

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»



ЯРОВИЙ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 628.014:624.046.2

**НАДІЙНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ
ТРУБ ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Фурсов Вадим Вікторович.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Бліхарський Зіновій Ярославович**, директор інституту будівництва та інженерії доквілля національного університету «Львівська політехніка», м. Львів;

доктор технічних наук, професор **Семко Олександр Володимирович**, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету ім. Юрія Кондратюка, м. Полтава;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник **Барабаш Марія Сергіївна**, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва Національного авіаційного університету, м. Київ.

Захист відбудеться «14» березня 2019 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а та на сайті: <http://pgasa.dp.ua/>.

Автореферат розіслано «12» лютого 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 08.085.02, д.т.н., професор



С.О. Слободянюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сутність науково-практичної проблеми, яка розглядається в роботі, полягає у створенні та впровадженні в практику теоретичних, методичних і експериментальних основ забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж протягом тривалого терміну експлуатації, що ґрунтується на результатах дослідження дії динамічних, температурних, корозійних та експлуатаційних впливів.

Практичне значення теоретичних і експериментальних розробок полягає у підвищенні надійності роботи металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, в забезпеченні безпечної експлуатації і збереженні висотних споруд, оцінці довговічності та залишкового ресурсу при різних термінах експлуатації на основі виявлених дефектів і пошкоджень та даних про технічний стан.

Актуальність теми. Однією з основних проблем експлуатації промислових підприємств металургійної, енергетичної, хімічної та нафтохімічної промисловості є знос основних фондів, і як наслідок, виникнення проблеми забезпечення надійності будівель та споруд після тривалого терміну експлуатації.

Димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі є кінцевою ланкою технологічних процесів промислових підприємств і вихід їх з ладу призводить до зупинки всього виробництва. Велика кількість димових та вентиляційних труб, несучих веж промислових підприємств працюють протягом 50-70 років при розрахунковому терміні 50 років. Під час експлуатації вони піддаються значним вітровим, температурним, корозійним, сейсмічним та іншим впливам, що призводить до виникнення суттєвих пошкоджень конструкцій.

При значних термінах роботи і складних умовах експлуатації проблеми безпеки та збереження висотних споруд, забезпечення довговічності та розрахунок залишкового ресурсу, подовження термінів експлуатації потребують подальшого дослідження. Оцінка технічного стану конструкцій металевих труб та їх несучих веж на основі даних натурних обстежень, визначення причин виникнення різних пошкоджень, прогнозування їх розвитку, рекомендації по їх усуненню дають змогу забезпечити надійність та безпечну експлуатацію конструкцій.

Таким чином, дослідження по забезпеченню надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, дослідження сукупної дії динамічних, температурних, корозійних та експлуатаційних впливів, оцінка довговічності та визначення залишкового ресурсу, розробка методів і варіантів усунення пошкоджень є актуальним напрямком.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження проведені в рамках виконання науко-дослідної роботи кафедри металевих та дерев'яних конструкцій ХНУБА за темою «Надійність та довговічність металевих висотних споруд спеціального призначення» (№ ДР 0118U001361 2016-2018 рр.), а також великої кількості господарських тем в рамках дослідження і науково-технічного супроводу, обстеження металевих і вентиляційних труб та їх несучих веж на багатьох підприємствах металургійної, хімічної, нафто-хімічної, енергетичної галузей України, у тому числі: «Технічне діагностування вихлопних труб ГПА ГТК-10-4Б з метою визначення їх технічного стану. КС Задніпровська, КС

Кіровоградська, КС Південнобузька» (г/д №841/11/1109071005, 2011 р.), «Звіт про технічний стан і експлуатаційну придатність радіовежі, розташованій на даху 6-го під'їзду будівлі Держпром у м. Харкові» (г/д № 01-38/09, 2014 р.), «Звіт про технічний стан металеві димові труби та несучої вежі висотою Н=120 м Харківської «Теплоелектроцентралі №3 з розробкою рекомендацій по ремонту та подальшої безпечної експлуатації» (г/д № 37/08, 2008 р.).

Рівень участі автора – виконавець, відповідальний виконавець, керівник.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення науково-технічної проблеми підвищення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж протягом тривалого терміну експлуатації, розробка методів забезпечення безвідмовної роботи та ремонтпридатності, оцінка довговічності та залишкового ресурсу на основі даних про дефекти і пошкодження.

Для досягнення мети були сформульовані й вирішені такі основні **завдання**:

- аналіз наукових робіт з надійності, конструктивних особливостей, матеріалів та умов експлуатації металевих і вентиляційних труб та їх несучих веж за весь життєвий цикл;

- дослідження навантажень та впливів на металеві димові труби і несучі вежі, визначення основних параметрів силових, динамічних, корозійних, температурних та експлуатаційно-механічних впливів, аналіз їх взаємозв'язку за життєвий цикл;

- дослідження напружено-деформованого стану елементів металевих димових труб та несучих веж під впливом стискаючих та стиснуто-згинаючих зусиль, проведення розрахунків на пружність і стійкість елементів труб та веж з використанням сучасних програмних комплексів (SCAD, ЛІРА САПР, Selen-Result);

- аналіз основних закономірностей багатоциклової та малоциклової пошкоджуваності металу під дією динамічних вітрових впливів з урахуванням втомної міцності;

- аналіз утворення та розвитку пошкоджень від корозійних та температурних впливів у елементах висотних споруд, аналіз розвитку тріщиноподібних пошкоджень у зварних швах, розвитку деформаційного старіння після механічних впливів;

- розробка класифікації основних типів дефектів та пошкоджень металевих димових труб та несучих веж, статистичний аналіз виявлених дефектів та пошкоджень, визначення гранично допустимих значень пошкоджень залежно від технічного стану та ступеня небезпеки пошкоджень;

- розробка метода оцінки надійності і управління старінням на основі фізико-статистичного підходу для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж;

- розробка методів визначення довговічності металевих димових труб з урахуванням поєднання різноманітних впливів;

- розробка метода розрахунку залишкового ресурсу з урахуванням пошкоджень, коефіцієнтів запасу надійності та часу експлуатації;

- дослідження спільної дії силових та зварювальних напружень при різноманітних варіантах підсилення димових труб, впровадження конструктивних і технологічних рішень з усунення цих пошкоджень;

- впровадження результатів роботи в навчальний процес на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва і архітектури.

Об'єкт дослідження – надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж протягом тривалого терміну експлуатації.

Предмет дослідження – закономірності силових, динамічних, корозійних, температурних, експлуатаційних впливів на довговічність, безвідмовну роботу, ремонтпридатність та збереженість металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.

Методи дослідження. В роботі застосовані сучасні методи і методики візуальних та інструментальних досліджень при натурних обстеженнях висотних споруд; аналітичні методи дослідження напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій з використанням теорії пружності і пластичності; чисельний метод скінченних елементів для моделювання НДС з урахуванням фактичних пошкоджень і спільної роботи металевих димових труб і веж; статистичні методи обробки виявлених дефектів та пошкоджень; порівняльний аналіз результатів аналітичних розрахунків і математичного моделювання; порівняльний аналіз результатів натурних обстежень та випробувань із аналогічними даними відомих досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалено методи визначення основних параметрів та взаємозв'язку силових, динамічних, корозійних, температурних та експлуатаційно-механічних впливів на металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі за тривалий час експлуатації;

- отримав подальшого розвитку метод оцінки напружено-деформованого стану на основі рішення просторової задачі механіки твердого тіла під впливом стискуючих та згинаючих зусиль, проведено порівняльний аналіз результатів розрахунків на пружність і стійкість елементів труб та веж, виконаний аналітичними методами та з використанням сучасних програмних комплексів (SCAD, ЛІРА САПР, Seleno-Result);

- визначені основні закономірності багатоциклової та малоциклової пошкоджуваності металу конструкцій висотних споруд під дією динамічних навантажень з урахуванням втомної міцності;

- досліджено процеси утворення та розвитку пошкоджень від корозійних та температурних впливів, процеси розвитку тріщиноподібних пошкоджень у зварних швах;

- вперше проведено статистичну оцінку величин і типів дефектів та характеру пошкоджень на основі фактичних експериментальних даних обстежень металевих димових труб та їх несучих веж, встановлено гранично допустимі значення дефектів та пошкоджень в залежності від технічного стану та ступеню небезпеки пошкоджень;

- на основі фізико-статистичного підходу розроблено методи оцінки надійності та управління старінням елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж;

- вперше отримані аналітичні залежності довговічності металевих димових труб з урахуванням сукупної дії силових, динамічних, корозійних і температурних впливів;

- вперше розроблено метод оцінки залишкового ресурсу з урахуванням пошкоджень та терміну експлуатації металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж;

- вперше запропоновано для металевих димових труб та їх несучих веж класи надійності, в залежності від технічного стану, категорії небезпеки виявлених дефектів, довговічності та необхідності виконання ремонтних робіт;

- вдосконалено метод урахування силових напружень та зварювальних напружень при підсиленні металевих конструкцій, розроблено конструктивні і технологічні рішення усунення пошкоджень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у їх використанні:

- при розробці національних нормативних документів (ДБН, ДСТУ, тощо) з проектування залізобетонних конструкцій фундаментів під димові труби та їх несучі вежі, а також стандартів і методик з обстеження технічного стану промислових димових і вентиляційних труб, методів визначення їх несучої здатності;

- при визначенні довговічності та залишкового ресурсу металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж з урахуванням фактичних дефектів та пошкоджень; при визначенні технічного стану конструкцій;

- при виконанні науково-технічного супроводу при проектуванні, будівництві та експлуатації та визначенні надійності роботи конструкцій;

- в навчальному процесі вищих навчальних закладів при підготовці бакалаврів, магістрів та докторів філософії за напрямом «Будівництво та цивільна інженерія».

Результати роботи практично реалізовані більш ніж на 100 об'єктах будівництва із рекомендаціями по збереженню споруд, забезпеченню довговічності та безпечної експлуатації. Впровадження конструктивних рішень щодо усунення пошкоджень на основі нових методів забезпечення надійності підтвердило їх ефективність у порівнянні з традиційними рішеннями. При цьому отримано загальний економічний ефект у розмірі понад 2,5 млн. грн. Методи оцінки надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, розрахунково-теоретичні основи проектування впроваджені в навчальний процес при підготовці спеціалістів та магістрів за напрямом «Будівництво та цивільна інженерія» спеціальності «Промислове та цивільне будівництво».

Результати дисертаційної роботи використані при розробці стандарту асоціації СА-03-006-08 «Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений» (2008 р.), стандарту саморегулюючої організації СТО СРО ЭТМП-03-2016 «Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб», а також при розробці нормативного документу: ДБН В.2.6-98-2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основи проектування».

Достовірність результатів роботи. Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій, викладених у дисертації,

забезпечуються: використанням в натурних обстеженнях і експериментальних дослідженнях сучасних методів і методик, сертифікованих приладів та устаткування; достатньою статистичною кількістю досліджуваних елементів і високою збіжністю результатів обстежень та замірів, відповідністю результатів теоретичних, аналітичних і експериментальних досліджень, позитивними результатами експлуатаційних випробувань, чітким логічним трактуванням отриманих результатів, які не суперечать загальноприйнятим науковим положенням, впровадженням результатів роботи у виробництво.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи одержано дисертантом самостійно, При проведенні досліджень, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належить:

- постановка завдань досліджень, розробка способів і методів досліджень [1, 2, 17, 29, 36, 37, 40, 42];
- проведення натурних обстежень металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж [6, 7, 23, 35, 45];
- визначення пружно-деформаційного стану металевих конструкцій при різноманітних навантаженнях та впливах [3, 5, 18, 19, 30, 31, 43];
- аналіз отриманих результатів обстежень, класифікація виявлених дефектів та пошкоджень, оцінка категорії небезпеки пошкоджень та їх граничних величин для кожного технічного стану [4, 14, 16, 26, 41, 44];
- аналіз розвитку пошкоджень від силових динамічних, температурних та корозійних впливів на металеві конструкції [21, 22, 27, 33, 34, 39];
- розробка методів оцінки надійності, довговічності та залишкового ресурсу металевих димових труб та їх несучих веж після тривалого терміну експлуатації [8, 12, 15, 25];
- розробка конструктивних рішень підсилень, наукове обґрунтування урахування залишкових зварних напружень при підсиленні металевих димових труб [9, 10, 11, 24, 32].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на: науково-технічна конференція «Розрахунок і випробування зварних конструкцій» (Київ: ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 13-16 вересня 1990 р.); VIII науково-технічна конференція «Дослідження металевих конструкцій» (Макіївка: ДонНАБА, 23-24 вересня 2005 р.); на міжнародних науково-практичних конференціях «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового та транспортного призначення» (IV - Ялта: ПДАБА, 10-14 вересня 2006 р.; V - Ялта: ПДАБА, 12-16 вересня 2007 р.; X - Ялта: ПДАБА, 14-19 вересня 2012 р.; XI - Ялта: ПДАБА, 13-18 вересня 2013 р.); XI міжнародний науковий симпозіум «Architecture and Construction» (Флоренція, Італія: UNIFI, 7-12 березня 2011 р.); X міжнародний форум з промислової безпеки (Санкт-Петербург, Росія: 28-30 травня 2012 р.); семінар Європейського науково-освітнього проекту TEMPUS-JPCR «SEHUD» «Architectural and sustainable development based on eco-humanistic principles and advanced technologies without losing identity» (Мілан, Італія: Polytechnic University of Milan, 18-22 грудня 2012 р.); VI міжнародна наукова конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (Харків: ХНУБА, 17-18 жовтня 2013 р.); міжнародна науково-технічна конференція

«Розрахунок і проектування металевих конструкцій» (Москва, Росія: МДБУ, 15-16 листопада 2013 р.); міжнародна науково-практична конференція «Ефективні технологічні рішення в будівництві з використанням бетонів нового покоління» (Харків: ХНУБА, 11-12 квітня 2015 р.); VI міжнародна науково-практична конференція «Обстеження будівель та споруд: проблеми і шляхи їх рішення» (Санкт-Петербург, Росія: СПбДПУ, 16-17 вересня 2015 р.); VII міжнародна науково-практична конференція «Обстеження будівель та споруд: проблеми і шляхи їх рішення» (Санкт-Петербург, Росія: СПбДПУ, 14-15 жовтня 2016 р.); VI міжнародна науково-практична конференція «Створення високотехнологічних соціокомплексів в Україні на основі концепції збалансованого (стійкого) розвитку» (Львів: ПДАБА, 22-26 травня 2017 р.); VIII міжнародна науково-практична конференція «Обстеження будівель та споруд: проблеми і шляхи їх рішення» (Санкт-Петербург, Росія: СПбДПУ, 12-13 жовтня 2017 р.); VIII міжнародна наукова конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (м. Харків: ХНУБА, 18-19 вересня 2017 р.).

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображені в 48 наукових публікаціях, з них 27 – в наукових фахових виданнях України (3 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричної бази *Google Scholar, Crossref*), 13 – в зарубіжних наукових виданнях (3 – у виданні включеному до наукометричної бази *РИНЦ*), 8 праць апробаційного характеру.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Повний обсяг роботи складає 356 сторінки, в тому числі, 264 сторінок основного тексту, 107 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел з 212 найменувань та 3 додатків на 92 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано сутність науково-прикладної проблеми, актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; сформульовано мету й завдання досліджень; визначено об'єкт, предмет і методи досліджень; визначено наукову новизну отриманих результатів і їх практичне значення; наведено дані про публікації й апробацію результатів роботи, особистий внесок автора; визначено структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ присвячений сучасному стану об'єкта дослідження та його розвитку; визначені загальні характеристики конструктивних і технологічних рішень металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж; обґрунтовано вимоги при виборі матеріалів для конструкцій; проведено аналіз дій та величин постійних, змінних тривалих і короткочасних навантажень, епізодичних впливів, динамічних, корозійних, температурних і експлуатаційно-механічних впливів протягом тривалого терміну експлуатації; виконано аналіз взаємодії між силовими і температурними впливами, а також напруженнями; виконано аналіз результатів досліджень роботи та забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих ґратчастих веж, проведених вітчизняними і зарубіжними вченими.

В останній час проблеми надійності 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 відпрацювала свій проектних ресурс; під час експлуатації змінився режим їх роботи, підвищились навантаження та утворилось багато дефектів та пошкоджень. Все це потребує своєчасної діагностики і визначення технічного стану конструкцій, проведення ремонтних робіт та рекомендацій щодо подальшої експлуатації.

Металеві димові труби і їх несучі вежі відрізняються одна від одної певною конструктивною індивідуальністю й умовами експлуатації.

Статистична інформація про технічний стан та впливи на споруди вкрай обмежена.

Забезпечення надійності є одним із пріоритетних завдань під час всього життєвого циклу металевих димових і вентиляційних труб та несучих веж. Застосування нових теоретичних і практичних методів і методик для забезпечення безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збереження є актуальним.

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

Металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі експлуатуються тривалий час в складних умовах і забезпечення надійності, як правило, проводиться на основі даних при технічному обстеженні, визначення причин виникнення пошкоджень і прогнозування їх розвитку, оцінці довговічності і залишкового ресурсу, виконанні ремонтних робіт і забезпеченні безпечної експлуатації.

Металеві димові і вентиляційні труби, їхні несучі вежі за весь термін експлуатації зазнають значних вітрових, температурних, корозійних, сейсмічних та інших впливів.

Для забезпечення стійкості та надійності високих димових та вентиляційних труб (як правило при висоті більше 40 м) навколо них будують металеві вежі, які сприймають більшість навантажень, що діють на труби (рис. 1).

Велике значення для забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж має матеріал з якого виготовляються конструкції.

Аналіз матеріалів обстежень свідчить, що для елементів металевих димових і вентиляційних труб та несучих веж, що працюють у сухих агресивних середовищах за температури газів до 300⁰ С, використовуються маловуглецеві сталі спокійного і напівспокійного способів виплавки – ВСт3сп5 і ВСт3пс6.

За умов забезпечення високої стійкості проти корозії і за високих температур газів, що відводяться (понад 300⁰ С), використовуються високолеговані сталі, такі як 08Х13, 08Х22Н6Т, 10Х17Н13М2Т, 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т.



Рисунок 1 – Металева витяжна труба і несуча вежа цеху «Аміак 4»

Димові та вентиляційні труби є кінцевою ланкою важливих технологічних процесів промислових підприємств, і вихід їх із експлуатації, як правило, призводить до зупинки всього технологічного процесу, виробництва та великих фінансових збитків.

Димові (газодимові) труби відводять дим і газоповітряні суміші, де обов'язково є зависі сажі, золи і пилу, які забруднені продуктами окиснення речовин, що містяться у сировині.

Температура таких відвідних димових і газоповітряних сумішей – 100°C - 500°C , вологість – 60%. Витяжні (випускні, вентиляційні) труби відводять газові суміші, що пройшли очистку, але зберегли певну ступінь агресивності, мають вологість понад 80 - 90%, містять конденсат і, як правило, не мають високої температури.

У розділі наведено класифікацію навантажень і впливів (рис. 2), виконано аналіз роботи елементів димових труб і несучих веж при вітрових, ожеледно-вітрових і снігових навантаженнях, визначені основні параметри силових, корозійних, температурних і експлуатаційно-механічних впливів.

Грунтуючись на результатах численних натурних обстежень можна зробити висновок, що постійні навантаження можуть зрости на 10%, змінні довготривалі навантаження – на 10-20%.

Відповідно до чинних норм змінні короткочасні навантаження зросли в порівнянні з визначеними за попередніми нормами: вітрові на 30-40%, снігові – на 100% і більше.

Ожеледно-вітрові навантаження при експлуатації металевих димових труб без відтягів і таких, що мають підвищену температуру порівняно з температурою зовнішнього повітря, практично не враховуються. При виникненні ожеледного обледеніння на металевих вентиляційних трубах (і димових, що не працюють) вага ожеледі не буде перевищувати 1% власної ваги труби.

Снігове навантаження на вертикальні металеві димові труби практично відсутнє. Майданчики витяжних веж є частково захищеними від прямої дії вітру газовідвідним стовбуром, що може викликати накопичення снігу на них, тому при розрахунку майданчиків снігове навантаження враховуються на всю покриту настилом поверхню майданчика.

Враховуючи зміни навантажень за тривалий термін експлуатації величини напружень в елементах металевих димових труб і несучих веж можуть зрости на 10-15%.

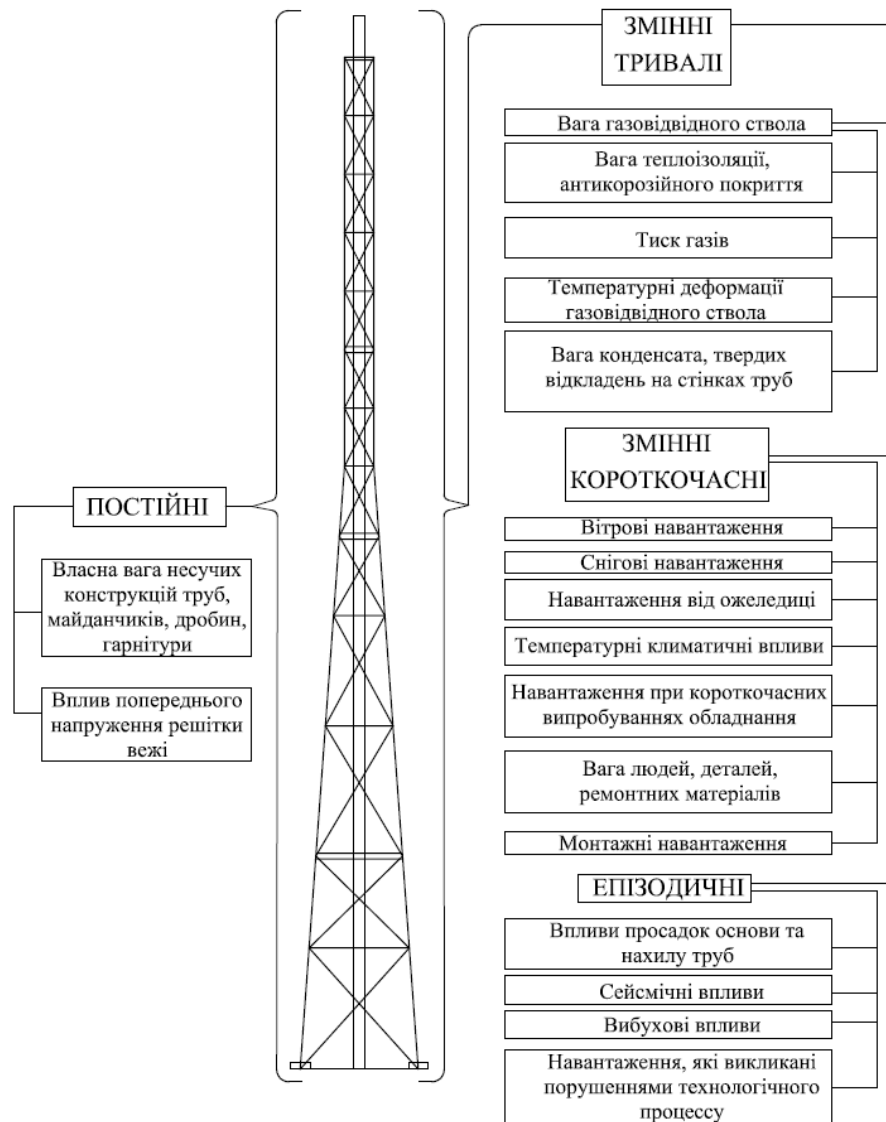


Рисунок 2 – Схема навантажень і впливів на металеві димові труби і несучі вежі.

Протягом усього терміну експлуатації металеві димові труби і несучі вежі знаходяться під спільною дією різних впливів – силових (експлуатаційних силових факторів), динамічних (пульсуючий тиск вітрового потоку і зусилля, викликані власними коливаннями конструкцій), корозійних (атмосферні впливи і впливи димових і вентиляційних газів), температурних (впливи від газів продуктів згоряння або хімічних процесів, сонячної радіації, добових коливань температури, кліматичних змін) та експлуатаційно - механічних впливів (пошкодження конструкцій пов'язані з людським фактором).

У життєвому циклі металевих димових труб і устаткування можна виділити такі етапи: монтаж, випробування, пуск в експлуатацію, стаціонарний режим, регулювання параметрів, аварійні ситуації, спрацювання захисту і зупинка (рис. 3).

На кожному з цих етапів існує взаємозв'язок між силовими навантаженнями p , температурними t впливами і напруженнями σ , що виникають при цьому.

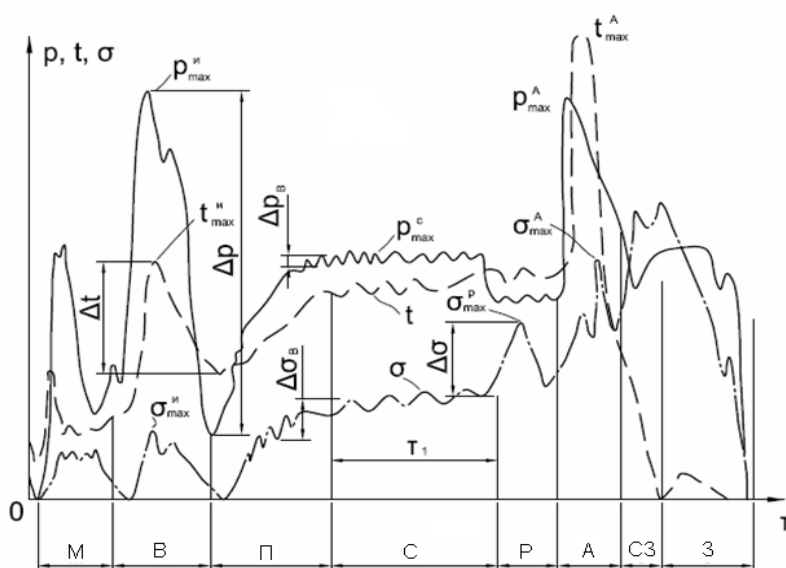


Рисунок 3 – Етапи експлуатаційного навантаження

Силові впливи на етапах випробувань та в аварійних випадках в 1,5 рази перевищують величини впливів при стаціонарній роботі, напруження σ при аварійних ситуаціях та при спрацюванні захисту в два і більше разів можуть перевищувати напруження при нормальному режиму роботи, а температури в аварійних ситуаціях перевищують температури стаціонарного режиму в 1,5 рази і більше.

Засновниками розрахунку стійкості та вітрових навантажень на конструкції металевих труб були Ейлер, Бернуллі, Стокс, Рейнольдс, Прандтль, Карман.

У подальшому великий внесок у визначення різних навантажень на висотні споруди зроблено Е. Сіміом, Р. Х. Сканланом, П. Роучем, М. Ф. Барштейном, В. А. Локшиним, Л. С. Тохтаровим, А. І. Цейтліним, І. М. Рабіновичем, Г. А. Савицьким.

Великий внесок в дослідження динамічних, температурних та корозійних впливів на будівельні конструкції виконали відомі вчені такі як М. А. Махутов, М. П. Мельников, В. С. Гиренко, В. М. Горицький, С. С. Менсон, В. І. Янкелевич, В. І. Бабушкін, З. Я. Бліхарський, Є. А. Гузєєв, Р. С. Зайнулін, Ф. М. Іванов, Й. Й. Лучко, О. П. Мчедлов-Петросян, В. П. Осоловский, В. В. Панасюк, В. І. Похмурський, П. В. Ясній, J. P. Gallagher та ін.

Проектуванню та розвитку методів розрахунку металевих димових труб і їх несучих веж присвячено дослідження відомих вчених: М. С. Стрелецького, Є. І. Белені, К. К. Муханова, Я. М. Ліхтарнікова, Г. С. Веденікова, О. М. Генієва, В. А. Балдіна, М. М. Філоненко-Бородича, А. М. Єльшина.

Визначенню навантажень на споруди та розрахунку надійності присвячено праці вітчизняних учених О. В. Шимановського, В. Н. Гордєєва, А. В. Перельмутера, С. Ф. Пічугіна, В. А. Пашинського, А. І. Лантух-Лященко, С. І. Білика, О. В. Семко, Є. А. Єгорова, В. В. Кулябко, В. С. Шмуклера, О. І. Голоднова, А. В. Сільвестрова, В. В. Фурсова і ін.

Розвитку сучасних методів розрахунку і забезпеченню надійності будівельних конструкцій, будівель і споруд присвятили свої праці відомі вітчизняні вчені такі як О. С. Городецький, В. С. Дорофєєв, М. С. Барабаш, О. П. Воскобойнік, Є. В. Клименко, М. В. Савицький, Т. Д. Нікіфорова, В. О. Семко.

Теоретичні дослідження у **другому розділі** спрямовані на подальший розвиток метода оцінки напружено-деформаційного стану стиснутих (елементи веж) та стиснуто-зігнутих (димові труби) конструкцій на основі рішення просторової задачі механіки твердого тіла. У розділі наводяться результати

розрахунку металевих димових труб сучасними програмними комплексами (SCAD, ЛІРА САПР, Selena-Result) з урахуванням дефектів та пошкоджень, просторової і спільної роботи конструкцій, проведено порівняльний аналіз результатів цих розрахунків з аналітичними нормативними методами, що проводились раніше.

У сучасних розрахунках металевих тонкостінних оболонок (труб) прийнято вважати безмоментним основний напружений стан на ділянках, віддалених від їх країв. Металеві димові труби й елементи несучих веж із труб є тонкостінними оболонками обертання ($t_w/r \leq 1/30$).

Розрахунок на міцність труби, яка перебуває в безмоментному напруженому стані, виконується за формулою

$$\frac{1}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau_s^2} \leq 1. \quad (1)$$

Напруження в циліндричних оболонках (трубах), що перебувають під внутрішнім рівномірним тиском газу, розраховують за формулами

$$\sigma_1 = \frac{pr}{2t}, \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{t}. \quad (3)$$

Розрахунок на стійкість металеві димові труби, яка одночасно стиснута вздовж осі і перебуває під дією рівномірного тиску, нормального до осі труби (труба під дією постійного і вітрового навантаження), здійснюється за формулою

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1} \gamma_c} \leq 1, \quad (4)$$

де σ_{cr} – критичне напруження при $r/t \leq 300$ найменше із значень ψR_y чи cEt/r .

У трубах, що розраховуються як стиснуті або позацентрово стиснуті за умовної гнучкості $\bar{\lambda} = \sqrt{R_y / E}$ повинна виконуватися умова

$$\frac{r}{t} \leq \pi \sqrt{\frac{E}{R_y}}. \quad (5)$$

Напруження у стовбурі стиснуто-зігнутої димові труби обчислюється за класичною формулою:

$$\sigma = N / F \pm M / W \leq R_y \gamma_c. \quad (6)$$

Насьогодні розроблено велику кількість програмних комплексів (SCAD, ЛІРА САПР, ANSYS, Selena-Result та ін.), що дозволяють розраховувати димову трубу (циліндричну оболонку) під дією постійних, змінних тривалих на короткочасних навантажень, епізодичних навантажень, динамічних та температурних впливів вітрового потоку та газів продуктів згоряння всередині труби. В основу цих програм покладено метод скінченних елементів (МСЕ), що дає можливість чисельного моделювання напружено-деформованого стану димові труби.

Використання цих програмних комплексів для труб кінцевої довжини дає змогу визначити значення зусиль та згинальних моментів, нормальних та дотичних напружень, переміщень з урахуванням реальних умов закріплення кінців і точок

передачі горизонтальних навантажень на несучі вежі, з урахуванням виявлених дефектів і пошкоджень та фактичного технічного стану.

Наприклад, використовуючи програму Selena-Results при побудові розрахункової схеми реальна несуча вежа (висота – 92,50 м) змодельована як просторова стрижнева конструкція з шарнірним сполученням елементів у вузлах, а димова труба (висота – 100,00 м, діаметр – 2,60 м) в місці спирання на діафрагму вежі як циліндрична оболонка (рис. 4).

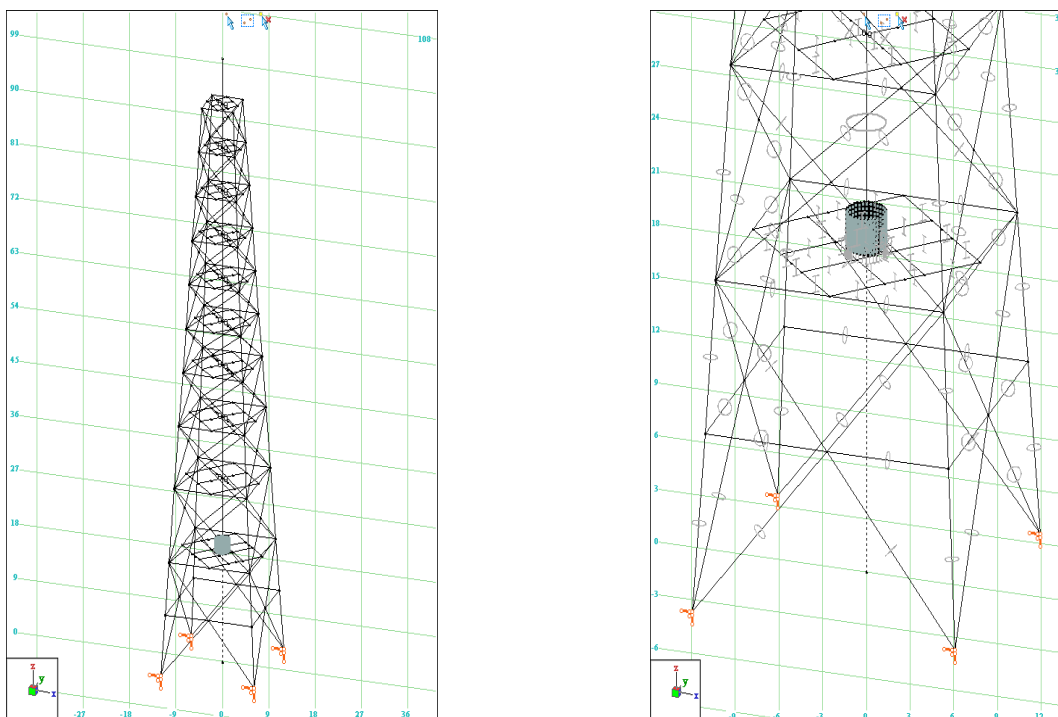


Рисунок 4 – Розрахункова схема споруди

Таке моделювання дало змогу визначити напружено-деформаційний стан елементів металевої труби і несучої вежі з урахуванням просторової і спільної роботи конструкцій.

При цьому було враховано фактичний технічний стан металевої димової труби та вежі і змодельовані виявлені дефекти та пошкодження (тріщини і прогари в стовбурі труби).

Також було проаналізовано явище крайового ефекту в трубі в місці спирання на діафрагму жорсткості, визначено поздовжні напруження у зовнішній фібрі, дотичні (рис. 5) напруження і кільцеві напруження (рис. 6) в основі труби.

Максимальні дотичні напруження стиснення в трубі в зоні крайового ефекту досягають – 152 МПа, максимальні кільцеві напруження стиснення – 84 МПа.

Напруження в найбільш навантажених поясах та розкосах вежі досягають – 195 МПа, в несучих балках діафрагми, на яку спирається витяжна труба, досягають – 256 МПа.

Використання сучасних програм в порівнянні з аналітичними методами дозволяє знайти резерви несучої здатності на 5-10% більше.

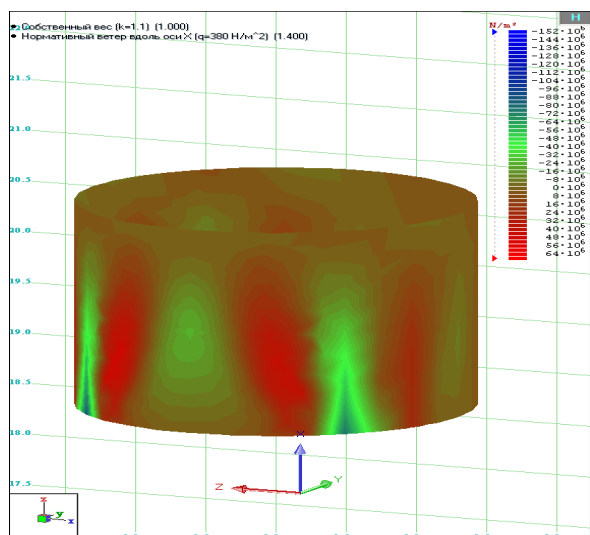


Рисунок 5 – Дотичні напруження в основі труби

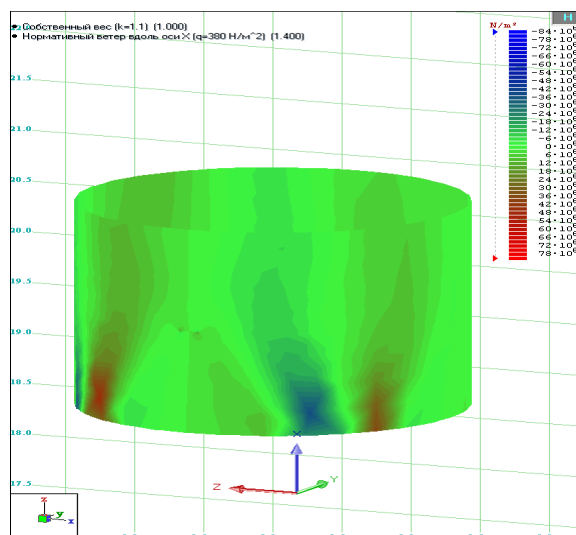


Рисунок 6 – Кільцеві напруження в основі труби

Величини напружень σ в елементах металевих конструкцій та переміщень f на рівні верхньої площадки веж, виконаних за допомогою програмних комплексів SCAD (ліцензія №7276), Selena-Result (ліцензія 0969511952/0), ЛІРА САПР (ліцензія №1/5451) і аналітичними методами співставленні в таблиці 1.

Таблиця 1 – Співставлення напружень σ та переміщень f

	Місце розташування розрахунку	Величини напружень σ (МПа) або переміщень f (мм)				
		Нормативні вимоги	Аналітичний метод	SCAD	ЛІРА САПР	Selena
Витяжна труба і несуча вежа Н = 92,50 м комбінату «Мінеральні добрива» у м. Россош						
σ_1	пояс вежі нижнього ярусу	$\leq 235 (R_y)$	212	-	206	201
σ_2	розкіс вежі нижнього ярусу	$\leq 235 (R_y)$	194	-	187	181
σ_3	труба на опорі	$\leq 235 (R_y)$	145	-	136	134
f	верхній ярус вежі	≤ 600 (0,006 Н)	542	-	512	515
Труба і несуча вежа Н = 75,00 м комбінату «Азот» у м. Северодонецьк						
σ_1	пояс вежі нижнього ярусу	$\leq 235 (R_y)$	225	213	-	218
σ_2	розкіс вежі нижнього ярусу	$\leq 235 (R_y)$	204	195	-	197
σ_3	труба на опорі	$\leq 235 (R_y)$	225	216	-	220
f	верхній ярус вежі	≤ 450 (0,006 Н)	381	350	-	345

Результати засвідчують про високу збіжність оцінки параметрів напружено-деформаційного стану конструкцій аналітичними методами і чисельними методами. Отже їх можливо використовувати для оцінки надійності конструкцій металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.

У третьому розділі виконано аналіз основних закономірностей багатоциклової і малоциклової пошкоджуваності металу конструкцій висотних споруд під дією динамічних навантажень з урахуванням втомної міцності, виконано аналіз утворення та розвитку пошкоджень від корозійних процесів під дією атмосферних впливів та продуктів згоряння, розглянуто високотемпературні впливи на металеві димові труби без футеровки і на труби з локальним руйнуванням футеровки, виконано аналіз розвитку тріщиноподібних пошкоджень у зварних швах та деформаційного старіння.

Найбільший вплив у напружено-деформований стан стовбурів труб і несучих веж становить вітрове навантаження. Під дією циклічних пульсаційних вітрових навантажень у металевих конструкціях димових труб виникає втомне пошкодження металу. З плином часу під дією змінних навантажень у цих зонах відбувається поступове накопичення мікропластичних деформацій (смуг ковзання), утворення мікротріщин і об'єднання їх у магістральну тріщину.

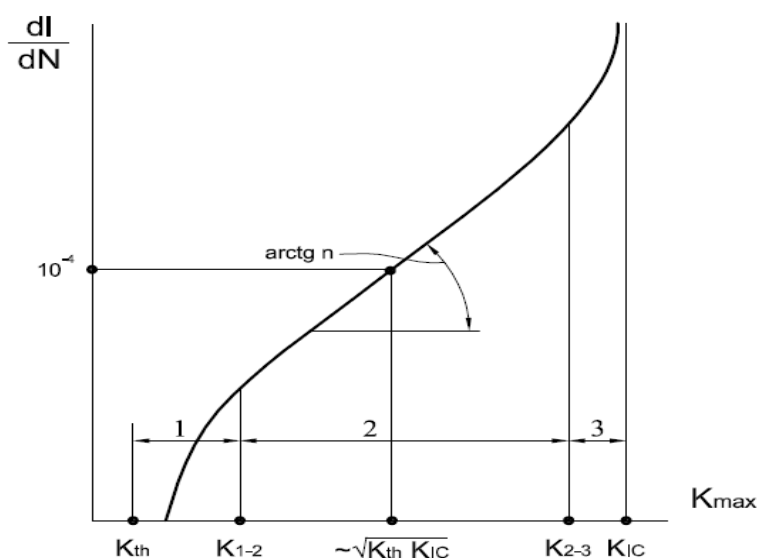


Рисунок 7 – Кінетична діаграма втомного руйнування

Для прогнозування зростання втомних тріщин в елементах металевих димових труб і веж необхідно використовувати інформацію про закономірності зростання тріщин під дією циклічних навантажень на основі кінетичної діаграми втомного руйнування (КДВР) (рис. 7).

Кінетична діаграма втомного руйнування дозволяє оцінити втомну міцність і довговічність металу в конструкціях димових труб і несучих веж.

При малоциклової та багатоциклової втомі для опису повної діаграми втомного руйнування використовуємо співвідношення $\frac{dl}{dN}$, що враховує локальний характер руйнування у вершині тріщини і описується рівнянням Періса:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (7)$$

де $\frac{dl}{dN}$ – швидкість зростання втомної тріщини;

C, n – експериментальні константи матеріалу;

ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напруження за один цикл.

Коефіцієнт C і показник ступеня n кількісно характеризують опір зростанню тріщини в області лінійної ділянки діаграми (ділянка 2) в інтервалі

$10^{-5} < dl/dN < 10^{-3}$ мм/цикл. У цій ділянці для визначення експериментальних показників проведено багато досліджень, які показують, що для більшості показник ступеня $n = 2 \dots 10$, а параметр $C = 10^{-25} \dots 10^{-8}$.

Інтегруючи вираз Періса по dl у межах зміни довжини тріщини від $l_{нач}$ до $l_{кон}$ і виражаючи кінцеву довжину тріщини, отримуємо залежність

$$l_{кон} = \left((l_{нач})^{\frac{2-n}{2}} - N \left[\frac{n-2}{2} \right] \cdot C (\sigma_{max} f_k)^n \right)^{\frac{2}{2-n}}, \quad (11)$$

де N – кількість циклів навантаження із заданим рівнем напруження.

На інтенсивність корозійного зносу металевих димових і вентиляційних труб, елементів несучих веж передусім впливають атмосферні чинники, парціальний тиск водяної пари і відносна вологість, агресивність і температура димових і витяжних газів усередині труби (рис. 8).



Рисунок 8 – Корозія ствола димової труби понад 10%

Основними складовими продуктів згоряння у трубах є оксиди вуглецю і азоту, діоксид сірки, частинки золи і водяна пара. Найбільш агресивними відносно металу є сірковмісні сполуки SO_2 і SO_3 , які в асоційованому стані з водяною парою утворюють сірчану кислоту. При зниженні температури димових газів до точки роси утворюється конденсат на внутрішній поверхні стовбура труби або футеровці. Встановлено, що від кількості в газах сірчистих сполук залежить поява точки роси – чим більша кількість сірчистих з'єднань, тим нижчою є точка роси.

А при вмісті у паливі сірки 3% і вище, конденсат на стінках труби може бути у вигляді сірчаної кислоти з концентрацією до 70%.

Стовбур труби під дією пульсуючих температурних впливів піддається дії нестационарних температурних полів, які призводять до виникнення у ньому внутрішніх температурних напружень. Суттєві знакозмінні температурні напруження призводять до скорочення терміна служби димової труби.

За високих температур механічні характеристики металу димових труб залежать від тривалості їх дії. Розміри навантажених елементів труби за високої температури безперервно змінюються за розвитку процесу повзучості. Залишкова деформація спочатку швидко зростає (незатухаюча повзучість), далі протягом основного часу залишається постійною (затухаюча повзучість), і наприкінці перед руйнуванням зразка швидкість повзучості стрімко збільшується. Підвищення температури і збільшення напруження прискорює розвиток повзучості. Згідно

даним матеріалів обстежень при наявності тріщин у футеровці стовбура труби виникають такі термічні напруження, що призводять до значних зусиль розтягу з холодного боку конструкції і стискання з гарячого. Після утворення тріщин у футеровці металевий стовбур піддається дії температур з більш високим градієнтом температур, що призведе до появи додаткових напружень.

У результаті проведеного аналізу можна констатувати, що в процесі експлуатації димових труб деформаційне старіння не відбувається. Наближення границь плинності σ_m і міцності σ_e (зростання $k_{me} = \sigma_m / \sigma_e$) не пов'язано з часом експлуатації димових труб, а зумовлено прирощенням σ_m (через деформаційне набуття крихкості), і залежить від величини пластичної деформації і характеру діаграми розтягу сталі.

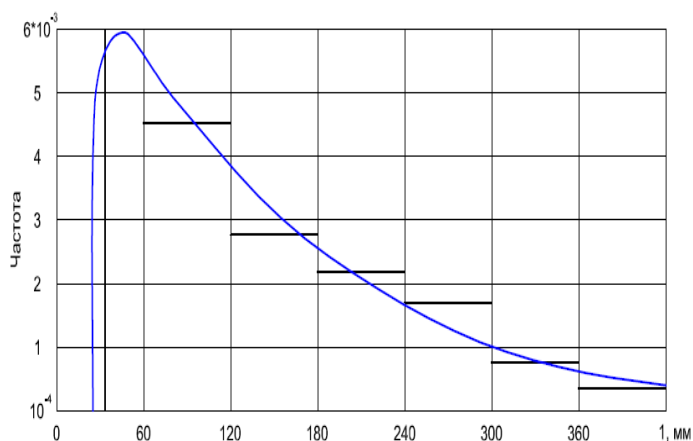


Рисунок 9 – Розподіл довжини виявлених непроварів

Дефектоскопічний контроль зварних металевих димових труб у процесі їх виробництва і обстеження показує, що у зварних з'єднаннях є технологічні дефекти – непровари, підрізи, пори, шлакові включення, розшарування та інші. Аналіз технологічних дефектів свідчить, що до 70% від загальної кількості дефектів зварних з'єднань є пори (газові включення) і неметалеві (шлакові) включення. Більшість із виявлених пор мають розміри у межах 0,05 – 0,2 мм у діаметрі (рис. 9).

Дані мікроскопічних досліджень зварних швів показують, що в переважній більшості випадків пори і шлакові включення містять короткі тріщини, які є вихідною тріщиною малих розмірів.

За результатами контролю «ультразвук - рентген» побудовані гістограми розподілення довжини виявлених непроварів.

Непровари і підрізи також належать до тріщиноподібних дефектів, які ініціюють втомні тріщини уже під час перших циклів динамічного навантаження. При оцінюванні циклічного ресурсу елементів конструкцій необхідно орієнтуватися на ймовірні характеристичні розміри вихідних дефектів. Значення величин цих дефектів, згідно з наведеними даними, розташовані в інтервалі 0,1 – 0,5 мм (рис. 10).

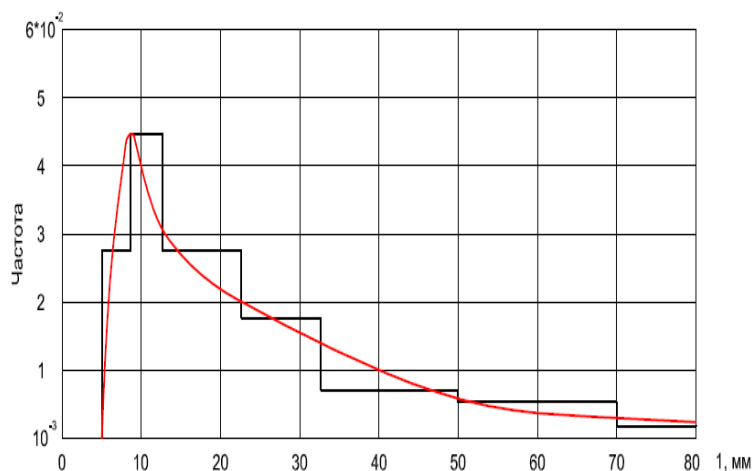


Рисунок 10 – Розподіл довжини виявлених підрізів

Число циклів до появи втомної тріщини з такого вихідного тріщиноподібного дефекту зварювання не перевищує 8-12% сумарного ресурсу циклічної навантажувальності зварної конструкції. При цьому стадія зародження тріщини практично відсутня, і при оцінюванні технічного ресурсу її можна не розглядати.

У **четвертому розділі**, ґрунтуючись на дані натурних обстежень, розроблено типологію дефектів і пошкоджень металевих димових труб і їх несучих веж, футеровки димових труб; 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 небезпеки і технічного стану.

Вихідними даними для аналізу пошкоджуваності слугують матеріали висновків про технічний стан і експертиз промислової безпеки понад 100 металевих димових і вентиляційних труб і 25 несучих веж. Виявлені дефекти і пошкодження були класифіковані за різними типами і величиною пошкоджень (рис. 11, 12).

Основними пошкодженнями металевих димових труб були визначені наступні (рис.13):

- руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж 30% площі поверхні труби, поверхнева корозія металу (дефект 1);
- корозійний знос стінки стовбура труби (рівномірний) більше 10% товщини (дефект 2);
- локальні або виразкові корозійні пошкодження стінки стовбура труби до 100% товщини (дефект 3);
- тріщини в основному металі, швах і навколошовній зоні (дефект 4);
- підрізи, непровари, шлакові включення і пори у зварних з'єднаннях елементів труб (дефект 5);
- ослаблення або пошкодження болтових з'єднань (враховуючи анкерні болти) (дефект 6);
- пошкодження ребер, траверс і плит опорних вузлів (дефект 7);
- пошкодження елементів металевих опор під трубу (дефект 8);
- місцева втрата стійкості стовбура труби (дефект 9);
- тріщини в бетоні фундаменту під трубою, руйнування захисного шару бетону з оголенням і корозією робочої арматури (дефект 10).



Рисунок 11 – Тріщини у кутиковому зварному шві приварки ребер до плити



Рисунок 12 – Локальне наскрізне корозійні пошкодження стінки труби

На рис. 13 наведена статистична діаграма загальної вибірки дефектів і пошкоджень димових і вентиляційних труб.

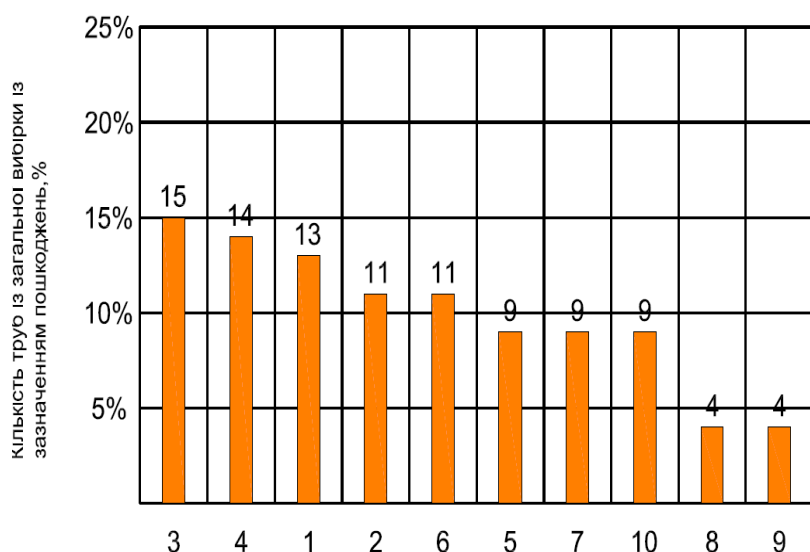


Рисунок 13 – Пошкоджуваність металевих стовбурів димових труб

Виникнення і розвиток дефектів та пошкоджень зумовлене сумарним корозійним, температурним, вітровим і експлуатаційним впливом. Але для кожного типу пошкоджень є певний домінуючий вплив. Пошкодження анкерних болтів, пошкодження ребер, траверс і плит опорних вузлів труби, пошкодження елементів металевих опор під трубу

зумовлені незадовільним обслуговуванням технічним персоналом.

Втрата стійкості стовбура труби найчастіше викликана неспрацюванням упорів на робочих майданчиках, що розв'язують трубу з площини і передають на вежу вітрові навантаження з труби. Тріщини в бетоні фундаменту під трубою, руйнування захисного шару бетону і корозія арматури зумовлені недостатньою морозостійкістю і водонепроникністю бетону.

Наскрізні корозійні пошкодження стінки стовбура труби, тріщини в основному металі і швах, утрата стійкості стовбура труби є дефектами, що становлять безпосередню небезпеку руйнування труби, і мають бути усунені негайно після виявлення. У відсотках із загальної вибірки дефектів перераховані дефекти складають 25%.

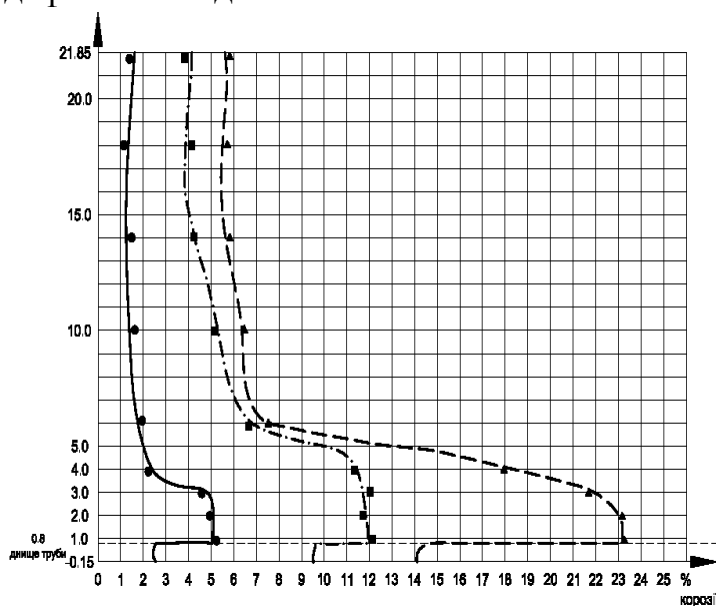


Рисунок 14 – Корозійний знос стовбурів 3 димових труб станції «Задніпровська»

На величину корозійного зносу металевих димових труб суттєво впливає час знаходження їх в експлуатації і, як наслідок, термін корозійного та температурного впливу димових газів (рис. 14). Металеві димові труби компресорних станцій «Задніпровська» (18 труб), «Кіровоградська» (18 труб) і «Південнобузька» (17 труб) магістрального газопроводу «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани» уведено в експлуатацію у 1988 р.

Всі металеві димові труби однакової висоти і перерізу,

виготовлені з однієї марки сталі, працюють в однакових умовах вітрових і атмосферних впливів. При нормальному режимі експлуатації працюють 4-5 компресорів (від компресора відводять продукти горіння 2 димові труби), а решта знаходяться в резерві або профілактичному ремонті. Із-за нерівномірності експлуатації фактичний час знаходження в роботі димових труб різниться в декілька разів. Корозійний знос днища значно більший ніж стовбура труби (досягає 100%), що викликано виготовлення його з киплячої сталі (рис. 15).

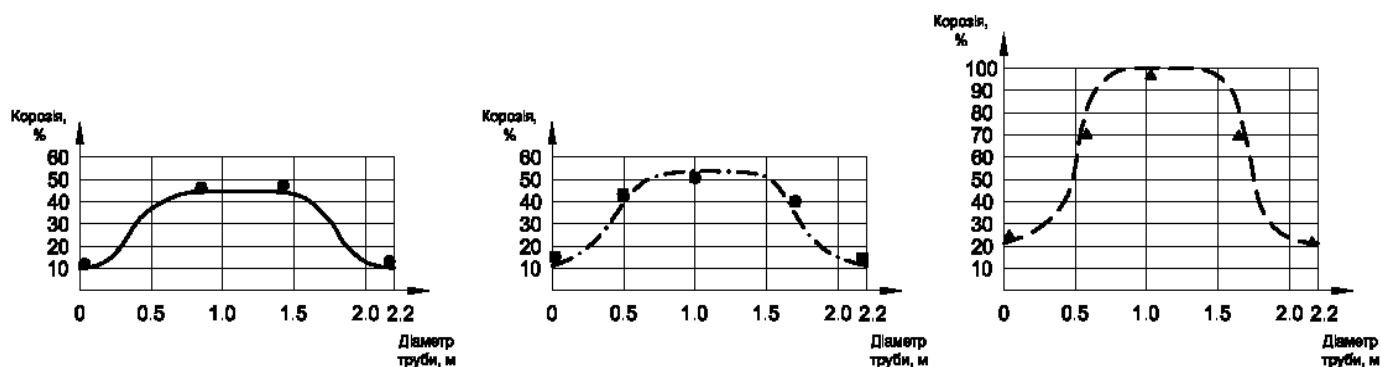


Рисунок 15 – Корозійний знос днищ трьох димових труб компресорної станції

При обстеженні футеровки димових труб виявлені такі пошкодження (рис. 16, 17), з них основними є (рис. 18):

- вертикальні і похилі тріщини у футеровці (дефект 1);
- випинання кладки футеровки і обвалення футеровки (рис. 16, дефект 3);
- локальні руйнування футеровки і випадіння окремих цеглин (рис. 17, дефект 2);
- пошкодження або відсутність теплоізоляції (дефект 4);
- пошкодження слізникових консолей (дефект 5);
- проміжки між ланками футеровки (дефект 6).



Рисунок 16 – Випинання кладки футеровки

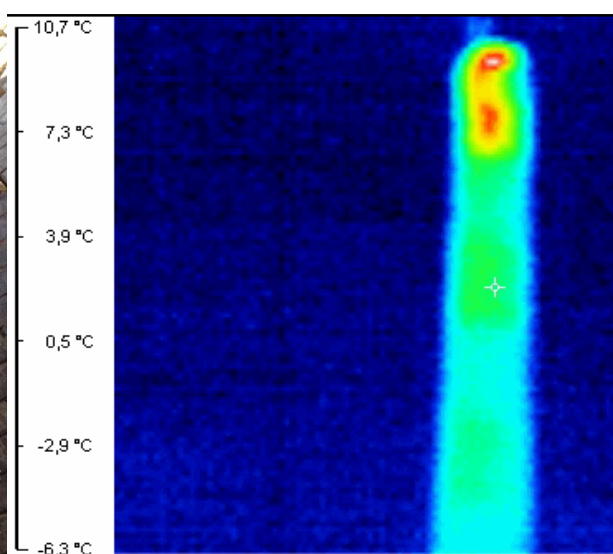


Рисунок 17 – Руйнування футеровки на термограмі

На рис. 18 наведена статистична діаграма щодо кількості в відсотках із загальної вибірки дефектів і пошкоджень димових і вентиляційних труб.

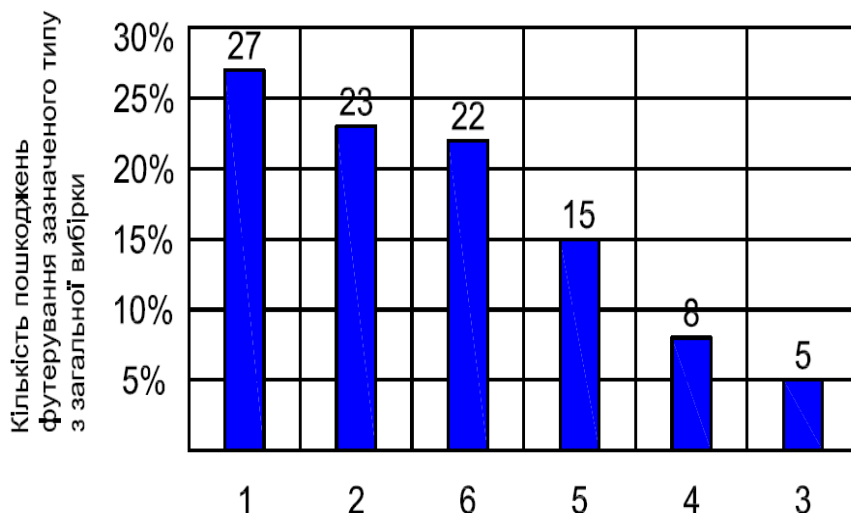


Рисунок 18 – Пошкоджуваність металевих стовбурів димових труб

Основними впливами на конструкції футеровки, що призводять до утворення вертикальних і похилих тріщин, локальних пошкоджень футеровки, випинання кладки футеровки, пошкодження теплоізоляції є температурні і силові (вибух газу у трубі) впливи.

Локальні наскрізні пошкодження футеровки труби, випинання кладки футеровки, обвалення кладки становлять безпосередню небезпеку руйнування труби.

Із загальної вибірки такі дефекти складають 45%, і при їх виявленні зупиняють виробництво і проводять капітальний ремонт.

Дефекти і пошкодження металевих гратчастих веж, в основному, аналогічні пошкодженням димових і вентиляційних труб з доповненням пошкодження упорів кріплення з площини димової труби (рис. 19) і міжщільною (міжпакетною) корозією елементів вежі (рис. 20) та деякими іншими.

Основними дефектами і пошкодженнями металевих гратчастих веж є (рис. 21):

- руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж на 30% площі поверхні елементів решітки (розтріскування, лущення, розшарування і відсутність антикорозійного покриття) (дефект 1);
- корозійний знос елементів вежі, що перевищує 10% площі перерізу (рис. 20, дефект 2);
- елементи решітки вирізані під час експлуатації або не встановлені на етапі монтажу (дефект 3);
- місцеві згини елементів решітки вежі (дефект 4);
- міжщільна (міжпакетна) корозія елементів вежі (дефект 5);
- тріщини у зварних швах, руйнування зварних швів кріплення елементів решітки (дефект 6);
- пошкодження упорів кріплення з площини димової труби, великі проміжки між трубою і упорами (дефект 7);
- втрата стійкості фасонки опорних розкосів вежі (дефект 8);
- деформація несучих і огорожувальних елементів вежі, деформація анкерних болтів (дефект 9);
- тріщини в бетоні фундаментів, руйнування бетону фундаменту, замонолічування несучої металеві балки під вежу (дефект 10).



Рисунок 19 – Корозійний знос елементів вежі, що перевищує 10% площі перерізу



Рисунок 20 – Пошкодження упорів кріплення з площини димової труби

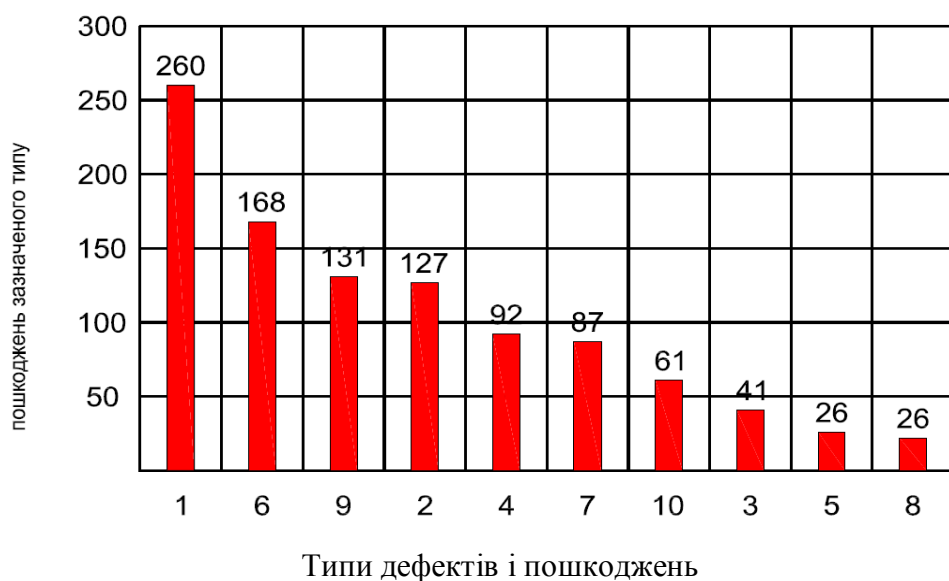


Рисунок 21 – Пошкоджуваність несучих конструкцій витяжних веж

Причини виникнення різних дефектів і пошкоджень в елементах несучих веж аналогічні до причин їх виникнення у металевих трубах. Але є суттєві відмінності, пов'язані з відсутністю температурних і корозійних впливів усередині несучих замкнених елементів вежі.

Усі основні дефекти і пошкодження віднесені до однієї з трьох категорій небезпеки (категорії А, Б, В) і класифіковані залежно від виду і місця розташування, ймовірних причин виникнення, з визначенням методів виявлення і ознак виникнення, з описанням заходів щодо попередження їх подальшого розвитку.

За результатами аналізу виявлених дефектів і пошкоджень металевих димових труб і несучих веж визначені їхні гранично допустимі значення залежно від категорії небезпечності дефектів і технічного стану конструкцій (табл. 2).

Таблиця 2 – Гранично допустимі значення дефектів та пошкоджень залежно від категорії їх небезпеки та технічного стану конструкцій.

№ п / п	Дефекти та пошкодження	Гранично допустимі значення при технічному стані			
		нормальне (I)	задовільне (II)	непридатне для нормальної експлуатації (III)	аварійне (IV)
		Категорії небезпеки дефектів			
		«В»		«Б»	«А»
1	Відхилення осі стовбура f від вертикалі	$f \leq 0,006-0,008H$		Встановлюється розрахунком	Значення, що перевищують розрахункові
2	Тріщини в основному металі і зварних швах	Не допускаються			Наявні
3	Опуклості і вм'ятини на поверхні стовбура і елементів вежі, відхилення від проектних розмірів	Не більше 1% розміру діаметру труби у розглядуваному перерізі	Встановлюються розрахунком		Значення, що перевищують розрахункові
4	Корозійний знос стінки труби й елементів вежі в опорній частині, у зоні фланцевих з'єднань, у місцях кріплення світлофорних майданчиків і драбин	Не допускається	До 15% товщини стінки в одному перерізі при товщині стінки не менше 4 мм	Встановлюється розрахунком	Понад 50% товщини стінки в одному перерізі
5	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби	Не допускаються	Не допускаються	Наявні	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби

П'ятий розділ присвячений розробці фізико-статистичного методу оцінки надійності елементів металевих димових труб і несучих веж та методів управління їх старінням, розробці методики визначення довговічності металевих димових труб і несучих веж τ з урахуванням різних комбінацій сумісної дії впливів – силового $(dH/dt)_c$, корозійного $(dH/dt)_n$, температурного $(dH/dt)_k$ і динамічного впливів; визначення довговічності металевих димових труб з прогарами у стінці; довговічності димових труб за критеріями механіки руйнування; розробці методики визначення залишкового ресурсу T металевих димових і вентиляційних труб з урахуванням пошкоджень і терміну експлуатації.

Для оцінки і прогнозу надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж в умовах впливу зовнішнього несприятливого середовища

прийнятий фізико-статистичний метод, що включає: результати досліджень фізико-хімічних процесів зміни властивостей матеріалів конструкцій в часі; детерміновані залежності, що зв'язують показники властивостей конструкцій з їх параметрами і зовнішніми факторами (навантаженням і середовищем); статистичні дані про мінливість параметрів, що визначають властивості конструкцій; математичні методи теорії надійності, що дозволяють отримати розподіл випадкових функцій при відомих розподілах аргументів; техніко-економічна та інша інформація, що обґрунтовує той чи інший рівень надійності властивості конструкцій.

Схема формування відмов конструкцій металевих димових труб в умовах впливу зовнішніх середовищ наведена на рис. 22. Відмова виникає при досягненні Y_j -ї властивості конструкції (розрахунковий опір, товщина та інш.) граничного значення S_j , що станеться через деякий випадковий проміжок часу експлуатації.

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. Вплив зовнішнього 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.

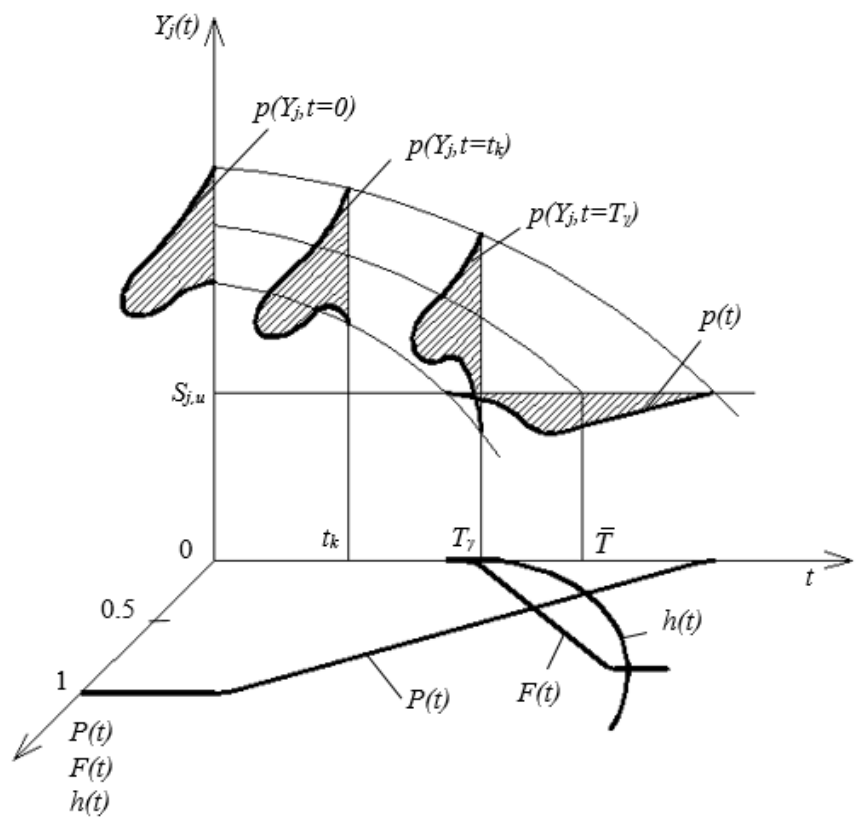


Рисунок 22 – Загальна схема формування відмови конструкцій

В результаті відбувається формування закону розподілу ймовірності безвідмовної роботи $p(t)$, який визначає ймовірність виходу параметра Y_j за границю значення $S_{j,u}$, тобто ймовірність відмови $F(t) = 1 - P(t)$. Час досягнення математичного очікування властивості граничного значення визначається середнім терміном служби конструкцій \bar{T} . На схемі також показано залежність функції відмов $P(t)$, функції ймовірності відмов $F(t)$ та інтенсивності відмов $h(t)$ за гамма-процентний термін служби T_γ (ресурс).

Регламентований рівень надійності конструкцій згідно Європейських норм залежить від класу наслідків. Металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі відносяться до класу наслідків СС2 (табл. 3).

Таблиця 3 – Класів наслідків, клас надійності, індекс надійності та імовірність безвідмовної роботи димових і вентиляційних труб та їх несучих веж

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

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

На практиці використовують різні випадки управління старінням конструкцій металевих димових і вентиляційних труб та несучих веж. Для забезпечення безвідмовної роботи в певний момент часу повністю усувається вплив негативного середовища шляхом фарбування, обмазки, футеровки (рис. 23, а) або виконуються заходи, що уповільнюють процес деградації матеріалів і конструкцій (рис. 23, б), або виконуються заходи по відновленню функціональних властивостей конструкцій (ремонт, підсилення, заміна елементів) (рис. 23, в).

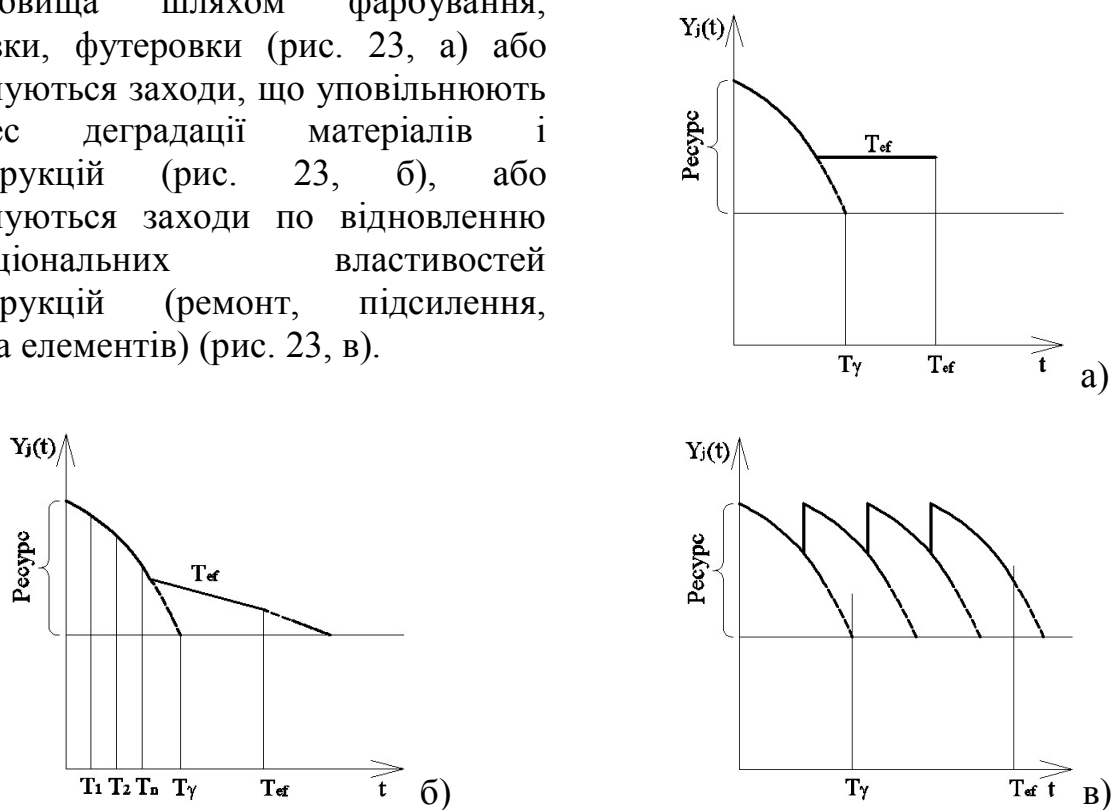


Рисунок 23 – Управління старінням металевих димових труб і несучих веж

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.

Протягом усього життєвого циклу в конструктивних елементах димових труб і несучих веж відбувається зниження їх робочого перерізу внаслідок розвитку пластичних деформацій, зумовлених дією механічних напружень ε_c , високих температур (повзучості) ε_n і корозійного середовища ε_k .

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

$$\frac{dH}{dt} = \left(\frac{dH}{dt}\right)_c + \left(\frac{dH}{dt}\right)_n + \left(\frac{dH}{dt}\right)_k, \quad (9)$$

де $(dH/dt)_c$ – швидкість зміни поперечного перерізу в результаті дії зовнішнього навантаження;

$(dH/dt)_n$ – швидкість зміни поперечного перерізу, яка зумовлена 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:

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_\varepsilon = 0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m, \quad (10)$$

де δ_0 – початкова товщина стінок труб;

ε_i – інтенсивність деформації;

A і m – константи, що визначають процеси деформаційного зміцнення і розміцнення металу від дії високих температур.

Швидкість зростання пошкоджень у результаті хімічної корозії представлена в лінійній залежності від інтенсивності напружень σ_i і деформації ε_i :

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_k = v_0 [(1 + k_\sigma \cdot \sigma_i)(1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i)], \quad (11)$$

де v_0 – швидкість корозії ненапруженого металу;

k_ε і k_σ – механохімічні параметри.

При одновісному напруженому стані і корозійного зносу труби на внутрішній поверхні (рис. 24) нормальні напруження змінюватимуться за формулою

$$\sigma_{(\tau)} = \frac{Q}{\pi [r_n^2 - (r_e + S_e(\tau))^2]}, \quad (12)$$

де $S_e(\tau)$ – прирощення внутрішнього радіуса труби через корозію поверхні (при рівності індексів $e = b$).

З формули (12) випливає

$$r_g + S_g(\tau) = \sqrt{r_n^2 - \frac{\sigma_0 \cdot (r_n^2 - r_g^2)}{\sigma(\tau)}} \quad (13)$$

Диференціюючи рівняння (13) за часом, отримаємо

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{2 \cdot \sigma^2 \cdot (r_g - t(\tau) d/d\tau [r_g + S_g(\tau)])}{(r_n^2 - r_g^2) \cdot \sigma_0} \quad (14)$$

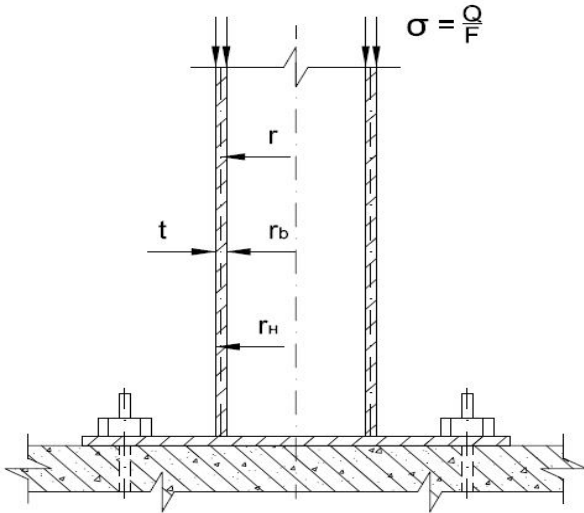


Рисунок 24 – Поперечний переріз димової труби

Швидкість змінювання внутрішнього радіуса $\frac{d[r_b + S_g(\tau)]}{d\tau}$ має дорівнювати швидкості корозії v_0 , яка визначається відповідно до формули (14) при пружних деформаціях:

$$\frac{d[r_b + S_g(\tau)]}{d\tau} = v_0 (1 + k_\sigma \sigma_i) \quad (15)$$

де

k_σ – механохімічний параметр;
 σ_i – інтенсивність напружень.

Розглядаючи спільно вирази (9), (14) і (15), отримаємо

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sigma_i^2 \sqrt{r_n^2 - \frac{\sigma_0 (r_n^2 - r_g^2)}{\sigma(\tau)}} \cdot (1 + k_\sigma \cdot \sigma_i)}{(r_n^2 - r_g^2) \cdot \sigma_0} \quad (16)$$

де $\sigma_0 = \frac{Q}{\pi(r_n^2 - r_g^2)}$ – напруження у димовій трубі до початку корозійного процесу.

Тут прийнято, що $\sigma_i = \sigma$.

Рівняння (16) є основним і визначає динаміку змінювання інтенсивності напружень $\sigma_i(t)$ у процесі експлуатації труби.

Як граничний стан труби візьмемо – $\sigma_i = \sigma_m$.

Довговічність τ_T отримуємо інтегруванням рівняння (16) у межах від 0 до τ_T і від $\sigma_0 = \sigma_m$:

$$\tau_T = \frac{\sigma_0 \cdot (r_n^2 - r_g^2) \sigma_m}{2v_0} \int_{\sigma_0}^{\sigma_m} \frac{d\sigma_i}{\sigma_i^2 (1 + k_\sigma \cdot \sigma_i) \cdot \sqrt{r_n^2 - \frac{\sigma_0 (r_n^2 - r_g^2)}{\sigma_i}}} \quad (17)$$

Механохімічний параметр k_σ можна визначити розрахунковим шляхом: $k_\sigma \approx V/3 \cdot R \cdot T$, де V – мольний об'єм сталі; R і T – універсальна газова і абсолютна температура.

На основі рівняння (17) і аналізу чисельних розрахунків τ_T встановлено, що довговічність труб можна розраховувати за формулою (похибка не перевищує 5%):

$$\tau_T = \frac{t_0}{v_0} (1 - K_{HT}) \cdot \left(1 + \frac{V \cdot \sigma}{3 \cdot R \cdot T} \sqrt{K_{HT} \cdot T} \right), \quad (18)$$

де t_0 – початкова товщина труби;

$K_{HT} = \sigma_0 / \sigma_m$ – коефіцієнт використання несучої здатності по σ_m .

У якості параметрів при розрахунку залишкового ресурсу, що визначають технічний стан димових труб і несучих веж, пропонується визначати різні коефіцієнти запасу: по першому граничному стану k^1 , по другому граничному k^2 і коефіцієнт запасу за конструктивними вимогами k^c , 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 навантаженість конструкцій f_i^1 , не повинне перевищувати розрахунковий опір металу R_i на різних розрахункових ділянках (перетинах) конструкції

$$f_i^1(x_m) \leq R_y, \quad (19)$$

де i – індекс, що позначає вид розрахунку на міцність, стійкість, втомне чи крихке руйнування (та ін.) за першим граничним станом;

x_m – різні параметри (внутрішні сили, геометричні характеристики перерізів тощо), які визначають значення функції f_i^1 за першим граничним станом.

При конструктивних вимогах на різних ділянках

$$(G^k)^p \leq (G_{lim}^k)^p, \quad (20)$$

де G^k – конструктивний параметр (геометричні розміри елементів, міцнісні і жорсткісні характеристики тощо) на ділянці n ;

G_{lim}^k – граничне значення конструктивного параметра;

p – показник ступеня, що служить для уніфікації нерівності (20), причому показник $p = 1$, якщо за нормами вимагається, щоб G^k не перевищував G_{lim}^k і при $p = -1$, якщо вимога, щоб G^k був більше G_{lim}^k .

Відношення правих і лівих частин цих нерівностей (19, 20) являє собою коефіцієнти запасу k^1 , k^k при розрахунку за першим граничним станом та за конструктивними вимогами. Справний стан передбачає, що всі коефіцієнти запасу не менші за одиницю.

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):

$$k_0 - k = at^2 + k'_0 t, \quad (21)$$

при
$$a = \frac{(k_0 - k_e - k'_0 t_e)}{t_e^2} \quad (22)$$

де 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'_0 – заданий параметр, який чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу дотичної до залежності $k_0 = k(t)$ у початковий момент часу, тобто $k'_0 = -dk/dt$, при $t = t_0$.

При задаванні параметра k'_0 має виконуватись умова:

$$0 \leq k'_0 \leq \frac{(k_0 - k_e)}{t_e} \quad (23)$$

За умови рівності $k'_0 = (k_0 - k_e)/t_e$ залежність (22) стає лінійною функцією, при $k'_0 = 0$ вона перетворюється на квадратичну параболу з вершиною, розташованою на осі ординат, що і представлена на рис. 25.

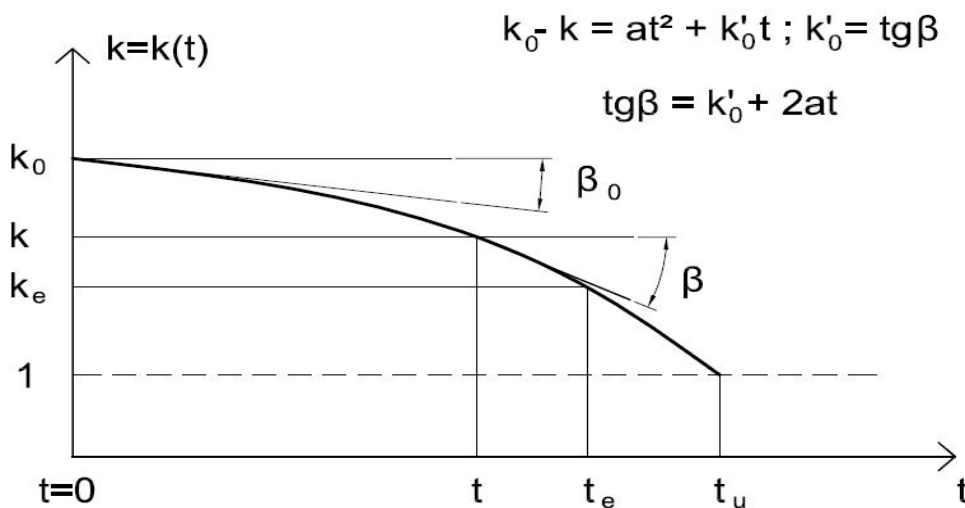


Рисунок 25 – Зміна коефіцієнтів запасу димової труби протягом життєвого циклу

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

$$t_u = -b + \sqrt{b^2 + (k_0 - 1)/a}, \quad (24)$$

де $b = 0,5k'_0/a$.

При $k'_0 = 0$ залежність (24) спрощується:

$$t_u = t_e \sqrt{(k_0 - 1)/(k_0 - k_e)}. \quad (25)$$

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:

$$T = \min[(t_u - t_e)_n \beta_n]. \quad (26)$$

де β_n – поправний коефіцієнт, що враховує вплив додаткових чинників на ділянці (в перерізі) n .

На основі розробленої методики виконано розрахунок залишкового ресурсу обстежених димових і вентиляційних труб, який визначено за першим граничним станом і конструктивними вимогами, з урахуванням року введення в експлуатацію споруд, термінів перебування в експлуатації (табл. 4).

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

Необхідно підкреслити, що такі тривалі терміни експлуатації можливі лише при постійній діагностиці технічного стану металевих димових і вентиляційних труб і негайному усуванні виявлених пошкоджень категорії «А».

Таблиця 4 – Залишковий ресурс димових і вентиляційних труб

№ п/п	Назва підприємства, найменування димових і вентиляційних труб	Рік уведення в експл., р.	Термін експлуатації на момент обстеження, років	Залишковий ресурс, Т, років
1	ВАТ «Тагмет», димова труба №1 печі 4 ТПЦ-2	1964	48	29
2	ВАТ «Тагмет», димова труба терм. печей механ. цеху	1965	47	30
3	ВАТ «Тагмет», димова труба вогнетривів мартен. цеху	1961	51	24
4	ВАТ «Металлург. завод «Електросталь» димова труба дугової печі №2 СПЦ-4	1980	30	43
5	УМГ «Черкаситрансгаз», КС «Південнобугська», дим. труба №11	1986	27	38
6	ВАТ «Азот», м. Кемерово вентиляційна труба корпусу 706	1958	63	21
7	ВАТ «Азот», м. Кемерово факельна труба корпусу 679	1974	49	29
8	ВАТ «Міндобрива», м. Воскресенськ витяжна труба цеху сірчаної кислоти	1974	48	29

Результати дослідження у **шостому розділі** спрямовані на розробку конструктивних і технологічних рішень підсилення металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж з особливо небезпечними пошкодженнями – прогарами, тріщинами в основному металі і зварних швах, утратою загальної стійкості стовбура труби. Розроблено методику урахування підсумовування силових та зварювальних напружень при різних варіантах підсилення димових труб.

Температурні впливи і циклічні навантаження можуть призводити до появи тріщин у металі і зварних швах елементів металевих димових труб і несучих веж. Корозійний вплив навколишнього середовища і димових газів значно прискорюють

розвиток тріщин. За допомогою програмно-обчислювального комплексу Selena побудована скінченноелементна модель основи труби з тріщиною у зварному шві (рис. 26).

Отримані результати свідчать, що після утворення тріщини в горизонтальному зварному шві стовбура труби, лінії головних напружень викривлюються і згущуються, що призводить до появи двох головних напружень σ_1 і σ_2 . У місці тріщини виникає плоский напружений стан. По краях тріщини, де коефіцієнт концентрації напружень максимальний, у металі з'являються наявні ділянки з яскраво вираженою пластичною текучістю (рис. 27).

Найчастіше металеві димові труби в місці тріщини або прогару підсилюють за допомогою приварки накладок. Товщина накладки підсилення t_{yc} у місці наскрізного отвору зазвичай відповідає товщині стінки труби t_{mp} . При визначенні несучої здатності металевих димових труб з накладками велику роль відіграють зварні кутові шви, працездатність яких можна підвищувати за рахунок зростання значення коефіцієнта тріщиностійкості K_c і оптимального вибору параметрів накладок.

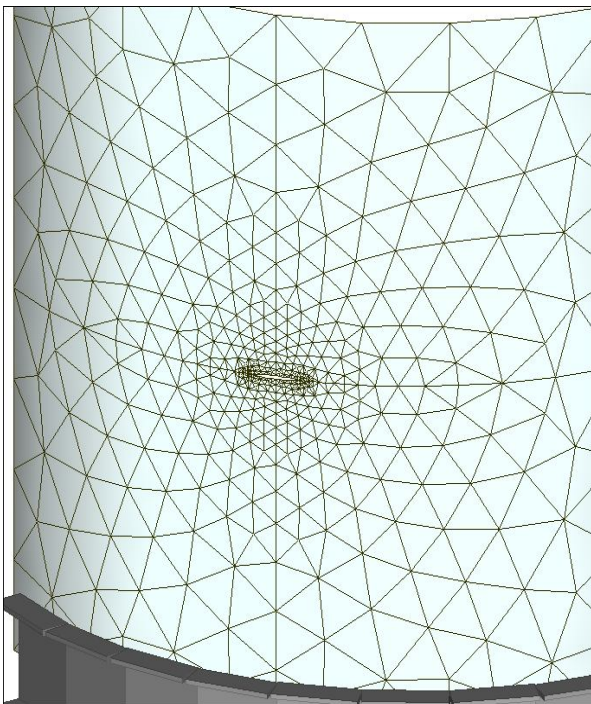


Рисунок 26 – Скінченноелементна модель з тріщиною у зварному шві

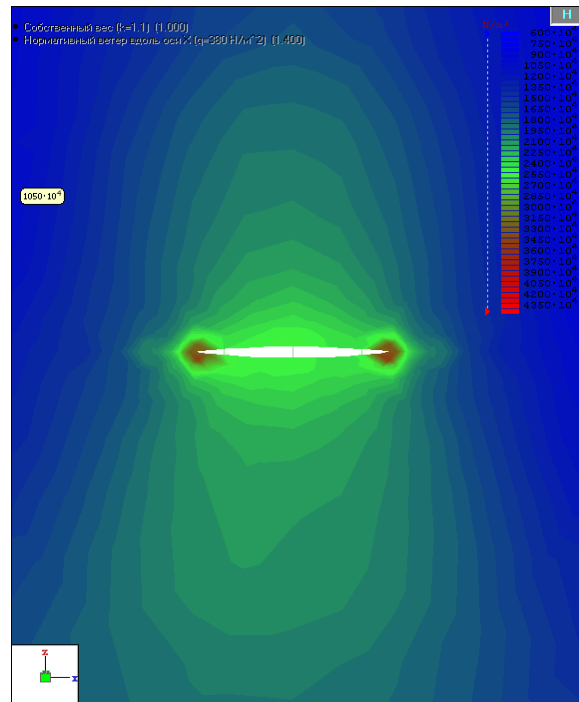


Рисунок 27 – Інтенсивність напружень навколо тріщини

Процес формування і системи зварних напружень при підсиленні стовбура димової труби шляхом приварювання накладки представлений на рис. 28. Працездатність зварних елементів визначається залишковими зварними напруженнями викликаними особливістю термодформаційного циклу зварювання і за величиною близькими до границі плинності.

Зварні напруження під час приварювання у місці підсилення накладки до димової труби виникають внаслідок локалізованих процесів нагрівання і охолодження – структурних перетворень металу.

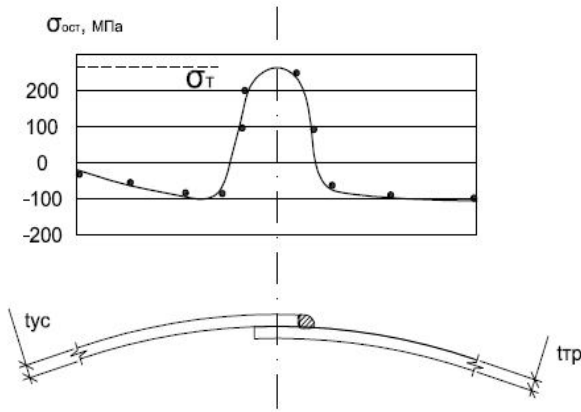


Рисунок 28 – Розподіл напружень при зварюванні накладних елементів

накладних елементів полягають у тому, що максимальні залишкові напруження реалізуються вздовж формування зварного шва. Досвід ремонтних робіт говорить про те, що найбільш небезпечними з точки зору працездатності є кільцеві шви. Рівень початкової пошкоджуваності димової труби, що ремонтується, визначається величиною відносного напруження – $\bar{\sigma}_0 = \sigma / \sigma_m$, де σ_m – границя плинності металу. В області концентраторів напружень рівень початкової напруженості $\bar{\sigma}_{ок}$ може бути більше α_σ разів: $\bar{\sigma} = \alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_0$, де α_σ – коефіцієнт концентрації напруження.

Розподіл зварних напружень у зоні кільцевих зварних з'єднань труб досить добре описується функцією:

$$\sigma_{зал} = \sigma_{зал}^{max} \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4}, \quad (27)$$

де $\xi = 2x/B$ – відносна координата; B – ширина активної зони.

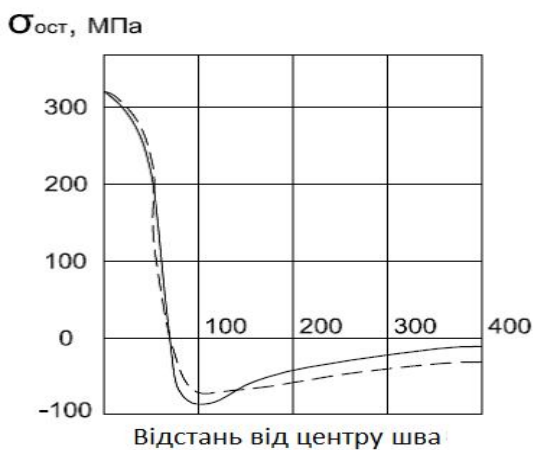


Рисунок 29 – Розподіл залишкових напружень до випробувань:

- теоретичні; -- - експериментальні

При зварюванні елементів градієнти температурних полів такі, що в них утворюються зварні залишкові напруження. При цьому максимальні залишкові напруження розтягу $\sigma_{зал}^{max}$ для маловуглецевих і низьколегованих сталей, які добре зварюються, реалізуються в центрі шва. Особливості термічного циклу приварювання

накладних елементів полягають у тому, що максимальні залишкові напруження реалізуються вздовж формування зварного шва. Досвід ремонтних робіт говорить про те, що найбільш небезпечними з точки зору працездатності є кільцеві шви. Рівень початкової пошкоджуваності димової труби, що ремонтується, визначається величиною відносного напруження – $\bar{\sigma}_0 = \sigma / \sigma_m$, де σ_m – границя плинності металу. В області концентраторів напружень рівень початкової напруженості $\bar{\sigma}_{ок}$ може бути більше α_σ разів: $\bar{\sigma} = \alpha_\sigma \cdot \bar{\sigma}_0$, де α_σ – коефіцієнт концентрації напруження.

Розподіл зварних напружень у зоні кільцевих зварних з'єднань труб досить добре описується функцією:

$$\sigma_{зал} = \sigma_{зал}^{max} \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4}, \quad (27)$$

де $\xi = 2x/B$ – відносна координата; B – ширина активної зони.

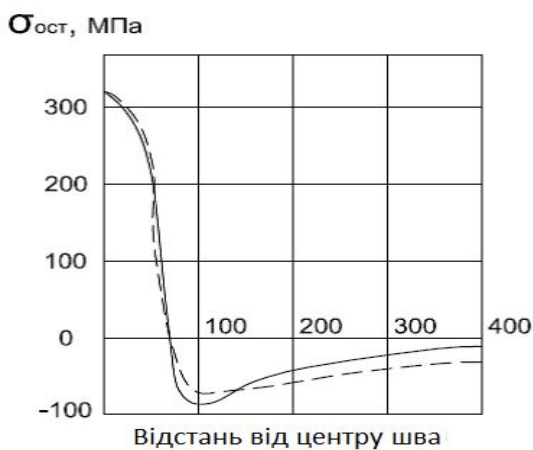


Рисунок 29 – Розподіл залишкових напружень до випробувань:

- теоретичні; -- - експериментальні

Експериментальні дані адекватно відповідають даним, отриманим за формулою (27), і представлені на рис. 29. В результаті підсумування внутрішніх термомеханічних і зовнішніх напружень від внутрішнього тиску при зварюванні напруженого металу залишкові напруження виявляються менше, ніж при зварюванні ненапружених елементів конструкцій. Також встановлено, що процес зменшення зварних напружень практично не

залежить від того, коли (до чи після) до елементу конструкції були прикладені зовнішні навантаження. Для оцінки залишкових напружень при приварюванні накладних елементів на основі виконаного аналізу підсумування внутрішніх і зовнішніх (активних) напружень отримано таку формулу:

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot K_{\epsilon} \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}_0^g \right) \left(\frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4} \right), \quad (28)$$

де g і γ – константи; $K_{\epsilon} = \sigma_T^{III} / \sigma_T$.

За відсутності концентраторів напружень залишкові напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot K_{\epsilon} \cdot \sigma_T \left(1 - \bar{\sigma}_0^g \right) \left(\frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4} \right). \quad (29)$$

З практики обстежень високих металевих димових труб, розташованих усередині металевої несучої вежі, встановлено, що втрата їхньої стійкості найчастіше відбувається через руйнування (або не проектного розташування) ковзних упорів, встановлених на робочих майданчиках вежі, які передають вітрове навантаження зі стовбура труби на несучу вежу (рис. 20, 30).

При виході з роботи ковзної опори на майданчику вежі розрахункова довжина труби (і як наслідок гнучкість) збільшується у 2 рази при регулярному розташуванні майданчиків по висоті. Як правило, при цьому стовбур труби втрачає прямолінійність і в місці опори, що не працює, упирається в балки робочого майданчика.

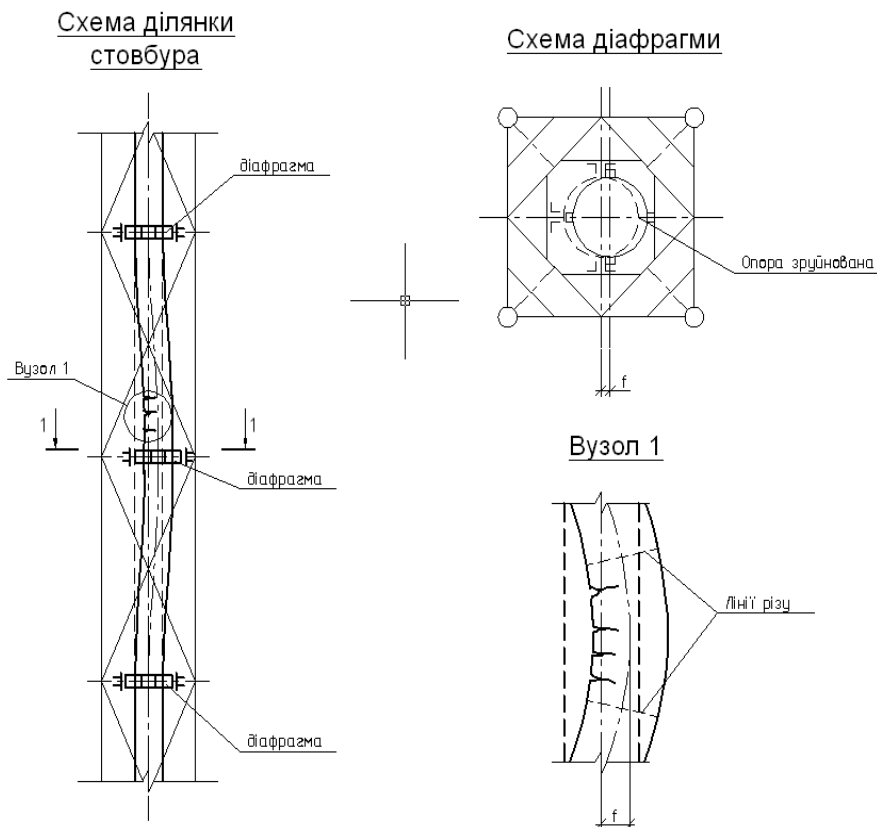


Рисунок 30 – Схема втрати стійкості димової труби всередині вежі

Вигин труби досягає великих значень, стовбур труби втрачає стійкість і з одного боку зминається «гофрою», що свідчить про розвиток в стиснутій ділянці пластичних деформацій. Якщо втрата стійкості має локальний характер, можливо вирізати цю ділянку і зварити нову обечайку стиковими швами з обробленням країв. При значній ділянці утрати стійкості стовбура труби (утворення гофр, тощо) ця ділянка

вирізається повністю. Підготовлюється нова ділянка труби для підсилення – оброблюються крайки існуючої труби і ділянки труби підсилення. Ділянки труби вирівнюються по осі і зварюються стиковими швами.

В залежності від технічного стану, категорії небезпеки виявлених дефектів, довговічності, необхідності виконання ремонтних робіт для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж запропоновано ввести три класи надійності – гарантований, граничний і незабезпечений (табл. 5).

Таблиця 5 – Категорії надійності роботи металевих димових труб та веж

№ п/п	Показники	Металеві димові труби та їх несучі вежі			
		нормальний (I)	задовільний (II)	непридатний до норм. експлуатації (III)	аварійний (VI)
1	Технічний стан				
2	Категорія небезпеки дефектів	«В»		«Б»	«А»
3	Довговічність τ , років	< 50 років		визначається розрахунком	вичерпана
4	Підсилення	не потрібне		потрібне	недоцільне
5	Клас надійності	гарантований		граничний	незабезпечений

Визначено фактичний економічний ефект впровадження конструктивних і технологічних рішень підсилення металевих димових і вентиляційних труб, визначення довговічності та залишкового ресурсу за розробленою методикою склав понад 2,5 млн. грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі виконано теоретичне узагальнення і вирішено важливу науково-технічну проблему забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж після тривалих термінів експлуатації з урахуванням розроблених і обґрунтованих методів визначення довговічності та залишкового ресурсу, способів забезпечення безпечної експлуатації та збереження. При цьому основними науковими і практичними результатами, висновками та рекомендаціями роботи є наступні:

1. Проведено аналіз конструктивних особливостей металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, матеріалів та умов експлуатації за весь життєвий цикл, аналіз наукових праць присвячених розробці методів розрахунку напружено-деформованого стану і оцінки надійності. Обґрунтовано актуальність, наукову і практичну цінність вибраного напрямку досліджень.

2. Виконано аналіз навантажень та впливів на металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі, визначені основні параметри силових, динамічних, корозійних, температурних та експлуатаційно-механічних впливів, їх взаємозв'язок за весь період експлуатації. Ґрунтуючись на дані численних натурних обстежень

були зроблені висновки: фактичні навантаження істотно відрізняються від проектних – постійні навантаження можуть зрости на 10% (ремонт, заміна елементів конструкцій); змінні довготривалі навантаження – до 20% (заміна устаткування, футеровки). Встановлено, що величини змінних короточасних навантажень істотно відрізняються від величин, визначених за попередніми нормами проектування: вітрових навантажень – на 30-40%; снігових навантажень – на 100% і більше. Враховуючи ці зміни при розрахунках за чинними нормами величини напружень в елементах і їх переміщення зміняться на 10-15%.

3. Отримав подальшого розвитку метод оцінки напружено-деформованого стану на основі рішення просторової задачі механіки твердого тіла під впливом стискуючих та згинаючих зусиль, проведено порівняльний аналіз розрахунків на пружність і стійкість елементів труб та веж, виконаний аналітичними методами та з використанням сучасних програмних комплексів (SCAD, ЛПА САПР, Selen-Result). Використання цих програмних комплексів при урахуванні просторової і сумісної роботи конструкцій, дозволяють знайти резерви несучої здатності до 7-10%.

4. Набули подальшого розвитку уявлення про основні закономірності багатоциклової і малоциклової пошкоджуваності металу конструкцій висотних споруд під дією динамічних навантажень з урахуванням втомної міцності.

5. Ґрунтуючись на результати натурних обстежень проведено аналіз утворення та розвитку пошкоджень від корозійних процесів під дією атмосферних впливів та продуктів згоряння з агресивними сірковмісними сполуками SO_2 і SO_3 , аналіз високотемпературних впливів на металеві димові труби без футеровки і на труби з локальним руйнуванням футеровки, аналіз розвитку деформаційного старіння після механічних впливів на різні елементи конструкцій димових труб.

6. 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 небезпеки основних типів дефектів і пошкоджень; встановлено гранично допустимі значення пошкоджень в залежності від категорії їх небезпеки і технічного стану конструкцій.

7. На основі фізико-статистичного підходу запропоновані методи оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.

8. Вперше розроблено метод визначення довговічності металевих димових труб і несучих веж з урахуванням домінуючої сумісної дії різних впливів – силового, корозійного, температурного і динамічного; методи визначення довговічності металевих димових труб при загальній втраті стійкості труби і з програмами у стінці, довговічності димових труб за критеріями механіки руйнування.

9. Вперше розроблено метод 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 (50 і більше років).

10. В залежності від технічного стану, категорії небезпеки виявлених дефектів, термінів експлуатації, необхідності виконання ремонтних робіт для металевих димових труб та їх несучих веж вперше запропоновано визначити три класи надійності – гарантований, граничний і незабезпечений.

11. Розроблені конструктивні і технологічні рішення підсилення металевих димових і вентиляційних труб, їх несучих веж з особливо небезпечними пошкодженнями: прогарами, тріщинами в основному металі і зварних швах, утратою загальної стійкості стовбура труби. Удосконалено спосіб урахування підсумовування силових та зварювальних напружень при різних варіантах підсилення димових труб.

12. Результати досліджень реалізовані більш ніж на 100 об'єктах будівництва з розробкою рекомендацій по збереженню споруд, по визначенню довговічності та залишковому ресурсу, по безпечній експлуатації, впровадженню конструктивних рішень щодо усунення пошкоджень на підставі запропонованих методів забезпечення надійності, що підтвердило їх ефективність у порівнянні з традиційними рішеннями. При цьому отримано загальний економічний ефект у розмірі понад 2,5 млн. грн. Теоретичні основи розрахунку і проектування металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, оцінка їх надійності впроваджені при підготовці спеціалістів та магістрів за напрямком «Будівництво» спеціальності «Промислове та цивільне будівництво». Результати дисертаційної роботи використані при розробці стандарту асоціації СА-03-006-08 «Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений» (2008 р.), стандарту саморегулюючої організації СТО СРО ЕТМП-03-2016 «Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб», а також при розробці нормативного документу ДБН В.2.6-98-2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основи проектування».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Яровой С.Н. Исследование несущей способности натуральных стальных сварных колонн / В.М. Горпинченко, В.М. Барышев, В.Г. Искендеров, А.Я. Дривинг, М.И. Гукова, С.Н. Яровой // Тези доповідей на міжнародній науковій конференції «Зварні конструкції». – Київ, ІЄЗ ім. Б.О. Патона, 1990. – С. 24-25.

2. Яровой С.Н. Постановка задачи оценки напряженно-деформированного состояния металлических дымовых труб с оттяжками / Ю.Н. Яровой, А.А. Мозговой, А.И. Донцов, С.Н. Яровой, В.В. Попов // Научно-практический журнал «Новини науки Придніпров'я». – Дніпропетровськ: Дніпро-VAL, 2004. – Вип. 4. – С. 91-94.

3. Яровой С.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния вантовых оттяжек металлических дымовых труб при смещении опор и температурном воздействии / Ю.Н. Яровой, А.А. Мозговой, Ю.А. Витовский, С.Н. Яровой // Вісник

Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка: ДонНАБА, 2005. – Вип. 8 (56). – С. 3-8.

4. Яровой С.Н. Предельные значения основных дефектов и повреждений при определении категоричности технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб / С.Н. Яровой, Ю.Н. Яровой, Е.Ю. Дорофеев // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2007. – Вип. 43. – С. 592-598.

5. Яровой С.Н. Расчет колонн каркаса промышленного здания с учетом совместной работы в составе поперечника / С.Н. Яровой, А.И. Горовый, Е.Ю. Дорофеев // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2010. – Вип. 56. – С. 647-650.

6. Яровой С.Н. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО «Тагмет» / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, М.И. Фарфель, С.Н. Яровой // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2012. – Вип. 65. – С. 689-693.

7. Яровой С.Н. Промышленная безопасность металлических дымовых труб компрессорных станций магистрального газопровода после длительного периода эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый, Е.Ю. Дорофеев // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2013. – Вип. 69. – С. 619-622.

8. Яровой С.Н. Резервы несущей способности металлических дымовых труб турбоагрегатов компрессорных станций «Заднепровская», «Кировоградская» и «Южнобугская» магистрального газопровода «Кременчуг-Ананьев-Черновцы-Богородчаны» после длительного периода эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 73. – С. 225-230.

9. Яровой С.Н. Восстановление эксплуатационной пригодности железобетонной дымовой трубы высотой 120 м печей П-601и П602 технологической установки 35/11 ОАО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» в г. Кстово Нижегородской области после взрыва газа в трубе / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. – Вип. 2 (76). – С. 56-58.

10. Яровой С.Н. Надежность и живучесть металлической башни на крыше здания Госпром после длительного срока эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Вип. 2(80). – С. 90-92.

11. Яровой С.Н. Проблемы надежности и причины обрушения металлических конструкций технологической эстакады под факельные трубопроводы комплекса риформинга ОАО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» / С.Н. Яровой, Е.Ю. Дорофеев // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. – Вип. 3(81). – С. 22-25.

12. Яровой С.Н. Надежность и эксплуатационная пригодность металлических дымовых труб печей мартеновского и энергетических цехов ОАО «Тагмет» после длительного срока эксплуатации / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Збірник наукових

праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2016. – Вип. 91. – С. 161-167.

13. Яровой С.Н. Эксплуатационная пригодность и надежность конструкций покрытия тренировочного катка Дворца спорта в городе Харькове после длительного срока эксплуатации / С.Н. Яровой // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. – Вип. 1 (87). – С. 107-112. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Google Scholar, Crossref).

14. Яровой С.Н. Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла и предельные значения основных дефектов и повреждений / С.Н. Яровой, Х.М. Ханухов // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2017. – Вип. 99. – С. 218-227.

15. Яровой С.Н. Долговечность и остаточный ресурс металлических дымовых труб с учетом температурного и коррозионного воздействия / С.Н. Яровой // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. – Вип. 2 (88). – С. 110-114. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Google Scholar, Crossref).

16. Яровой С.Н. Предельные значения дефектов и повреждений металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен / С.Н. Яровой, Х.М. Ханухов // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2018. – Вип.1 (91). – С. 122-129. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази Google Scholar, Crossref).

Статті у зарубіжних наукових виданнях

17. Яровой С.Н. Резервы несущей способности сжато-изгибаемых колонн / В.М. Горпинченко, М.И. Гукова, В.Г. Искендеров, С.Н. Яровой // Монография «Металлические конструкции. Работы школы Н.С. Стрелецкого». – Москва, МГСУ, 1995. – С. 104-112.

18. Яровой С.Н. Покрытие большой спортивной арены стадиона «Лужники» г. Москва / В.В. Алешин, Ю.М. Лужков, В.М. Горпинченко, С.Н. Яровой и др. // Монография – Москва: Форте, 1998. – С. 102-104.

19. Яровой С.Н. Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений / Х.М. Ханухов, И.И. Симонов, В.А. Мошков, С.Н. Яровой и др. // Ассоциация «Ростехэкспертиза», «Научно-промышленный союз «РИСКО», НПК «Изотермик». – М., 2008. – 236 с.

20. Яровой С.Н. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО «Тагмет» / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, М.И. Фарфель, Д.В. Кондрашов, С.Н. Яровой // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений». – Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2013. – №1. – С. 58-64. (Видання включено до наукометричної бази РІНЦ).

21. Яровой С.Н. Надежность и живучесть металлических дымовых труб компрессорных станций магистрального газопровода «Кременчуг–Ананьев–Черновцы–Богородчаны» после длительного периода эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Сборник докладов научно-практической конференции,

посвященной 100-летию со дня рождения профессора Е.И. Беленя, «Расчет и проектирование металлических конструкций». – Москва, МГСУ, 2013. – С. 251-256.

22. Яровой С.Н. Надежность и эксплуатационная пригодность металлической телевизионной башни на крыше здания Госпром в городе Харькове после длительного срока эксплуатации / С.Н. Яровой, Е.Ю. Дорофеев // Материалы VI международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2015. – С. 196-204.

23. Яровой С.Н. Сложные варианты усиления стропильных ферм конструкций покрытия производственных зданий / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, М.И. Фарфель, Д.Ю. Коняшин, С.Н. Яровой // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений». – Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2016. - №1. – С. 58-64. (*Видання включено до наукометричної бази РИНЦ*).

24. Яровой С.Н. Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб / Х.М. Ханухов, И.И. Симонов, В.А. Якушин, А.В. Алипов, С.Н. Яровой и др. // Стандарты саморегулируемой организации. СТО СРО ЭТМП -03-2016. – Москва, 2016. – 68 с.

25. Яровой С.Н. Эксплуатационная пригодность и надежность металлических дымовых труб после длительного срока эксплуатации / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, С.Н. Яровой, Д.Ю. Коняшин // Материалы VII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2016. – С. 70-81.

26. Яровой С.Н. Эксплуатационная пригодность металлических дымовых труб печей цеха №1 ОАО «Тагмет» после длительного срока эксплуатации / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, С.Н. Яровой // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений». – Москва, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2016. – №2. – С. 7-12. (*Видання включено до наукометричної бази РИНЦ*).

27. Яровой С.Н. Обследования металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен // Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2017. – С. 222-231.

28. Yarovoi S. Regulation as alternative to spontaneous city development / S. Yarovoi, H. Monclus // European project 530197-Tempus-1-2012-1-IT -TEMPUS-JPCR “SEHUD“ «Architectural and sustainable development based on eco-humanistic principles and advanced technologies without losing identity». Monograph – Kharkiv, Brussels: HNUCA, 2015. – 120 p.

29. Yarovoi Serhey. Regulation of Development of the City // Monograph – Lambert Academic Publishing, Saarbucken, 2017. – 60 p.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

30. Яровой С.Н. Надежность и долговечность висячих вантовых большепролетных конструкций покрытия общественных зданий после длительного периода эксплуатации / С.Н. Яровой, В.И. Петров, А.И. Горовый, А.И. Воронежский, Е.Ю. Дорофеев // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2006. – Вип. 37. – С. 565-571.

31. Яровой С.Н. Усиление и ремонт предаварийного участка большепролетного покрытия сборочного корпуса самолетов Харьковского авиационного предприятия в условиях действующего производства / С.Н. Яровой, В.И. Петров, А.И. Горовый, Е.Ю. Дорофеев // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2008. – Вип. 47. – С. 725-728.

32. Яровой С.Н. О проблемах реконструкции и причинах обрушения части шестиэтажного административного корпуса института «Гипроцемент» в г. Харькове / С.Н. Яровой, А.И. Удовиченко, А.И. Горовый // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – Вип. 65. – С.150-153.

33. Яровой С.Н. Надежность и живучесть железобетонной дымовой трубы высотой 120 м печей П-601 и П-602 технологической установки 35/11 после взрыва газа в стволе трубы на ОАО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» г. Кстово Нижегородской области / С.Н. Яровой, А.И. Горовый, Е.Ю. Дорофеев, А.Б. Сорокин // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2014. – Вип. 77. – С. 243-247.

34. Яровой С.Н. Эксплуатационная пригодность и надежность металлической башни на крыше здания Госпром в городе Харькове после длительного срока эксплуатации / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2015. – Вип. 82. – С. 237-242.

35. Яровой С.Н. Особенности работы и расчета трех металлических дымовых труб стоящих в ряд на небольшом расстоянии друг от друга и установленных на общем железобетонном фундаменте / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Матеріали міжнародної науко-практичної конференції «Ефективні технологічні рішення в будівництві з використанням бетонів нового покоління». – Харків, ХНУБА, 2015. – С. 146-153.

36. Яровой С.Н. Промышленная безопасность металлических дымовых труб трубокатного цеха №1 ОАО «Таганрогский металлургический завод» / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2016. – Вип. 87. – С. 131-136.

37. Яровой С.Н. Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла, предельные значения основных дефектов и повреждений // Тези доповідей на міжнародній конференції ХНУБА. – Харків: ХНБА, 2017. – С. 6.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

38. Яровой С.Н. Восстановление строительных конструкций после пожара на Керченском металлургическом комбинате им. Войкова / В.И. Петров, С.Н. Яровой, Г.М. Беседин, И.Н. Жуковский // Збірник наукових праць «Аварії на будівлях та спорудах та їх попередження». – Київ, НДІБК, 1999. – Вип.51. – С. 440-441.

39. Яровой С.Н. Оценка технического состояния конструкций каркаса главного корпуса фабрики окомкования ЦПО-20 «Сев. ГОК» в г. Кривой Рог /

А.В. Колесник, В.И. Петров, С.Н. Яровой // Збірник наукових праць «Реконструкція будівель та споруд». – Київ, НДІБК, 2001. – Вип. 54. – С. 332-335.

40. Яровой С.Н. Руководящий документ по экспертизе промышленной безопасности – «Инструкция по техническому обследованию железобетонных резервуаров для нефти и нефтепродуктов» РД03-420-01 / Е.Ю. Дорофеев, С.Н. Яровой, А.А. Тытюк // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2005. – Вип. 35 ч.1. – С. 198-203.

41. Яровой С.Н. Контроль качества бетона при возведении монолитных бетонных и железобетонных конструкций / С.Н. Яровой, В.И. Петров, Г.М. Ширшова, А.И. Горючий // Збірник наукових праць «Товарний бетон. Нові можливості в будівельних технологіях». – Харків: Медіаполіс, 2008. – С. 179-183.

42. Яровой С.Н. Несущая способность элементов крепления навесных фасадов жилых и общественных зданий / С.Н. Яровой, А.И. Горючий, Е.Ю. Дорофеев, А.Б. Сорокин // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2009. – Вип. 50. – С. 649-654.

43. Яровой С.Н. О проблемах реконструкции и причинах обрушения части шестиэтажного административного корпуса института «Гипроцемент» и колоннады главного входа здания VIP-терминала аэропорта в городе Харькове /С.Н. Яровой, А.И. Горючий, Е.Ю. Дорофеев, А.Р. Грик // Збірник наукових праць «Будівництво, матеріалознавство, машинобудування». – Дніпропетровськ, ПДАБА, 2011. – Вип. 61. – С. 517-521.

44. Яровой С.Н. Техническое состояние несущих строительных конструкций и реконструкция 9-ти этажного жилого дома по улице Петра Слинька в городе Харькове после взрыва в квартире бытового газа / С.Н. Яровой, А.С. Удовиченко, А.И. Горючий // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 71. – С. 117-120.

45. Яровой С.Н. Исчерпание несущей способности металлических ферм пролетных строений транспортной галереи углеподготовительного цеха ПАО «Алчевский металлургический завод» после длительного срока эксплуатации в условиях сильно агрессивной среды // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Вип. 1(83). – С. 72-76.

46. Яровой С.Н. Эксплуатационная пригодность и надежность металлических дымовых труб секционных печей трубопрокатного цеха №1 ОАО «Таганрогский металлургический завод» после 50-ти летнего срока эксплуатации // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Вип. 2 (84). – С. 231-235.

47. Яровой С.Н. Оценка технического состояния металлических дымовых труб ОАО «Таганрогский металлургический завод» после длительного срока эксплуатации // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Вип. 3 (85). – С. 103-108.

48. Яровой С.Н. Надежность и эксплуатационная пригодность большепролетного покрытия Дворца спорта в городе Харькове после длительного срока эксплуатации // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Вип. 4 (86). – С.103-107.

АНОТАЦІЯ

Яровий С.М. Надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (19 - Архітектура та будівництво). – Харківський національний університет будівництва та архітектури; Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2018.

Дисертацію присвячено проблемі забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж з урахуванням силових, динамічних, корозійних, температурних і експлуатаційних впливів протягом тривалого терміну експлуатації. В рамках роботи виконані багаточисельні натурні обстеження металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, лабораторні та теоретичні дослідження їх роботи, розроблені і обґрунтовані способи і методики визначення надійності, довговічності та залишкового ресурсу, забезпечення безпечної експлуатації та збереження.

Розроблено типологію дефектів і пошкоджень металевих димових труб та їх несучих веж, футеровки димових труб, 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 небезпеки технічного стану.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці стандарту асоціації СА-03-006-08 «Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений» (2008 р.), стандарту саморегулюючої організації СТО СРО ЕТМП-03-2016 «Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб», а також при розробці нормативного документу ДБН В.2.6-98-2009 «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основи проектування». Загальний економічний ефект від впровадження результатів роботи складає понад 2,5 млн. грн.

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

АННОТАЦИЯ

Яровой С.Н. Надежность металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» (19 Архитектура и строительство). – Харьковский национальный университет строительства и архитектуры; Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» Министерства образования и науки Украины, Днепр, 2018.

Диссертация посвящена проблеме обеспечения надежности металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен с учетом силовых, динамических, коррозионных, температурных и эксплуатационных воздействий на протяжении длительного срока эксплуатации.

В рамках работы выполнены многочисленные натурные обследования металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен, лабораторные и теоретические исследования работы конструкций.

Проанализированы существующие подходы, методы и методики определения надежности металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен, проведен анализ научных работ по надежности высотных сооружений, конструктивных особенностей, материалов и условий эксплуатации за весь жизненный цикл.

На основе данных натурных обследований уточнены и проанализированы различные нагрузки и воздействия на металлические дымовые и вентиляционные трубы и их несущие башни за длительный период эксплуатации, определены основные параметры силовых, динамических, коррозионных, температурных и эксплуатационно-механических воздействий, установлена их взаимосвязь в течение жизненного цикла.

Проведен сравнительный анализ расчетов на упругость и устойчивость элементов труб и башен аналитическими методами и расчетами современными программными комплексами (SCAD, Лира САПР, Selena-Result) с учетом пространственной и совместной работы трубы и башни.

Основываясь на результаты натурных обследований, аналитических и численных исследований получил дальнейшее развитие метод учета действия ветровых нагрузок на металлические дымовые трубы и их несущие башни, определены закономерности многоцикловой и малоцикловой повреждаемости металла конструкций, проведен анализ образования и развития повреждений от коррозионных процессов и высокотемпературных воздействий.

Разработан метод определения долговечности металлических дымовых труб и их несущих башен с учетом совместного действия силовых, коррозионных, температурных и динамических воздействий позволяет описывать кинетику изменения напряженного состояния и определять время до наступления предельного состояния элементов. Разработан метод определения остаточного ресурса металлических дымовых и вентиляционных труб с учетом повреждений и срока эксплуатации.

Разработан метод учета суммирования силовых и сварочных напряжений при различных вариантах усиления дымовых труб, предложены конструктивные и технологические решения усиления металлических дымовых и вентиляционных труб и их несущих башен с особо опасными повреждениями.

Результаты диссертационной работы использованы при разработке стандарта ассоциации СА-03-006-08 «Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений» (2008 г.), стандарта саморегулируемой организации СТО СРО ЭТПП-03-2016 «Методика обследования технического состояния промышленных дымовых труб и вентиляционных труб», а также при

разработке нормативного документа: ДБН В.2.6-98-2009 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основы проектирования». Общий экономический эффект от внедрения результатов работы составил более 2,5 млн. грн.

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

SUMMARY

Yaroviy S.M. Reliability of metal smoke and vent tubes and their load-bearing towers. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences by specialty 05.23.01 «Building Constructions, Buildings and Structures» (19 - Architecture and Construction). – Kharkiv National University of Construction and Architecture; SIHE "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2018.

Thesis is devoted to ensuring the reliability of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers taking into account power, dynamic, corrosion, temperature and operational influences over a long period of the operation.

In the framework of the work, numerous natural examinations of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers, laboratory and theoretical researches of their work have been performed, methods and methods for determining the durability and leaving the resource, ensuring safe operation and conservation have been developed and substantiated.

Based on data of field surveys, analytical and numerical studies have further developed the consideration of the effect of wind loads on metal chimneys and bearing towers, the determination of patterns of multi-cycle and small-scale damage to metal constructions, an analysis of the formation and development of damage from corrosion processes and high-temperature influences, development of deformation aging.

A typology of defects and damage to metal chimneys and bearing towers, lining of chimneys has been developed, a statistical estimation of the magnitudes and nature of damages has been made, the definition of the category of danger of the main types of defects and damage has been improved, the maximum permissible values of damage are determined depending on categories of danger and technical condition.

The results of the work were used in the development of the association standard CA-03-006-08 "Methodological instructions for technical maintenance, repair, inspection, industrial safety analysis of industrial buildings and structures" (2008), the standard of self-regulatory organization SRT SRO ETMP-3-2016 "Technique of examination of technical condition of industrial chimneys and ventilation pipes", as well as in the development of a regulatory document: ДБН В.2.6-98-2009 "Concrete and reinforced concrete structures. Basics of designing", and the total economic effect from the introduction of the results of work is more than 2.5 million UAN.

Keywords: metal smoke and ventilation pipes, bearing towers, reliability, loads, impacts, damages, stresses, deformations, durability, residual life.

Здано на складання 11.02.2019. Підписано до друку 11.02.2019. Формат 60x90/16. Папір офсетний. Друк ризографічний. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 1,34. Обл.-вид. арк. 2,14. Тираж 100 прим. Зам. № 219_20

Видавництво «*Літограф*»
Ідентифікатор видавця у системі ISBN: 2267
Адреса видавництва та друкарні:
49000, м. Дніпро, вул. ім. М.В. Гоголя, 10/а
тел. : (066) 369-21-55, (097) 841-92-84
E-mail: Litograf.dp@gmail.com