

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.9:624.07:628.5

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ КОКСОХІМІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Д-р техн. наук А. А. Плугін, кандидати техн. наук В. Д. Жван, О. В. Лобяк, О. М. Назаренко, аспіранти Е. Ф. Наджафов, А. О. Березовська

FORECASTING THE FINAL RESOURCE OF THE REINFORCED CONCRETE CHIMNEY PIPE OF THE COKE CHEMICAL PRODUCTION

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, candidats of eng. scien. V. D. Zhvan, O. V. Lobyak, O. M. Nazarenko, postgraduate students E. F. Najafov, A. O. Berezovska

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.208.2024.308146>



Анотація. Комплексно досліджено технічний стан, корозійні процеси, пошкодження і несучу здатність залізобетонної димової труби, яка відводить газодимову суміш, що утворюється в технологічних процесах коксохімічного виробництва і є агресивним середовищем. Розроблено методику прогнозування залишкового ресурсу конструкції труби. Встановлено, що пошкодженням, яке визначає залишковий ресурс, є обвалення футерування, після якого відбувається активне корозійне пошкодження залізобетонної конструкції. Проаналізовано склад і температурно-вологісний режим агресивного середовища, встановлено ступінь його агресивної дії та показники кінетики корозії труби зсередини. Проаналізовано напружено-деформований стан труби з урахуванням корозійних пошкоджень, визначено найбільш навантажену небезпечну зону її конструкції, граничні значення товщини стінки та глибини корозійного пошкодження в цій зоні, які забезпечують виконання умов до несучої здатності. Виходячи з величин швидкості корозії визначено час досягнення граничного стану. Показано, що без заходів із ремонту і захисту залишковий ресурс труби не перевищує 11 років. Рекомендовано в найкоротший термін здійснити капітальний ремонт труби з усуненням пошкоджень і відновленням футерування або не пізніше, ніж через 10 років зруйнувати споруду зі зведенням нової.

Ключові слова: залізобетонна димова труба, агресивні гази, корозія, несуча здатність, прогнозування довговічності.

Abstract. A comprehensive study of the technical condition, corrosion processes, damage and load-bearing capacity of the reinforced concrete chimney pipe, which removes the gas-smoke mixture formed in the technological processes of coke-chemical production and is an aggressive environment, was performed. A methodology for predicting the remaining resource of the pipe structure has been developed. It was established that the damage that determines the ultimate resource is the collapse of the lining, after which active corrosion damage of the reinforced concrete structure occurs. An analysis of the composition and temperature-moisture regime of the aggressive medium was performed. It was established that it is gaseous, the most aggressive components of which are acid gases, the degree of aggressive action is moderately aggressive, possibly strongly aggressive. Corrosion of concrete progresses in a concentric front from the inner surface of the chimney to the

outer surface at a rate of 1.2 to 4.8 mm/year. The corroded layer of concrete loses its strength and protective properties to the reinforcement. An analysis of the stress-strain state of the pipe taking into account corrosion damage was performed, the most heavily loaded dangerous zone and its structure were determined, and the limit values of the wall thickness and the depth of corrosion damage in this zone were determined, which ensure the fulfillment of the conditions for bearing capacity. Based on the values of the corrosion rate, the time to reach the limit state is determined. It is shown that without repair and protection measures, the remaining service life of the pipe does not exceed 11 years. It is recommended to carry out a major repair of the pipe as soon as possible with the elimination of damage and restoration of the lining, or no later than after 10 years to carry out the liquidation of the structure with the construction of a new one.

Keywords: reinforced concrete chimney, aggressive gases, corrosion, carrying capacity, durability prediction.

Вступ. У металургії, паливно-енергетичному комплексі, виробництві будівельних матеріалів більшість технологічних процесів забезпечені горінням палив, що є окисненням сполук вуглецю киснем повітря. Підведення повітря та відведення продуктів горіння забезпечено природною тягою, створюваною за допомогою металевих, цегляних, залізобетонних димових труб [1]. Інтенсивність тяги пропорційна висоті труби, тому труби потужних підприємств мають бути капітальними довговічними спорудами.

Металеві труби будують висотою не більше 60 м. Подальше збільшення висоти металевих труб потребує облаштування підтримувальних конструкцій – каркасів, відтяжок, що різко збільшує вартість будівництва. Цегляні труби будували висотою до 178,3 м (труба мідеплавильного заводу в м. Анаконда, США, зведена в 1919 р.). Завдяки високій корозійній стійкості кераміки в будь-яких середовищах, включно димових газів, цегляні труби характеризують високою довговічністю, що могла перевищувати сотню років. Проте через надто високу трудомісткість зведення та завдяки зростанню якості бетонів і удосконаленню технології зведення залізобетонних конструкцій у другій половині ХХ ст. цегляні труби були витиснені залізобетонними трубами, висота яких досягла вже 420 м (труба теплової електростанції в м. Екібастуз, Казахстан, зведена в 1987 р.).

Через недостатню корозійну стійкість бетону на портландцементі довговічність залізобетонних труб забезпечена футеруванням зсередини керамічною цеглою і виконанням цегляного оголовка, при пошкодженні (обваленні) футерування може суттєво знизитися. Терміни служби футерування менше, ніж несучої конструкції труби, тому впродовж експлуатації стан футерування та залізобетонної конструкції в місцях обвалення потребує постійного моніторингу, який ускладнений безперервністю технологічних процесів, що забезпечує труба. Через нетривалий порівняно з економічно обґрунтованою довговічністю досвід будівництва та експлуатації залізобетонних димових труб (переважно з 1970-х рр.) і різний хімічний склад газодимових сумішей багато аспектів моніторингу їхнього стану, прогнозування довговічності та раціонального розподілу ресурсів на поточні та капітальні ремонти залишаються невивченими.

Стаття підготовлена за матеріалами досліджень корозійного стану залізобетонної димової труби, якою відводять газу від коксових батарей коксохімічного виробництва [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Довговічність будівельних конструкцій і споруд визначають здатністю матеріалів, з яких вони зведені, зберігати свої властивості в часі, а отже, кінетикою їхньої деградації. Деградацію матеріалів намагаються моделювати за допомогою

кінетичних і статистичних теорій. За флуктуаційною теорією Журкова, деградація матеріалів відбувається внаслідок розриву хімічних зв'язків у них від теплових флуктуацій і напружень, а час τ від прикладання навантаження до руйнування визначає довговічність конструкції з цього матеріалу [3]:

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

де τ_0 – постійна, що для всіх матеріалів знаходиться в межах 10^{12} – 10^{13} с;

V – енергія активації розриву зв'язку;

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

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура.

Щодо залізобетонних димарів, то практичне застосування цього рівняння надто ускладнено гетерогенністю їхньої конструкції (різні складові бетону і мурувального розчину, арматура, теплоізоляційний матеріал, цегла футерування), неврахуванням корозійних процесів і поступового зменшення перерізу конструкцій від них.

У роботі [4] показано, що пошкодження залізобетонних конструкцій труб пов'язані з агресивним впливом продуктів згоряння і запропоновано заходи з ремонту труб з урахуванням цього впливу. У роботах [5, 6] удосконалено методики діагностування стану труб, пошкодження пов'язують із термічними впливами, запропоновано застосовувати тепловізійне обстеження. Зазначено, що руйнівним фактором є і кислотний конденсат, що проникає крізь футерування і теплоізоляцію до залізобетонної конструкції, проте прогнозування залишкового ресурсу на основі врахування агресивних впливів не пропонують. У роботі [7] досліджено процеси, що відбуваються під час ліквідації труб після вичерпання їхнього ресурсу, проте не спрогнозовано цей ресурс.

Визначення мети та завдань досліджень. Мета досліджень – уточнення методики визначення залишкового ресурсу залізобетонної димової труби коксохімічного виробництва. Завдання досліджень: аналіз конструкції, умов експлуатації і результатів натурного обстеження труби; оцінювання показників кінетики корозійного пошкодження; аналіз напружено-деформованого стану конструкції труби; прогнозування залишкового ресурсу та рекомендації з його подовження.

Основна частина дослідження Конструкція і поточний стан труби.

Труба коксового цеху (рис. 1) спроектована в 1949 р., на момент обстеження перебувала в експлуатації 71 рік. За проектом, висота труби 90 м, зовнішній діаметр на рівні землі – 7,3 м, на рівні верхнього вихідного обрізу – 3,84 м, схил зовнішньої поверхні труби $i = 0,02$, внутрішній діаметр вихідного отвору – 3 м. Стовбур труби до відмітки 85 м монолітний залізобетонний із бетону М200, армований сіткою $\varnothing 20A-II$ 200×200 мм із захисним шаром 30 мм (від зовнішньої поверхні), вище 85 м – із керамічної цегли марки 100 на цементно-піщаному розчині М50. Футерування димохідного каналу з відмітки 2,81 до 90 м товщиною 120–250 мм із керамічної цегли на цементно-піщаному розчині М30. Між футеруванням і залізобетонною несучою конструкцією улаштовано теплоізоляцію з мінеральної вати. Фундамент кільцевий стаканного типу, монолітний залізобетонний. Труба споряджена металевою драбиною з огороженням, світлофорними майданчиками на відмітках 54,6 та 84,5 м, блискавкозахистом. Димові гази підводять до труби двома газоходами.

Під час експлуатації в димохідному каналі періодично траплялися вибухи незгорілих газів, а з 1998 р. – випадки порушення теплового режиму труби через технологічні зупинки. У 2003 і 2019 рр. було обвалення футерування в обсязі 10–15 м³ і понад 90 м³ відповідно. Очевидно, у результаті огляду димового каналу знизу під

час видалення обваленого футерування було припущено, що обвалення сталося на відмітках орієнтовно 25–35 м.

Виконані у 2021 р. візуальний огляд за допомогою оптичних приладів, фото- та відеозйомка труби, у т. ч. за допомогою БПЛА, показали наявність таких пошкоджень (рис. 1, в, г): горизонтальні тріщини, раковини та відколи бетону по їхніх краях без оголення арматури, а також висоли-пательки виключно в місцях горизонтальних швів бетонування (рис. 2, а);

вертикальні тріщини розкриттям до та понад 1 мм на відмітках від 25 до 82 м (рис. 2, б). Поточний стан каналу димоходу залишився невідомим через незупинний технологічний процес і, отже, неможливість огляду. Відхилення осі труби від вертикального положення не виявлено. Міцність бетону на відмітці 1,5 м визначено неруйнівним методом за допомогою ультразвукового приладу – у межах 11,5–12,1 МПа.

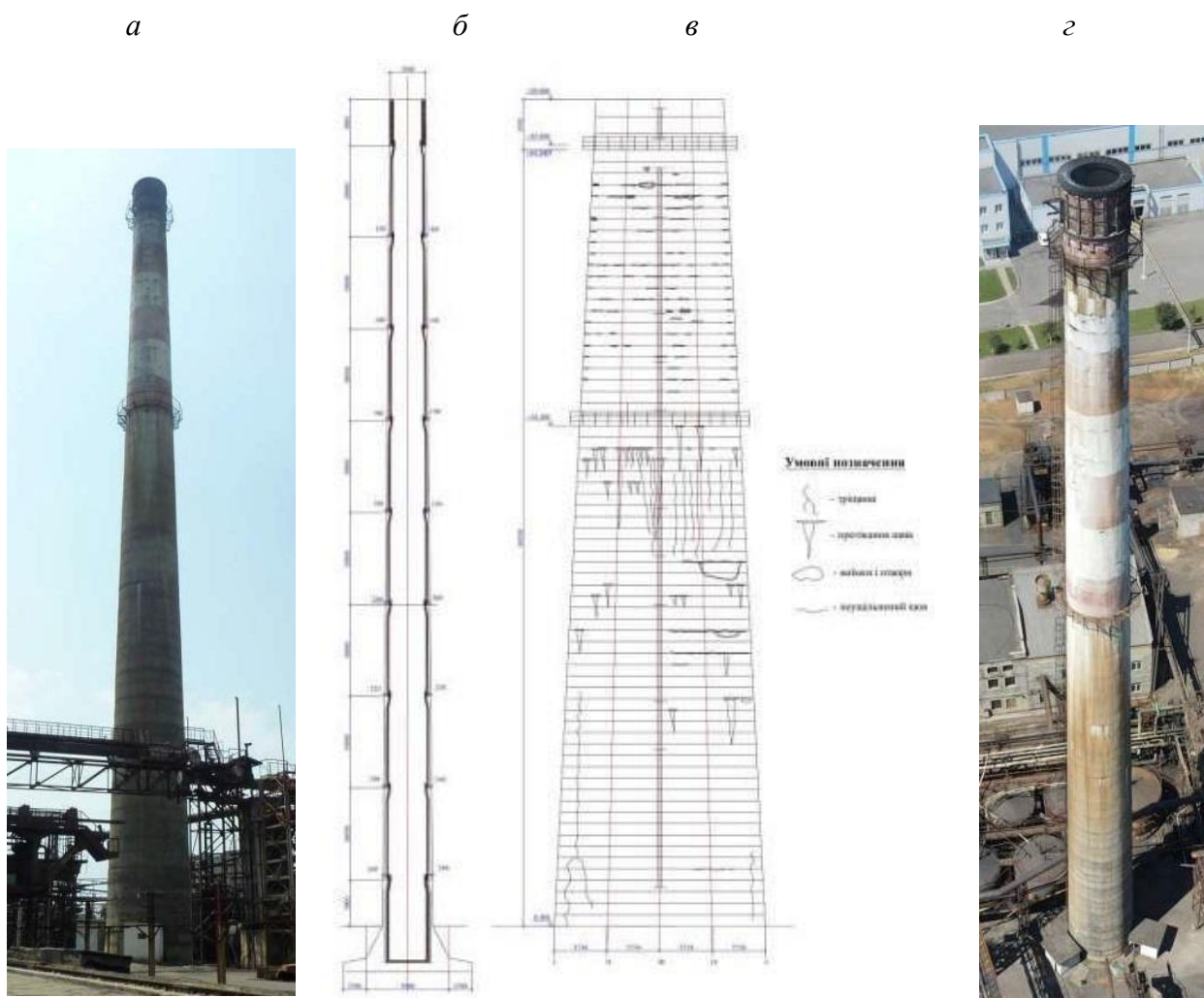


Рис. 1. Димова труба коксового цеху: а – вигляд із землі; б – схема конструкції; в – карта пошкоджень; г – вигляд із БПЛА



Рис. 2. Дефекти і пошкодження залізобетонної конструкції труби:
а – раковини без оголення арматури, горизонтальні тріщини та висоли-пательки в місцях горизонтальних швів бетонування;
б – вертикальні тріщини розкриттям понад 1 мм

Методика прогнозування залишкового ресурсу труби. Припущено, що залишковий ресурс труби визначають кінетикою корозії бетону (швидкістю, мм/р.) у місцях обваленого футерування, а агресивним середовищем є газодимова суміш; корозія просувається фронтом, а в кородованому шарі бетон втрачає міцність і захисні властивості відносно арматури, отже, відбувається зменшення товщини залізобетонної стінки труби і площі поперечного перерізу. За залишковий ресурс прийнято час, за який товщина стінки в критичній зоні досягне граничного за несучою здатністю значення. За цими припущеннями запропонована така послідовність прогнозування залишкового ресурсу:

1) тепловізійне обстеження поверхні труби з БПЛА з уточненням зон із втраченим футеруванням, у яких відбуваються корозія бетону, зменшення площі перерізу та несучої здатності;

2) відбір проб і лабораторне дослідження корозійного стану та фізико-механічних властивостей бетону в місцях втраченого футерування;

3) аналіз хімічного складу і температурно-вологісного режиму середовища (газодимова суміш) із визначенням ступеня агресивної дії і швидкості корозії;

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 залишкового ресурсу.

Тепловізійне обстеження поверхні труби виконано за допомогою БПЛА – квадрокоптера DJI Mavic 2 Advanced Enterprise, оснащеного тепловізійною камерою з сенсором Uncooled Vox Microbolometer, і програмного забезпечення DJI Pilot і Thermal Analysis Tool 2. У результаті тепловізійного обстеження отримано 750 зображень в ІЧ-діапазоні. Обробка їх (рис. 3) показала, що середня температура зовнішньої поверхні труби складає 32,4 °С, проте на її верхній частині

спостерігають три локалізовані аномальні (нагріті) зони з максимальною температурою 112,7 °С, середньою температурою 76,7 °С: верхня кільцева висотою 5,65 м, площею 198,9 м² між відмітками 71,55 і 77,2 м; середня у вигляді плями висотою 2,4 м, площею 9,4 м² між відмітками 66 і 68,4 м; нижня кільцева висотою 9,1 м, площею 392,9 м² між відмітками 42,9 і 52 м. На нижній частині труби також спостерігають нагріті зони, у

т. ч. між відмітками 25 і 35 м, але менш упорядковано розподілені по її поверхні.

Положення аномальних зон у верхній частині труби відповідає зонам максимального розвитку пошкоджень труби, особливо зона між відмітками 42,9 і 52 м системі вертикальних тріщин. Це свідчить про втрату футерування і розвиток корозійного пошкодження бетону саме в цих зонах. У зоні відомої втрати футерування на відмітках 25–35 м також відзначають нагріті зони.

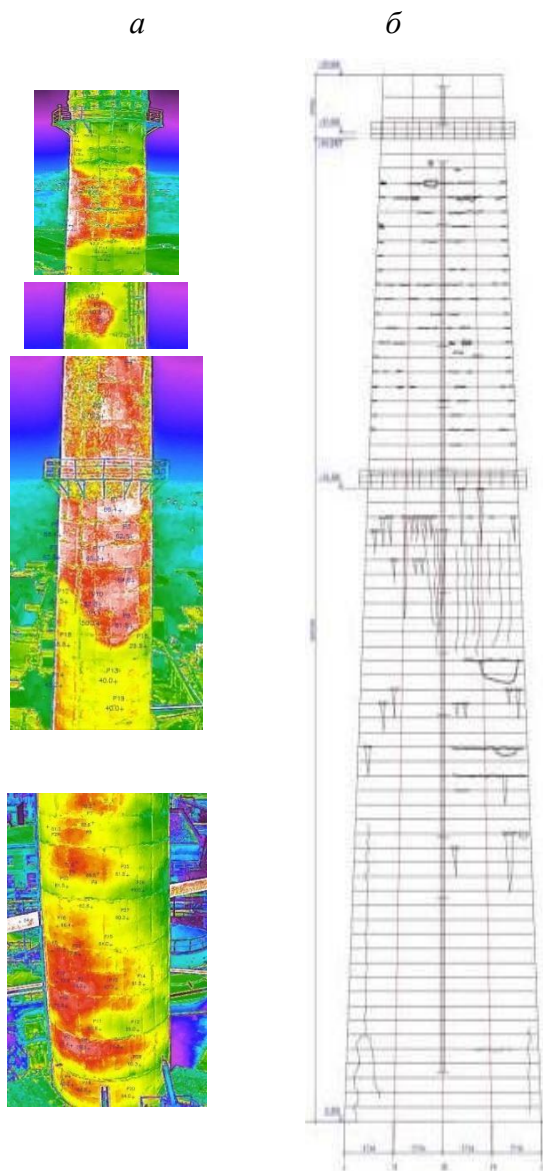


Рис. 3. Інфрачервоні зображення аномальних (нагрітих) зон (а) і карта пошкоджень (б) на поверхні труби

Відбір проб і лабораторне дослідження корозійного стану та фізико-механічних властивостей бетону. Проби бетону у вигляді двох кернів діаметром 43 мм відбирали кільцевим свердлом на відмітці 55,5 м. Під час висвердлювання обидва керни розпалися на фрагменти, менші за розміром ближче до внутрішньої поверхні стінки труби (рис. 4). Сумарну довжину кожного керна встановити точно не вдалося, орієнтовно вона знаходиться в межах 180-230 мм.

Петрографічні дослідження кернів, у т. ч. за допомогою світлового мікроскопа МБИ-3 у режимах збільшення $\times 7$, $\times 12,5$, $\times 25$ показали, що конструкція труби виконана з бетону важкого на портландцементі та щільних заповнювачах. Структура бетону базальна, зі значною кількістю розчинної частини та віддаленим розташуванням частинок крупного заповнювача (рис. 4, а). Крупний заповнювач – щебінь крупністю до 20 мм із щільного вапняку темного кольору (рис. 4, б), встановленого за реакцією з соляною кислотою та кристалічною будовою, характерною для кальциту. Дрібний заповнювач – пісок кварцовий

дрібний з окремими крупними зернами (рис. 4, б). Адгезійний характер руйнування кернів свідчить про слабе зчеплення між розчинною частиною і крупним заповнювачем.

Глибину корозійного пошкодження бетону за кернами встановити не вдалося. Проте на уламках кернів, що були ближче до внутрішньої поверхні стінки труби, спостерігали мелені поверхні розчинної частини, що свідчить про суттєве зниження її міцності через корозію. Тестування соляною кислотою показало «скипання», що свідчить про карбонізацію цементного каменю, а отже, втрату захисних властивостей бетоном відносно арматури. рН змочених водою поверхонь склав близько 7, водної витяжки – 6, що також свідчить про нейтралізацію і втрату захисних властивостей бетону. Водна витяжка мала жовтуватий колір, який може свідчити про наявність сіркомістких сполук. Виявлена на поверхні керна окрема ділянка з білим нальотом, схожим на крейду, з соляною кислотою не реагувала, отже могла бути іншими продуктами корозії – сірко- або азотвмісними солями кальцію.

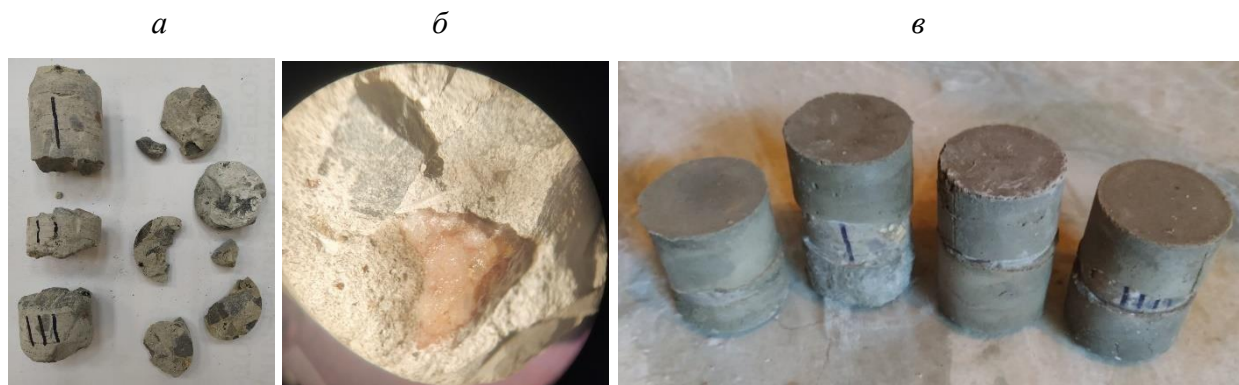


Рис. 4. Зразки-керни: а – загальний вигляд керна; б – відкол, світловий мікроскоп, $\times 12,5$, частинка сірого кольору – вапняк, рожевого – кварц; в – підготовлені для випробування на міцність зразки

Водопоглинання бетону за масою, визначене за ДСТУ Б В.2.7-170 за допомогою електронних ваг-вологоміра

RADWAG WPS 210/C/2 за трьома зразками – фрагментами кернів, ближчими до внутрішньої поверхні стінки труби, склало

7,1, 2,6, 8,6, у середньому 6,1 %, що відповідає бетону підвищеної проникності.

Для визначення міцності бетону найбільші фрагменти кернів, ближчі до зовнішньої некородованої поверхні стінки труби, доформували цементно-піщаним

розчином 1:2 (СЕМ І-500, пісок із модулем крупності 1,1) з В/Ц = 0,5 (рис. 4, в). Результати визначення міцності бетону за отриманими зразками-циліндрами за ДСТУ Б В.2.7-223 і ДСТУ Б В.2.7-214 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Визначення міцності бетону випробуванням

Номер		Розміри, см		h/d	Масштабні коефіцієнти		Руйнівна сила P , кгс	Міцність на стиск $f=0,098 \cdot 4\alpha\eta_1 P/\pi d^2$, МПа	
керн	зразка	d	h		α	η_1		зразка	середня
1	1 (I)	4,3	7,7	1,79	0,85	1,18	1860	12,6	17,3
	2 (III)	4,3	5,5	1,28	0,85	1,10	3670	23,2	
2	3 (I)	4,3	7,0	1,63	0,85	1,14	3230	21,1	
	4 (III)	4,3	6,4	1,49	0,85	1,13	1890	12,3	

Отже, за результатами петрографічного аналізу встановлено, що внутрішній шар бетону стінки труби зазнав нейтралізації кислотними газами і втратив захисні властивості до сталеві арматури. Його водопоглинання за масою складає 6,2 %, отже, він характеризується підвищеною проникністю. Середнє значення міцності бетону на стиск зовнішнього некородованого шару становить 17,3 МПа. Глибину корозійного пошкодження бетону встановити не вдалося.

Аналіз кінетики корозії за ступенем агресивної дії середовища. Конструкції, на які впливає потенційно агресивне середовище:

- канал димової труби – футерування, цегляне мурування у верхній частині труби, залізобетонна конструкція в місцях обвалення футерування;

- зона окутування – цегляне мурування верхньої частини труби ззовні (виконано під час будівництва як захід первинного захисту від корозії в зоні окутування).

Фізичний стан потенційно агресивного середовища – твердий (дим, сажа), газоподібний. Вологісний режим потенційно агресивного середовища: вологість газоповітряного середовища

невідома, проте через те, що під час коксування коксівне вугілля зневоднюється, припустимо, що його відносна вологість перевищує 60 %. За відносної вологості понад 60 % і температури понад 24 °С режим газоподібного середовища є «мокрим».

Тверде середовище – дим, сажа, містить незгорілі частинки вуглецю C і, очевидно, силікатів. Вуглець і силікати є малорозчинними та негіроскопічними, отже, до цегельного мурування, бетону і залізобетону мають неагресивний ступінь дії за будь-якого вологісного режиму середовища.

Газоподібне середовище містить сірчаний ангідрид, чадний газ, оксиди вуглецю. Щодо агресивності чадного газу CO до бетону і залізобетону даних нема. Припустимо, що ступінь його дії неагресивна. Сірчаний ангідрид і оксиди азоту є кислотними газами, які залежно від концентрації та вологісного режиму середовища можуть бути агресивними. У вихідних даних відсутня інформація про вміст у середовищі вуглекислого газу CO_2 . Оскільки він є основним продуктом згоряння вугілля, припустимо, що навіть за умови дефіциту кисню його вміст у

середовищі є не менше 2000 мг/м³. Вуглекислий газ є кислим газом, що залежно від концентрації та вологісного

режиму середовища може бути агресивним. Розрахунок агресивної дії газів зведено в табл. 2 і 3.

Таблиця 2

Зведені дані для розрахунків з визначення ступеня агресивної дії газоподібного середовища

Газ	Молярна маса M , г/моль	Вміст у середовищі				Група газів	Ступінь агресивного впливу		
		C_v , мл/м ³	$C_m = C_v M / 22,4$, мг/м ³		на цеглу керамічну		на бетон	на залізобетон	
Сірчаний ангідрид SO_2	64	280	800		D	Неагресивний	Середньо агресивний	Сильно агресивний	
Монооксид азоту NO	30	290	145	194	D	«	Середньо агресивний	Сильно агресивний	
Діоксид азоту NO_2	46		145	298					
Чадний газ CO	28	73	91		–	«	Неагресивний	Неагресивний	
Вуглекислий газ CO_2	44		понад 2000		B	«	Неагресивний	Середньо агресивний	

Таблиця 3

Інтегральний ступінь агресивної дії газоподібного середовища

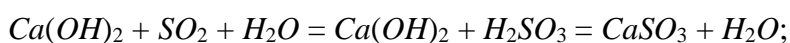
Матеріал, конструкція	Ступінь агресивної дії	Гази, що визначають сумарний ступінь агресивної дії
Цегельне мурування, футерування	неагресивний	–
Бетон	середньо агресивний	Кислі гази: сірчаний ангідрид SO_2 ; оксиди азоту $NO + NO_2$
Залізобетон	сильно агресивний	

Аналіз корозійних процесів.

Корозійно небезпечними елементами конструкції димової труби є місця з обваленим футеруванням, де з 2006 р. корозійних процесів зазнає безпосередньо залізобетонна конструкція.

Ураховуючи розташування робочої арматури ближче до зовнішньої поверхні

конструкції труби визначальною буде корозія бетону другого виду, за класифікацією Москвіна, у вигляді взаємодії розчинених у конденсаті кислих газів із продуктами гідратації цементу з утворенням сполук, що не мають в'язучих властивостей [8]. Утворені внаслідок розчинення кислих газів кислоти нейтралізують портландит $Ca(OH)_2$:



Утворені сульфат і нітрит кальцію не мають в'яжучих властивостей, у структурі цементного каменю заміщують собою кристалогідрати портландиту, що призводить до зниження міцності бетону. Сульфат кальцію подалі може перетворюватись у сульфати і переводити корозійний процес до більш інтенсивної корозії третього виду. Після вичерпання портландиту і зниження рН відбувається розкладання гідросилікатів кальцію. Корозії

сприяє розкладання високоосновних гідросилікатів кальцію та гідросульфоалюмінатів кальцію під впливом підвищеної температури 270 °С.

Корозійний процес просувається фронтом від внутрішньої поверхні димоходу до зовнішньої (рис. 5). З просуванням фронту корозії від внутрішньої поверхні до зовнішньої кородована зона перерізу втрачає міцність, і фактична товщина кільцевого перерізу зменшується.

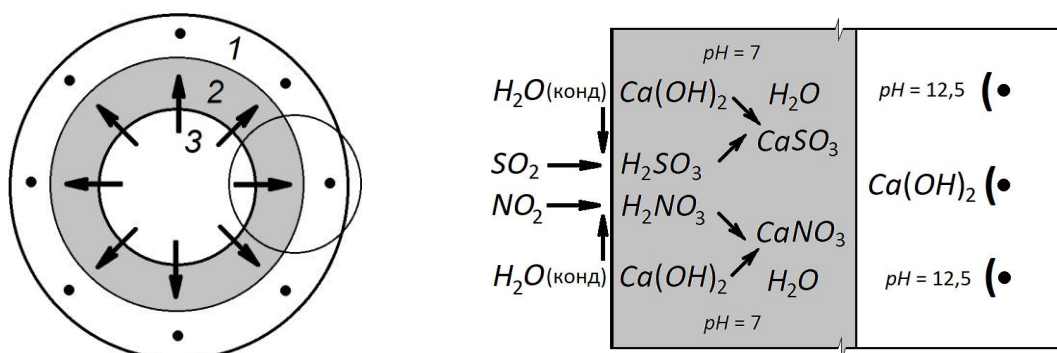


Рис. 5. Спрощена схема просування корозії в поперечному перерізі залізобетонної конструкції димової труби та процесів, що відбуваються:

1 – некородована частина перерізу з робочою арматурою; 2 – уражена корозією частина перерізу; 3 – агресивне середовище і напрямок просування корозійного процесу

Зниження рН призводить до втрати бетоном захисних властивостей відносно арматури та її корозії після досягнення неї фронтом корозії. Після досягнення фронтом корозії робочої арматури її спільна робота з бетоном порушиться, а власна корозія арматури під впливом кислих газів може розвиватися настільки швидко, що в першому наближенні можна прийняти момент досягнення робочої арматури фронтом корозії за момент неприпустимої втрати арматурою сприймати розтягувальні навантаження.

Вертикальні тріщини розкриттям до 1 мм у конструкції труби на висоті від 25 до 82 м можуть свідчити як про початок корозії арматури, так і зменшення товщини перерізу до величини, якої недостатньо для

сприйняття стискальних напружень від власної ваги конструкції.

Можливі граничні стани від розвитку корозії:

1) зменшення товщини перерізу до величини, якої недостатньо для сприйняття стиснутою зоною бетону стискальних напружень від власної ваги, випадкового ексцентриситету та вітрового навантаження;

2) досягнення фронтом корозії робочої арматури і втрата нею здатності сприймати розтягувальні напруження від випадкового ексцентриситету і вітрового навантаження.

Оцінювання кінетики корозії. У табл. 4 наведені дослідні дані з кінетики корозії неметалевих конструкцій [8]. Для аналізу приймемо найбільш несприятливу величину швидкості просування фронту

корозії для середньо агресивного ступеня агресивної дії $a = 1,2$ мм/р., а для сильно агресивного ступеня дії – величини, що перевищують нижню границю – 2,4 і

4,8 мм/р. Відповідні цим показникам швидкості корозії кінетичні залежності наведені на рис. 6.

Таблиця 4

Дослідні дані з кінетики корозії неметалевих конструкцій

Ступінь агресивної дії	Швидкість просування фронту корозії, мм/р.	
	Нижня границя	Верхня границя
Середньо агресивний	0,4	1,2
Сильно агресивний	1,2	–

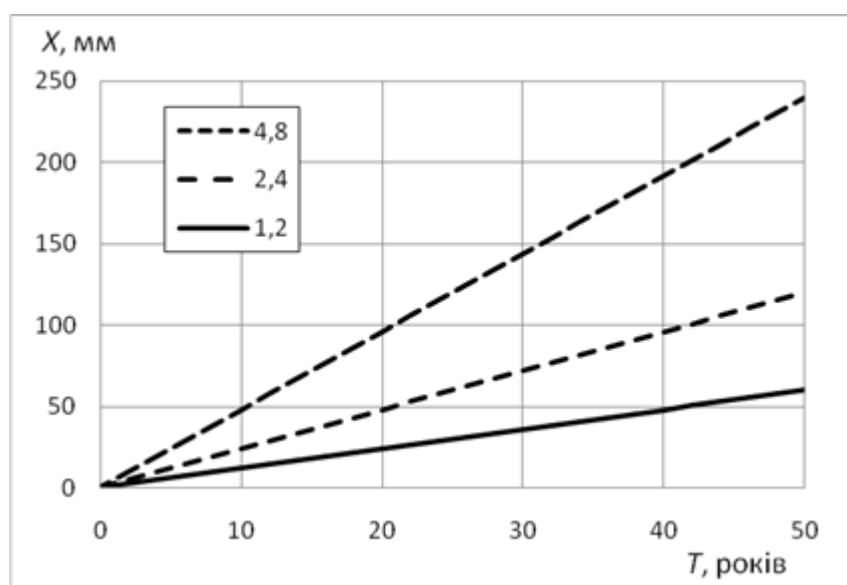


Рис. 6. Кінетика просування фронту корозії – залежність глибини просування X від часу T за швидкості просування 1,2, 2,4 і 4,8 мм/р.

Отже, корозійно небезпечною зоною конструкції димової труби є зона залізобетону, на якій втрачено футерування і теплоізоляцію. Агресивне середовище є газоподібним, найбільш агресивними складовими якого є кислі гази – сірчаний ангідрид SO_2 , оксиди азоту NO і NO_2 , ступінь агресивної дії – середньо агресивний, можливо, ближче до сильно агресивного. Внаслідок агресивної дії кислих газів відбувається корозія бетону, яка просувається фронтом від внутрішньої поверхні димоходу до зовнішньої зі швидкістю від 1,2 до 4,8 мм/р. Кородований

шар бетону втрачає міцність і захисні властивості до арматури. У частині димової труби, у якій у 2006 р. були втрачені футерування та теплоізоляція, за 15 років фронт корозії просунувся не менш ніж на 28 мм, вірогідно, до 74 мм.

Наявність вертикальних тріщин на висоті від 25 до 82 м може свідчити про значні стискальні напруження від сполучення власної ваги конструкції та вітрових навантажень.

Розрахунок несучої здатності стовбура з прогнозуванням граничного стану. Вихідні дані для розрахунку

(прийнято за додатком Е ДБН В.1.2-2:2006 для м. Харків): характеристичне значення вітрового тиску – 430 Па; характеристичне значення тиску вітру за ожеледі – 230 Па; характеристичне значення товщини ожеледі – 14 мм. Температурний режим експлуатації: $T_{вн} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{зовн} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Характер пошкодження: обвалення футерування і теплоізоляції, корозійне і термічне пошкодження бетону, яке розповсюджується концентричним фронтом від внутрішньої поверхні труби (газодимового каналу) до зовнішньої та формалізується виключенням кородованого шару з конструкції, отже, умовним зменшенням товщини стінки.

Розглянуто три розрахункових випадки:

1) стовбур труби не пошкоджений, товщина стінок відповідає проекту, матеріал труби – бетон класу С12/15, що відповідає марці М200;

2) стовбур труби пошкоджений на відмітках +15...+25 м із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки, гранично допустима залишкова товщина стінки розрахована виходячи з умови наближення до

граничного стану за міцністю бетону на стиск;

3) стовбур труби пошкоджений на відмітках +25...+35 м із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки, гранично допустима залишкова товщина стінки розрахована виходячи з умови наближення до граничного стану за міцністю бетону на стиск.

Оцінено несучу здатність і експлуатаційну надійність коефіцієнтами використання перерізів (коефіцієнтами вичерпання несучої здатності) за методом граничних станів. За ДБН В.1.2-14, коефіцієнт надійності за відповідальністю для розрахунку за першою групою граничних станів прийнято $\gamma_n = 1$, для розрахунку за другою групою граничних станів $\gamma_n = 0,95$. Розрахунки виконано за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР 2018 Pro (Ліцензія № 1/6638).

Розрахункова схема складена з універсальних скінченних елементів оболонки (для стовбура на рис. 7). Розрахункові комбінації навантажень наведено в табл. 5. Результати розрахунків наведено на рис. 7 і в табл. 6.

Таблиця 5

Розрахункові комбінації навантажень

Номер	Власна вага труби з футеруванням	Вітрове навантаження на трубу	Нерівномірний нагрів ($T_{вн} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{зовн} = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$)	Вітрове навантаження на трубу, вкриту ожеледдю	Вага ожеледі на стовбурі труби
1	+	+	–	–	–
2	+	+	+	–	–
3	+	–	–	+	+
4	+	–	+	+	+

Примітка: «+» – навантаження входить до сполучення, «–» – не входить до сполучення.

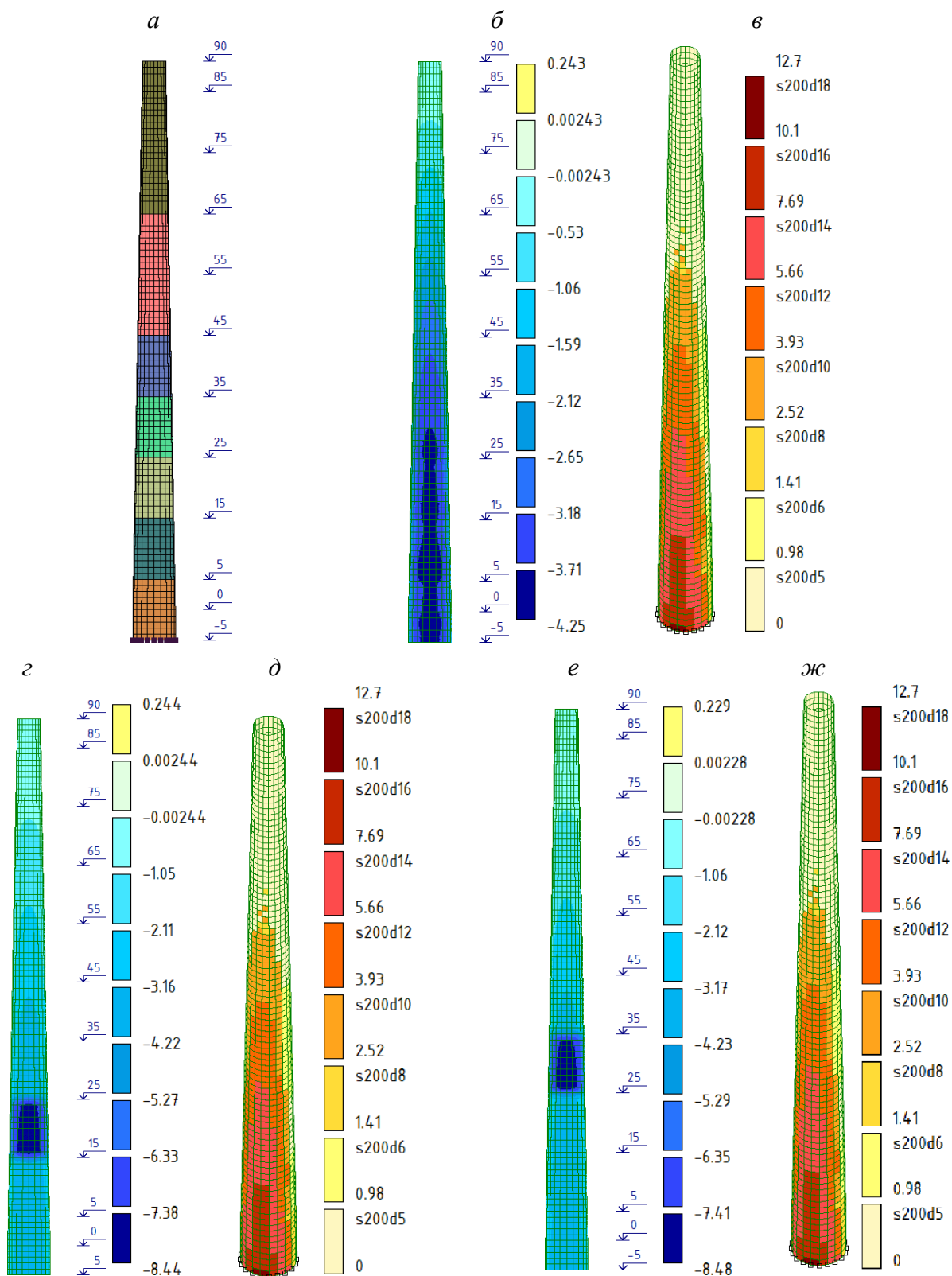


Рис. 7. Розрахункова схема (а), поля напружень, МПа (б, г, е), поля розрахункового армування (в, д, ж) для розрахункових випадків:
 б, в – 1, стовбур труби не пошкоджений, товщина стінок відповідає проекту;
 г, д – 2, стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +15...+25 м; е, ж – 3, те саме на відмітках +25...+35 м

Таблиця 6

Результати розрахунків несучої здатності стовбура труби

Розрахунковий випадок	Секція	Відмітка, м	Товщина стінки, мм	Напруження, МПа	Коефіцієнт використання
1 – стовбур труби не пошкоджений, товщини стінок відповідають проекту	1	-5...+5	300	-4,11	0,48
	2	+5...+15	260	-4,25	0,50
	3	+15...+25	240	-4,03	0,47
	4	+25...+35	220	-3,99	0,47
	5	+35...+45	200	-3,66	0,43
	6	+45...+55	190	-3,08	0,36
	7	+55...+65	190	-2,37	0,28
	8	+65...+75	180	-1,62	0,19
	9	+75...+85	180	-0,91	0,11
	10	+85...+90	250	-0,27	0,03
2 – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +15...+25 м	1	-5...+5	300	-4,18	0,49
	2	+5...+15	260	-6,21	0,73
	3	+15...+25	112	-8,44	0,99
	4	+25...+35	220	-5,99	0,70
	5	+35...+45	200	-3,65	0,43
	6	+45...+55	190	-3,08	0,36
	7	+55...+65	190	-2,37	0,28
	8	+65...+75	180	-1,62	0,19
	9	+75...+85	180	-0,91	0,11
	10	+85...+90	250	-0,27	0,03
3 – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +25...+35 м	1	-5...+5	300	-4,21	0,50
	2	+5...+15	260	-4,27	0,50
	3	+15...+25	112	-6,10	0,72
	4	+25...+35	96	-8,48	0,99
	5	+35...+45	200	-5,76	0,68
	6	+45...+55	190	-3,07	0,36
	7	+55...+65	190	-2,37	0,28
	8	+65...+75	180	-1,62	0,19
	9	+75...+85	180	-0,91	0,11
	10	+85...+90	250	-0,27	0,03

У результаті аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної конструкції труби (рис. 7, табл. 6) для першого розрахункового випадку – стовбур труби не пошкоджений, товщини стінок відповідають проекту – встановлено:

- несуча здатність при перевірці міцності бетону на стиск забезпечена з коефіцієнтом використання 0,50 за першою групою граничних станів (міцність) і 0,44 –

за другою групою (жорсткість), максимальна деформація становить 118 мм;
- несуча здатність димової труби при перевірці заданого армування ($\varnothing 20A-II$, 200×200 мм) забезпечена з коефіцієнтом використання 0,81 (12,7/15,71).

Для другого розрахункового випадку – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням

товщини стінки на відмітках +15...+25 м – встановлено:

- за умови зменшення товщини стінки на 128 мм (від 240 до 112 мм) несуча здатність димової труби при перевірці міцності бетону на стиск забезпечена з коефіцієнтом використання 0,99 за першою групою граничних станів (міцність) і 0,54 – за другою групою (жорсткість), максимальна деформація становить 148 мм;

- несуча здатність димової труби при перевірці заданого армування ($\varnothing 20A-II$, 200×200 мм) забезпечена з коефіцієнтом використання 0,81.

Для третього розрахункового випадку – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування і зменшенням товщини стінки на відмітках +25...+35 м – встановлено:

- за умови зменшення товщини стінки на 124 мм (від 220 до 96 мм) несуча здатність димової труби при перевірці міцності бетону на стиск забезпечена з коефіцієнтом використання 0,99 за першою групою граничних станів (міцність) і 0,52 – за другою групою (жорсткість), максимальна деформація становить 140 мм;

- несуча здатність димової труби при перевірці заданого армування ($\varnothing 20A-II$, 200×200 мм) забезпечена з коефіцієнтом використання 0,81.

Отже, у результаті аналізу напружено-деформованого стану встановлено, що найбільш небезпечною є зона конструкції труби на висоті близько 25 м. Максимально допустима глибина просування фронту корозійного і термічного пошкодження бетону в несучій конструкції, після якої ймовірність досягнення граничного стану стане високою, складає 124 мм, що відповідає товщині непошкодженого шару бетону на висоті 15–25 м – 112 мм, а на висоті 25–35 м – 96 мм.

Розрахунок залишкового ресурсу димової труби здійснено для третього розрахункового випадку – стовбур труби пошкоджений із повним руйнуванням футерування на відмітках +25...+35 м.

Ураховуючи те, що арматура розташована ближче до зовнішньої поверхні конструкції, ступінь дії середовища можна прийняти як для бетону середньо агресивним зі швидкістю корозії до 2,4 мм/р. У цьому випадку зменшення товщини стінки на 124 мм (від 220 до 96 мм) відбудеться за $124:2,4 = 51$ рік. Разом із тим для найбільш несприятливого випадку сильно агресивного ступеня дії середовища на залізобетон зі швидкістю корозії 4,8 мм/р. зменшення товщини стінки відбудеться за $124:4,8 = 26$ років.

Перше обвалення футерування відбулося у 2006 р. саме на відмітках 25–35 м, отже, на момент обстеження тривалість впливу агресивного середовища на бетон досягла 15 років. З урахуванням цього залишковий ресурс конструкції труби без ремонту футерування складатиме $51-15 = 36$ років, можливо, і $26 - 15 = 11$ років. Виходячи з цього, рекомендовано в найкоротший термін здійснити капітальний ремонт труби з усуненням пошкоджень і відновленням футерування або не пізніше ніж через 10 років зруйнувати споруду зі зведенням нової.

Висновки і рекомендації. Уточнено методику визначення залишкового ресурсу залізобетонної димової труби коксохімічного виробництва.

Проаналізовано результати натурного обстеження труби висотою 90 м, встановлено, що за понад 70 років експлуатації вона зазнала пошкоджень, з яких тим, що визначатиме залишковий ресурс, є обвалення футерування. Залишковий ресурс визначатимуть кінетикою корозії бетону в таких зонах.

Агресивне середовище є газоподібним, найбільш агресивними складовими якого є кислі гази, ступінь агресивної дії – середньо агресивний, можливо, сильно агресивний. Корозія бетону відбувається в місцях обваленого футерування і просувається концентричним фронтом від внутрішньої поверхні димоходу до зовнішньої зі швидкістю від

1,2 до 4,8 мм/р. Кородований шар бетону втрачає міцність і захисні властивості до арматури.

Виконано аналіз напружено-деформованого стану конструкції труби. Встановлено, що з урахуванням наявних обвалень футерування найбільш небезпечною є зона конструкції на відмітці близько 25 м. Максимально допустима глибина просування фронту корозії, після

якої ймовірність досягнення граничного стану стане високою, складає 124 мм.

Спрогнозовано залишковий ресурс, який складатиме 36 років, можливо, і 11 років. Рекомендовано в найкоротший термін здійснити капітальний ремонт труби з усуненням пошкоджень і відновленням футерування або не пізніше ніж через 10 років зруйнувати споруду зі зведенням нової.

Список використаних джерел

1. Ельшин А. М. Дымовые трубы. Москва: Стройиздат, 2001. 296 с.
2. Технічний висновок про стан будівельних конструкцій димової труби коксового цеху (H = 90 м), розташованої по вул. Карачівське шосе, 44, м. Харків: договір № 2201 від 19.07.2021 р. ТОВ «Харківбудніпроект». Харків, 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. Reddy T. V. G., Ojha P. N., Brijesh Singh, Rizwan Anwar, Vikas Patel. Condition Assessment and Repair Strategy for RCC Chimney of Thermal Power Station Located in Semi-Arid Region in India. In book: *Advances in Sustainable Materials and Resilient Infrastructure*. (2022). DOI: 10.1007/978-981-16-9744-9_19.
5. Marek Maj, Andrzej Ubysz, Hala Hammadeh, Farzat Askifi. Non-Destructive Testing of Technical Conditions of RC Industrial Tall Chimneys Subjected to High Temperature. *Materials* 12 (12). (2019). DOI: 10.3390/ma12122027.
6. Marek Maj, Andrzej Ubysz. The effects of thermal overload in chimney caused by insulation damage. *Journal of Physics Conference Series*, 1706 (1). (2020). 012198. DOI: 10.1088/1742-6596/1706/1/012198.
7. Xiaowu Huang, Xianqi Xie, Jinshan Sun, Dongwang Zhong, Ying kang Yao, Shengwu Tu. Monitoring and Analysis of the Collapse Process in Blasting Demolition of Tall Reinforced Concrete Chimneys. *Sensors* 23(13). (2023). 6240. DOI: 10.3390/s23136240.
8. Захист будівельних конструкцій та споруд від агресивних впливів / А. А. Пługін, І. Е. Казімагомедов, О. О. Скорик та ін. Харків: УкрДУЗТ; ХНУБА, 2017. 188 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.

Люб'як 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 (066)783-98-55. E-mail: alexnazar75.an@gmail.com.

Наджафов Ельшад Фаїд огли, аспірант, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>. E-mail: nadjafov@kart.edu.ua.

Березовська Альона Олександрівна, аспірантка, Національний університет «Запорізька політехніка». ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-5503-5283> Тел.: +38 (098)728-57-97. E-mail: berezovskaja.alna@ukr.net.

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; +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.

Najafov El'shad Faih Ohly, postgraduate student, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6143-8183>. E-mail: nadjafov@kart.edu.ua.

Berezovska Alona, postgraduate student, National University «Zaporizhzhya Politechnic».

ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0004-5503-5283> Тел.: +38 (098)728-57-97. E-mail: berezovskaja.alna@ukr.net.

Статтю прийнято 16.05.2024 р.