineering Failure Analysis*, February 2024. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2023.107811.
9. Захист будівельних конструкцій та споруд від агресивних впливів / А. А. Пługін, І. Е. Казімагомедов, О. О. Скорик, Т. О. Костюк, О. Б. Деденьова, О. А. Калінін. Харків: УкрДУЗТ; ХНУБА, 2017. 188 с.
10. Жван В. Д., Доненко В. І., Антипенко Є. Ю. Технологія зведення спеціальних будівель та споруд. Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. 377 с.

Пługін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Жван Віктор Денисович, кандидат технічних наук, професор кафедри будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID iD: 0009-0006-7593-1696.

Тел.: +38 (067) 570-05-16. E-mail: bud.nuzp@gmail.com.

Лобяк Олексій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельної механіки та гідравліки, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245. Тел.: +38 (057) 730-10-70. E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Назаренко Олексій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка».

ORCID iD: 0000-0003-3738-1129. Тел.: +38 (061) 769-85-03. E-mail: kafedra_bud@zp.edu.ua.

Микитась Сергій Валентинович, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту.

E-mail: mikitas@kart.edu.ua.

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel. +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin_aa@kart.edu.ua.

Zhvan Viktor PhD (Tech). Professor of the Department of Development and Project Management, National University "Zaporizhzhia Polytechnic" of Ukraine ORCID iD: 0000-0002-2541-2066. Tel.: +38(061)7698503.

Тел.: +38 (067)5700516. E-mail: kafedra_bud@zp.edu.ua; viktor.zhvan@ukr.net

Lobiak Oleksii, PhD (Tech). Associate Professor, department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-9553-4245. Тел.: +38 (057) 730-10-70.

E-mail: lobiak_bmg@kart.edu.ua.

Nazarenko Oleksiy Mykolayovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Development and Project Management, National University "Zaporizhzhya Politechnic". ORCID iD: 0000-0003-3738-1129. Tel.: +38 (066) 783-98-55. E-mail: bvup2021@ukr.net, alexnazar75.an@gmail.com

Mikitas Serhiy, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: mikitas@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 19.03.2024 р.