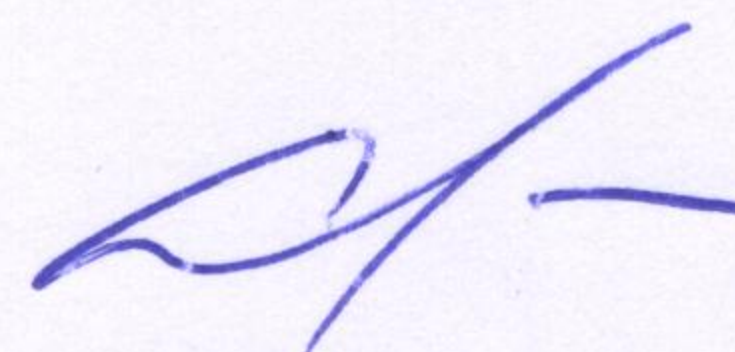


Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет будівництва та архітектури
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЯРОВИЙ Сергій Миколайович



УДК 628.014:624.046.2

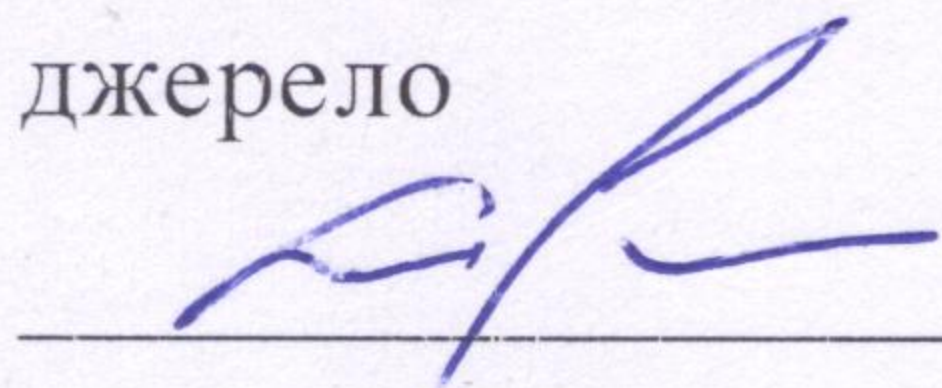
ДИСЕРТАЦІЯ
НАДІЙНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ
ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди
спеціальність

19 – архітектура та будівництво
галузь знань

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



С.М. Яровий

Науковий консультант – Фурсов В. В., доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2018

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.

Багато промислових підприємств металургійної, гірничорудної, хімічної, енергетичної промисловості побудовані в 50-80-ті роки ХХ століття й експлуатуються до теперішнього часу. Димові та вентиляційні труби є кінцевою ланкою важливих технологічних процесів цих промислових підприємств, і вихід їх із експлуатації, як правило, призводить до зупинки всього технологічного процесу, виробництва та великих фінансових збитків.

Велика кількість димових та вентиляційних труб промислових підприємств працюють протягом 50-70 років, у той час як розрахунковий термін – 50 років. У міру збільшення термінів експлуатації все гостріше постає питання надійності та безпечної експлуатації цих висотних споруд.

Зараз на промислових підприємствах України експлуатуються понад три тисячі металевих димових та вентиляційних труб і близько тисячі металевих несучих веж.

Від початку металеві та вентиляційні труби слугували лише для створення тяги для забезпечення необхідного режиму горіння та вентиляції, що дозволяло обмежуватися трубами невеликої висоти. Далі з розвитком промисловості виникли більш суворі вимоги щодо захисту навколишнього середовища від викидів шкідливих промислових залишків до атмосфери. Для зниження негативного впливу димових та вентиляційних газів на стан повітряного басейну почали використовувати виведення попередньо

очищених газів від промислових підприємств на велику висоту. Для забезпечення надійності та стійкості високих димових та вентиляційних труб навколо них почали будувати металеві вежі. Останні сприймають більшість навантажень, які діють на труби.

За час експлуатації відбувається накопичення дефектів та пошкоджень, які з'являються через динамічний вітровий вплив, агресивні компоненти робочого середовища, високотемпературні, експлуатаційні та механічні впливи. При утворенні значних дефектів та пошкоджень відбувається інтенсифікація руйнування металевих димових труб та несучих веж. Це може призвести до тяжких наслідків для виробництва та персоналу, життєзабезпечення населення та територій у випадку вимкнення життєво важливих підприємств.

Оцінка технічного стану конструкцій металевих труб і несучих веж та споруд в цілому після тривалих термінів експлуатації, і на основі отриманих даних забезпечення надійності та безпечної експлуатації є актуальним завданням. Аналіз отриманих даних дає можливість регулювання технічного стану металевих димових труб і вентиляційних труб, їх несучих веж та забезпечення подальшої безпечної експлуатації.

У роботі проаналізовано загальні характеристики металевих димових і вентиляційних труб та їхніх несучих веж за різними конструктивними, геометричними та технологічними ознаками, окреслено коло висотних споруд для дослідження.

Промислові металеві труби поділяються на димові та вентиляційні. Димові труби передбачені для відведення димових газів від згорання в агрегатах вогняних технологій (котлах, печах тощо). Вентиляційні труби передбачені для відведення шкідливих газоповітряних сумішей, які утворюються при технологічних процесах в реакторах, апаратах та установках хімічної промисловості.

Стволи металевих та вентиляційних труб являють собою порожній циліндр (або конус), змонтований з окремих елементів або царг.

Для скріплення царг або елементів між собою передбачають фланцеві з'єднання або стикову зварку. Фланцеві з'єднання кращі за зварні з точки зору монтажу, але більш схильні до утворення тріщин через крайовий ефект у місці сполучення царги з фланцем, де виникають значні напруження внаслідок коливання труби при вітрових навантаженнях. Аналіз даних обстежень свідчить, що в місцях зварних або фланцевих з'єднань елементів сконцентрована найбільша кількість пошкоджень.

За високих температур газів, що відводяться, використовують футеровку зі штучних керамічних виробів (для невисоких труб) або двошарову комбіновану футеровку.

Проведений аналіз матеріалів, з яких виготовляються металеві димові труби, показав, що для їх виготовлення традиційно використовуються маловуглецеві сталі ВСт3сп5 і ВСт3пс6, які мають задовільну корозійну стійкість у сухих сірчистих газах з температурою до 100⁰С, в окислах азоту та сухому хлорі – за температур до 200⁰С, при високотемпературному сухому режимі – за температури димових газів не більше 300⁰С. При температурах димових газів понад 300⁰С та високій корозійній агресії металеві димові труби виробляються з високолегованих сталей – корозійностійких сталей О8Х22Н6Т, 10Х17Н13М2Т та жаротривких сталей 12Х18Н9Т і О8Х18Н10Т. Для виготовлення несучих елементів веж використовують маловуглецеві сталі – ВСт3сп5 і ВСт3пс6, низьковуглецеві сталі – 09Г2С, 10ХСНД та інші.

У роботі розглянуті особливості постійних навантажень (власна вага), змінних довготривалих навантажень (вага теплоізоляції та протикорозійного покриття, тиск газів, що відводяться, вага конденсату та пилу), змінних короткотривалих навантажень (ожеледно-вітрових, снігових, температурних навантажень при запуску та зупинці, монтажних навантажень, вага людей). Особливу увагу приділено вітровим навантаженням, які найбільш суттєво впливають на пружно-деформаційний стан несучих елементів металевих димових труб та їх несучих веж. Розглянуто роботу димової труби, що стоїть окремо, та декількох димових труб при ламінарному та турбулентному

обтіканні, гнучких просторових конструкцій веж, які мають фіксовані точки відриву, що може викликати галопуванні.

У роботі розглянуто напружено-деформований стан елементів димових труб та елементів трубчатого перерізу несучих веж під дією стискаючих по торцях та згинаючих навантажень у системі циліндричних координат з використанням методу розв'язання просторової задачі механіки твердого тіла. Для цього запропоновані способи побудови основного (σ_0) і коригуючого (σ_k) тензора напружень для пружно-пластичних елементів димових труб та несучих веж, та циліндричного тензора у вигляді їх суми (σ).

Проведено аналіз сучасних аналітичних методів розрахунку на міцність та стійкість циліндричних та конічних ділянок труб під дією стиснення, згинальних моментів і навантажень, які діють нормально до осі труби, та методів з використанням різноманітних програмних комплексів (SCAD, Selena-Result, Ліра, ANSYS), а також проведено порівняльний аналіз отриманих результатів.

У роботі розглянуто закономірності багатоциклової та малоциклової пошкоджуваності від динамічних впливів на висотні споруди з урахуванням пружного стану цих елементів. Підтверджено існування лінійної емпіричної залежності між критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень КІН K_{IC} і циклічним напруженням КІН K_{fC} .

Здійснено оцінку втомної міцності і довговічності металу димових труб на основі кінетичної діаграми втомного руйнування з використанням методики, що описує швидкість росту втомних тріщин (від $l_{поч}$ до $l_{кін}$) для металевих труб та кількість циклів N напруження для розвитку тріщини. Запропоновано формули для розрахунку швидкості розвитку тріщин з урахуванням різних коефіцієнтів інтенсивності напружень.

У роботі проведено аналіз виникнення і розвитку пошкоджень від корозійних і температурних впливів. Проведена оцінка деформаційного старіння металевих димових труб після механічних впливів при виготовленні та експлуатації.

На підставі матеріалів численних обстежень проведено аналіз пошкоджень у зварних швах та основному металі димових труб і елементів несучих веж та їх розвиток.

У роботі на основі цих обстежень визначені основні типи дефектів та пошкоджень металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж, виконано їх класифікацію за характером та за значеннями величин пошкоджень. Проведено аналіз пошкоджуваності металевих димових труб та футеровки для кожного типу дефектів та пошкоджень. Також виконано аналіз пошкоджуваності елементів металевих несучих веж залежно від їх поперечного перерізу.

Усі основні дефекти та пошкодження металевих димових труб та їх несучих веж кваліфіковані залежно від категорії небезпеки, від виду та розташування, від імовірних причин виникнення. Визначено методи виявлення або прикмети виникнення дефектів та пошкоджень, запропоновано заходи з попередження їх подальшого розвитку.

На основі аналізу виявлених дефектів та пошкоджень металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж визначено їхні гранично допустимі значення залежно від категорії небезпеки і технічного стану конструкцій.

У роботі отримано кінетичне рівняння пошкоджуваності металевих димових труб та несучих веж з урахуванням механічних напружень, корозійних та температурних впливів. Отримано аналітичні залежності для визначення довговічності металевих димових труб з урахуванням різноманітних впливів, які дозволяють описувати кінетику мінливості пружного стану і визначати час до настання граничного стану елементів висотних споруд. Також застосовані методи визначення довговічності металевих димових труб та несучих веж за критеріями механіки руйнування.

Розроблено методи оцінки залишкового ресурсу несучих елементів висотних споруд з різноманітними пошкодженнями, виявленими при діагностуванні. Надані формули визначення залишкового ресурсу металевих

димових труб, визначені фактичні резерви залишкового ресурсу після тривалих термінів експлуатації для конкретних споруд.

У роботі розроблено та обґрунтовано варіанти підсилення елементів димових труб та несучих веж з найбільш небезпечними пошкодженнями (категорія А) – прогарами, тріщинами в основному металі та зварних швах, втратою загальної стійкості ствола труби. На основі аналізу і підсумування внутрішніх та зовнішніх напружень отримані формули розрахунку напружено-деформованого стану металевих димових труб у зоні наскрізних тріщин та отворів при виконанні робіт щодо підсилення конструкцій за допомогою приварювання накладок.

Надано варіанти підсилення димових труб після руйнування упорів веж, які сприймають вітрові навантаження, і, як наслідок, втрати загальної стійкості труби.

Результати досліджень дають змогу оцінити надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж після тривалих термінів експлуатації, а також можуть бути використані для розробки нормативних документів при оцінюванні технічного стану та залишкового ресурсу висотних споруд.

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

ABSTRACT

Yarovij S.M. Reliability of Metal Smoke and Ventilation Pipes and their Bearing Towers. – Qualifying Scientific Paper. Manuscript.

Thesis for a Doctor of Technical Sciences Degree in specialty 05.23.01 "Building Structures, Buildings and Structures". (19 – Architecture and construction). – Kharkiv National University of Construction and Architecture, Kharkiv; State Higher Educational Institution "Prydniprovsk State Academy of

Civil Engineering and Architecture", Dnipro; Ministry of Education and Science of Ukraine, 2018.

Many industrial enterprises of the metallurgical, mining, chemical, and energy industries were built in the 50's and 80's of the twentieth century and are being exploited to the present. Smoke and ventilation pipes are the final chain of important technological processes of these industrial enterprises and their output from operation, as a rule, leads to the stop of the entire technological process, stopping production and large financial losses.

A large number of smoke and ventilation pipes of industrial enterprises operate during 50-70 years, at the estimated time of 50 years. As the lifetime is increased, the issue of reliability and safe operation of these high-rise buildings is all the more acute.

Now more than three thousand metal smoke and ventilating pipes, and about a thousand metal bearing towers are exploited in the industrial enterprises of Ukraine.

From the beginning, metal and ventilation pipes served only to create a traction to provide the necessary mode of combustion and ventilation, which allowed to be limited to pipes of a small height. Subsequently, with the development of the industry, there were more stringent requirements for the protection of the environment from emissions to the atmosphere of harmful industrial residues. To reduce the negative impact of smoke and ventilation gases on the condition of the air basin, the use of pre-treated gases from industrial plants to a high altitude began to be used. In order to ensure the reliability and durability of high smoke and ventilation pipes, metal towers were built around the pipes. Metal towers perceive most of the loads that affect the pipes.

An assessment of the technical condition of the structures of metal pipes and bearing towers, and of the buildings as a whole, after long periods of operation of the time, and on the basis of the data obtained, reliability and safe operation is an urgent task. The analysis of the obtained data makes it possible to regulate

the technical condition of metal chimneys and ventilation pipes, their bearing towers and to ensure further safe operation.

The paper analyzes the general characteristics of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers on various structural, geometric and technological features, and outlines a circle of high-rise buildings for research.

Industrial metal pipes are divided into smoke and ventilation. Smoke pipes are provided for the removal of flue gases from combustion in units of fire technologies (boilers, furnaces, etc.). Ventilation pipes are intended for removal of harmful gas-air mixtures which are formed at technological processes in reactors, apparatuses and installations of the chemical industry.

The trunks of the metal and vent pipes are an empty cylinder (or cone), mounted from individual elements or the king. For mounting the king or elements between them assume flange joints or joint welding. Flanged joints are better welded in terms of mounting, but are more prone to cracking due to the edge effect at the site of the conjugation of the king with a flange, where there are significant stresses due to fluctuations of the pipe at wind loads. Analysis of the survey data indicates that the welded or flanged joints of the elements are concentrated in the largest number of damages.

At high temperatures, the lining is dispensed from artificial ceramic products (for low pipes) or two layers of combined lining.

The analysis of materials from which metal chimneys is made have shown that they are traditionally used for the low carbon steels VSt3sp5 and VSt3pS6, which have a satisfactory corrosion resistance in dry sulfur gases with a temperature of up to 1000°C , in nitrogen oxides and dry chlorine – at temperatures up to 2000°C , at high temperature dry conditions – at a temperature of flue gases no more than 3000°C . At temperatures of flue gases above 3000°C and high corrosion aggression, metal chimneys are made of high-alloy steels corrosion resistant steels O8X22N6T, 10X17H13M2T and heat resistant steels 12X18H9T and O8X18H10T. To make load-bearing elements of

the towers are used little carbon steel – VSt3sp5 and VSt3ps6, low carbon steel – 09G2S, 10CHSND and others.

The work considers the features of constant loads (own weight), the variables of long-term loads (the weight of thermal insulation and corrosion coating, the pressure of discharged gases, the weight of condensate and dust), the variables of short-term loads (ice-wind and snow, temperature loads at start-up and stop, mounting loads, weight of people). Particular attention is paid to the wind load, which most significantly affect the elastic-deformation state of the bearing elements of metal chimneys and their bearing towers. The work of stand-alone and several smoke pipes under laminar and turbulent flow, flexible spatial structures of towers that have fixed points of separation that can cause galloping are considered.

The stress-deformation state of the elements of the chimneys and elements of the tubular section of the bearing towers under the action of compression at the ends and bending loads in the system of cylindrical coordinates with the use of the method for solving the spatial problem of solid state mechanics is considered in the paper. For this purpose, methods of constructing the main (σ_0) and correcting (σ_κ) stress tensors for elastic-plastic elements of chimneys and bearing towers, and a cylindrical tensor in the form of their sum (σ) are proposed.

The analysis of modern analytical methods for calculating the strength and stability of cylindrical and conical sections of pipes under compression and stretching under the influence of loads that operate normally to the axis of the pipe, and methods using various software complexes (SCAD, Selena-Result, Lyra, ANSYS) was carried out, comparative analysis of the results obtained.

Dynamic influences on high-rise buildings and basic regularities of multi-cyclic and small-scale damages are considered in the paper, taking into account the elastic state of these elements. The existence of a linear empirical relationship between the critical coefficient of intensity of the stresses of the intensity of stresses K_{lc} and the cyclic stresses of the K_{if} cyclic stresses is confirmed.

The estimation of the fatigue strength and durability of metal smoke pipes is performed on the basis of the kinetic diagram of fatigue failure, using a technique that describes the rate of growth of fatigue cracks (from l_{in} to l_{fin}) for metal tubes and the number of cycles N stresses for crack development. Formulas for calculating the rate of development of cracks are proposed with allowance for various stress intensity factors.

The analysis of occurrence and development of damage from corrosion and temperature influences is carried out in the work. An estimation of deformation aging of metal smoke pipes after mechanical influences during manufacture and operation is carried out.

On the basis of materials of numerous surveys an analysis of damage in welds and the main metal of chimneys and elements of bearing towers and their development was carried out.

In the work on the basis of the survey data, the main types of defects and damage to metal smoke and ventilation pipes, and their bearing towers were determined, their classification according to the nature and values and magnitudes of damage was made. The analysis of damage to metal chimneys and lining for each type of defects and damages has been carried out. The analysis of the damage of elements of metal bearing towers, depending on their cross-section, was also performed.

All major defects and damage to metal chimneys and bearing towers are qualified depending on the type of hazard, the type and location of the situation, the probable causes of occurrence. Identified methods of detection or signs of defects and damage, proposed measures to prevent their further development.

On the basis of the analysis of detected defects and damage of metal smoke and ventilation pipes and their bearing towers, determination of their maximum permissible values, depending on the category of hazard and technical state of structures.

The kinetic equation of damage to metal chimneys and bearing towers is given in the work, taking into account mechanical stresses, corrosion and

temperature influences. The analytical dependences for determining the durability of metal chimney pipes are given taking into account various influences which allow us to describe the kinetics of the variability of the elastic state and to determine the time before the onset of the boundary state of elements of high-rise buildings. Methods of determining the durability of metal chimneys and bearing towers according to the criteria of destruction mechanics are also applied.

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

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

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

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

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

Список публікацій здобувача.

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові 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, Saarbucke, 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. Воронецкий, 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 шестизэтажного 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 трубопрокатного 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. Горовый // 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. Горовый, 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. Горовый, 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. Горовый // 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.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВПЛИВИ НА МЕТАЛЕВІ ДИМОВІ І ВЕНТИЛЯЦІЙНІ ТРУБИ ТА ЇХ НЕСУЧІ ВЕЖІ, ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ РОБОТИ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИСОТНИХ СПОРУД.....	36
1.1. Загальні характеристики металевих димових труб і несучих веж.....	36
1.2. Класифікація і конструктивні особливості металевих димових і вентиляційних труб.....	39
1.3. Характеристики і конструктивні форми несучих металевих веж димових і вентиляційних труб.....	45
1.4. Матеріали для виготовлення металевих димових і вентиляційних труб і несучих веж	60
1.5. Навантаження і впливи на металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі.....	64
1.5.1 Класифікація навантажень і впливів на висотні споруди.....	64
1.5.2 Постійні та змінні довготривалі навантаження на висотні споруди.....	67
1.5.3 Вітрові навантаження на димові труби і металеві несучі вежі	67
1.5.4 Динамічні вітрові навантаження на труби та вежі.....	75
1.5.5 Ожеледно-вітрові навантаження на труби і вежі	76
1.5.6 Снігові навантаження на висотні споруди	78
1.5.7 Типи впливів на металеві димові труби і їх несучі вежі	79
1.5.8 Силові експлуатаційні впливи на висотні споруди.....	80
1.5.9 Корозійні впливи на металеві димові труби і несучі вежі	82
1.5.10 Температурні впливи на димові труби	84
1.5.11 Експлуатаційні механічні впливи.....	85

1.6. Історичний огляд досліджень роботи димових труб та їх несучих веж.....	87
1.7. Надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.....	90
1.8. Висновки по розділу 1.....	91
1.9. Список використаних джерел у розділі 1.....	92
РОЗДІЛ 2. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБ І НЕСУЧИХ ВЕЖ.....	93
2.1. Напружено-деформований стан стиснуто-згинаної труби....	93
2.2. Розрахунок на міцність і стійкість елементів металевих димових і витяжних труб.....	101
2.3. Сучасні методи розрахунку металевих димових і вентиляційних труб, їх несучих веж.....	107
2.4. Висновки по розділу 2.....	121
2.5. Список використаних джерел у розділу 2.....	121
РОЗДІЛ 3. УТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК ПОШКОДЖЕНЬ В МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБАХ І НЕСУЧИХ ВЕЖАХ.....	122
3.1. Розвиток пошкоджень в елементах металевих димових труб і їх несучих вежах від динамічних впливів.....	122
3.2. Розвиток корозійних пошкоджень у металевих димових трубах і несучих вежах.....	137
3.3. Утворення температурних пошкоджень у димових трубах ..	140
3.4. Деформаційне старіння металу димових труб.....	144
3.5. Утворення і розвиток пошкоджень у зварних з'єднаннях металевих димових труб та елементів веж.....	148
3.6. Висновки по розділу 3.....	152
3.7. Список використаних джерел у розділі 3.....	152
РОЗДІЛ 4. ВІДМОВИ ВИСОТНИХ СПОРУД.....	153
4.1. Загальні дані щодо збирання дефектів і пошкоджень.....	153

4.2. Аналіз дефектів і пошкоджень металевих димових труб компресорних станцій магістрального газопроводу.....	155
4.3. Типологія дефектів і пошкоджень димових та вентиляційних труб і несучих веж.....	165
4.4. Пошкоджуваність металевих димових труб і несучих веж...	179
4.5. Категорії небезпечності дефектів і пошкоджень елементів металевих висотних споруд.....	186
4.6. Оцінка технічного стану металевих димових труб і веж, граничні значення дефектів і пошкоджень.....	193
4.7. Висновки по розділу 4.....	198
4.8. Список використаних джерел у розділі 4.....	198
РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ, УПРАВЛІННЯ СТАРІННЯМ І ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБ І НЕСУЧИХ ВЕЖ.....	199
5.1. Загальна методологія оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових труб і несучих веж.....	199
5.1.1. Фізико-статистичний метод оцінки надійності елементів металевих димових труб і несучих веж.....	203
5.1.2. Управління старінням конструкцій металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.....	213
5.2. Основне кінетичне рівняння довговічності елементів металевих димових труб і несучих веж.....	215
5.3. Оцінювання довговічності металевих димових труб і веж з урахуванням корозійного і температурного впливу.....	218
5.4. Довговічність металевих висотних споруд з урахуванням динамічного і корозійного впливів при загальній втраті стійкості труби	224
5.5. Довговічність і зниження несучої здатності металевих димових труб з прогарами у стінці.....	228
5.6. Визначення довговічності димових труб за критеріями	

механіки руйнування.....	232
5.7. Залишковий ресурс металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.....	241
5.8. Висновки по розділу 5.....	249
5.9. Список використаних джерел у розділі 5.....	249
РОЗДІЛ 6. ПІДСИЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ ВИСОТНИХ СПОРУД.....	250
6.1. Підсилення елементів металевих димових труб і веж з тріщинами в основному металі і зварних швах.....	250
6.2. Підсилення елементів металевих димових труб і веж із наскрізними отворами.....	255
6.3. Урахування залишкових зварних напружень при підсиленні труб з пошкодженими накладками.....	257
6.4. Підсилення металевої димової труби, що втратила стійкість	263
6.5. Забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.....	265
6.6. Висновки по розділу 6.....	267
6.7. Список використаних джерел у розділі 6.....	268
ВИСНОВКИ	269
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	273
ДОДАТКИ.....	296
ДОДАТОК А	297
ДОДАТОК Б.....	306
ДОДАТОК В.....	350

ВСТУП

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 металевої димової труби та несучої вежі висотою Н=120 м Харківської «Теплоелектроцентралі №3 з розробкою рекомендацій по ремонту та подальшій безпечній 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, Selena-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, Selena-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 ЭТП-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 *PINЦ*), 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.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ, НАВАНТАЖЕННЯ ТА ВПЛИВИ НА НИХ.

1.1. Загальна характеристика металевих димових і вентиляційних труб

Димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі на промислових підприємствах – складні, дорогі висотні інженерні споруди, які піддаються значним силовим і вітровим впливам, а також дії агресивних високотемпературних газів, що рухаються всередині труби. Димові і вентиляційні труби промислових підприємств (електростанцій, металургійних, нафтохімічних, газопереробних та інших заводів) є кінцевою ланкою технологічних процесів, і вихід їх з експлуатації призводить до зупинки всього виробництва.

Істотні дефекти і пошкодження, отримані в процесі експлуатації, призводять до руйнування димових труб і несучих веж. Це може призвести до тяжких наслідків для виробництва і персоналу, для життєзабезпечення населення у випадку вимкнення життєво важливих виробництв, наприклад, теплоелектроцентралей у зимовий час.

Промислові металеві труби поділяються на димові і вентиляційні. Димові труби призначені для відведення димових газів від згоряння палива в агрегатах вогневої теплотехніки (котлах, печах та ін.). Вентиляційні труби призначені для відведення шкідливих газоповітряних сумішей, що виникають при технологічних процесах в реакторах, апаратах і установках хімічної промисловості.

Залежно від розміщення газоходів промислові труби виконуються з підземними, наземними і надземними вводами газоходів.

До початку п'ятдесятих років ХХ століття найбільш розповсюдженими типами були цегляні і металеві димові труби. Металеві димові труби у цей період експлуатувалися за температур газів,

що відводяться, не вищих за 250°C і слабкої агресивності цих газів. Висота таких металевих труб була не більшою за 30 м. За умови великого діаметра димових труб і високої температури газів, що відводяться, зсередини в металевих димових трубах встановлювалась футеровка з керамічної цегли.

Нині металеві димові і вентиляційні труби застосовуються в ширшому діапазоні висот і діаметрів для різних режимів експлуатації. Висота металевих труб коливається від 20 м до 120 м, а діаметри – від 0,4 м до 6,0 м.

Стовбур металевої димової труби являє собою порожній циліндр (або конус), змонтований з окремих елементів або царг. Окремі елементи або царги виробляють з листової сталі різної довжини і ширини при різній товщині стінки.

Для кріплення царг або елементів стовбура між собою передбачають фланцеві з'єднання на болтах або стикове зварювання елементів. Фланцеві з'єднання на болтах виконують функції як монтажного з'єднання, так і основного.



а)



б)



в)

Рисунок 1.1– Загальні види вільно встановлених металевих димових труб:

- а) димові труби висотою 22 м компресорної станції «Задніпровська»;
- б) димові труби висотою 22 м компресорної станції «Кіровоградська»;
- в) димова труба висотою 25 м мартенівського цеху металургійного заводу.

Фланцеві з'єднання секцій кращі з точки зору монтажу, але більш схильні до виникнення тріщин через крайовий ефект у місці сполучення царги з фланцем, де виникають значні місцеві напруження через коливання труби при вітрових навантаженнях.

У верхній частині стовбура сучасних труб передбачають спіральні конструкції з металевої полоси – інтерцептори, що зменшують коливання труби і покращують її аеродинамічні характеристики, створюючи висхідний потік повітря по її зовнішній поверхні і стабілізуючи викид димових газів.

Залежно від висоти і умов експлуатації металеві труби можуть мати внутрішню цегляну футеровку на консолях, двошарову комбіновану футеровку із застосуванням кислотостійких або теплоізоляційних торкретбетонів, або зовнішню теплоізоляцію з захисним кожухом.

При великих висотах металевих димових і вентиляційних труб (40 м і більше) навколо них споруджуються несучі металеві гратчасті вежі. Газовідвідна металева труба підвішується до гратчастої вежі або спирається на власний фундамент. Металева гратчаста вежа сприймає навантаження від власної ваги вежі (інколи і від труби), від вітрового впливу на стовбур труби, що передається на вежу в місці сполучення з нею, а також кліматичні і технологічні температурні впливи. У місцях сполучення стовбура труби і несучої вежі забезпечується свобода температурних деформацій труби у вертикальному напрямку. Стовбур труби сприймає власну вагу на ділянці між підвісками, вітрове навантаження між точками закріплення з площини на несучій вежі, зусилля від температури димових газів.

Промислові труби поділяють на два принципово різних типи: витяжні (випускні, вентиляційні) труби (вежі) і димові (газодимові) труби [4, 57].

Витяжні (випускні, вентиляційні) труби відводять газові суміші, що пройшли очистку, але зберегли певний ступінь агресивності, мають вологість понад 80-90%, містять конденсат і, як правило, не мають високої температури.

Димові (газодимові) труби відводять дим і газоповітряні суміші, що містять зависі сажі, золи і пилу, а також газоповітряні суміші, отримані при згорянні палива для випалювання і плавлення різних матеріалів і забруднені продуктами окислення речовин, що містяться у перероблюваній сировині. Температура таких відвідних димових і газоповітряних сумішей – 100- 500⁰С, вологість – 60%.

1.2. Класифікація і конструктивні особливості металевих димових і вентиляційних труб

Металеві димові і вентиляційні труби класифікують за багатьма конструктивними, геометричними і технологічними рішеннями й ознаками:

- за конструктивним рішенням металеві димові і вентиляційні труби бувають вільно встановлені, на відтяжках або розпірках, у несучій металевій ґратчастій вежі або несучій оболонці (рис. 1.1, 1.2);

- за обрисом стовбура металеві димові труби бувають зі сталим діаметром (циліндричні) або зі змінним діаметром по висоті з конічною нижньою або середньою частиною (рис. 1.1 в, 1.2 б);

- за типом сполучення елементів металевих труб – фланцеве чи зварне (рис. 1.3);

- за типом спирання металевих димових труб – на власний фундамент, на діафрагми металевих несучих веж, на спеціальні опори (рис. 1.4);

- за технологічним призначенням – без футеровки чи футеровані (для відведення димових газів з температурою понад 100⁰С або особливо агресивних за впливом);

- за кількістю газовідвідних стовбурів – одностовбурні чи багатостовбурні (як правило, у ґратчастих вежах або несучих оболонках) (рис. 1.10 г);

- за типом сприйняття динамічного вітрового впливу – з гасителями коливань (інтерцепторами) або без гасителів коливань (рис. 1.2 б).

Максимальна висота металевих вільно встановлених труб на практиці досягає 120 м. Найбільш поширена висота вільно встановлених металевих труб (труби котелень) коливається в діапазоні від 20 м до 50 м при діаметрах від 1 м до 4 м.

Металева вільно встановлена димова труба зазвичай буває циліндричної форми по всій висоті або з конічною нижньою (іноді середньою) частиною.

Висота конічної частини труби зазвичай не перевищує $1/4$ загальної висоти труби. Конічна опорна частина труби підсилюється ребрами жорсткості і кріпиться анкерними болтами до фундаменту.

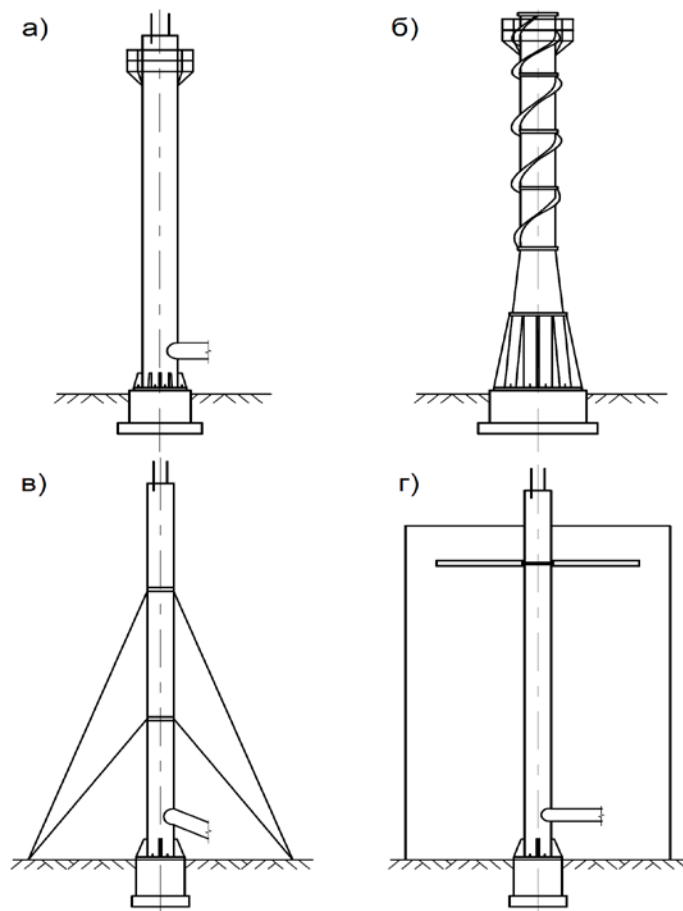


Рисунок 1.2 – Типи металевих димових труб:

а) вільно встановлена труба циліндричного обрису; б) вільно встановлена труба з конічною частиною і гасителями коливань; в) труба з розтяжками; г) труба з розпірками.

При високих температурах газів, що відводяться, і висоті металевих труб понад 40 м зазвичай прилаштовують двошарову комбіновану футеровку. Футеровку зі штучних керамічних виробів у металевих трубах великих висот не застосовують, оскільки вона руйнується при достатньо значних коливаннях стовбурів труб від дії вітрових навантажень.



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 – Зварні і фланцеві з'єднання елементів димових труб:

а) заводський зварний стик елементів стовбура димової труби; б) заводський зварний стик циліндричної і конічної частин стовбура труби; в) фланцеве з'єднання елементів димової труби.



а)



б)



в)

Рисунок 1.4 – Варіанти спирання газовідвідного стовбура:

а) на самостійний фундамент; б) на діафрагму вежі; в) на спеціальну опору.

У вільно розташованих металевих трубах без футеровки можливе виникнення резонансних коливань. На багатьох трубах, збудованих останнім часом, широко застосовуються гасителі коливань – інтерцептори, що являють собою три спіралі, приварені до верхньої третини труби (рис. 1.1 б). На деяких вільно встановлених металевих трубах встановлені аеродинамічні стабілізатори у вигляді гелікоїдальних лопатей або динамічні гасителі коливань, що дозволяє збільшити співвідношення висоти труби та її діаметра (до 30). Іноді зустрічаються конструкції труб з кількома вільно встановленими стовбурами, поєднаними горизонтальними діафрагмами.

Нині експлуатується велика кількість металевих димових труб циліндричної форми на відтяжках (рис. 1.2 в, 1.5 а)



а)



б)



в)

Рисунок 1.5 – Загальні види димових труб на відтяжках або з розпірками:

- а) димові труби висотою 25 м над покрівлею трубопрокатного цеху;
- б) димові труби висотою 25 м всередині трубопрокатного цеху;
- в) витяжна труба висотою 25 м мартенівського цеху.

Димові і витяжні труби, розташовані всередині корпусу або біля зовнішніх стін, розкріплюються в декількох рівнях до конструкцій несучих стін, колон каркасу або конструкцій покриття металевими розпірками (рис. 1.2 г, 1.5 б, 1.5 в).

Найбільш відповідальними вузлами металевих труб є стики секцій або царг циліндричної частини, стик циліндричної і конічної частин труби, вузол кріплення труби до фундаменту.

Монтажні й основні стики секцій циліндричної частини здійснюють шляхом стикового зварювання елементів і за допомогою фланцевих з'єднань на болтах (рис. 1.3 а, 1.6 а).

Вузол з'єднання циліндричної і конічної частин труби працює у складному напруженому стані і найчастіше виконується за допомогою зварювання впритул (рис. 1.3 б, 1.6 б). Стики між секціями виконуються як обробленням крайок, так і повним проваренням.

Елементи труб з фланцевими з'єднаннями сполучаються між собою високоміцними болтами, розташованими ззовні труби (рис. 1.2 в, 1.6 в). Для зменшення товщини фланця застосовують короткі ребра, приварені до фланцю і стінки труби.

З'єднання вільно встановленої труби з фундаментом має бути жорстким і виключати можливість додаткового відхилення труби від вертикалі під дією вітрового навантаження (рис. 1.7).

Найбільш поширеним типом з'єднання є симетричне розташування анкерних болтів відносно стінки труби, затягнутих на опорній плиті (рис. 1.7 , 1.8).

Дуже часто для збільшення жорсткості вузла по вісі анкерних болтів між стовбуром труби й опорною плитою встановлюють ребра жорсткості (рис. 1.7 а). Також часто зустрічається встановлення жорсткої траверси на ребра жорсткості і кріплення до неї анкерних болтів (рис. 1.7 б, 1.8 в).

1.3. Характеристики і конструктивні форми несучих металевих веж димових і вентиляційних труб

Досвід обстеження димових і витяжних споруд великої висоти показав, що найбільш розповсюдженою конструктивною формою є сталева

несуча ґратчаста вежа з газовідвідним стовбуром, розташованим всередині неї.

Димові і вентиляційні труби в несучій металевій вежі застосовуються в широкому діапазоні висот і діаметрів при різних умовах експлуатації. Висота металевих веж димових і вентиляційних труб досягає 180 м і більше [51, 55].

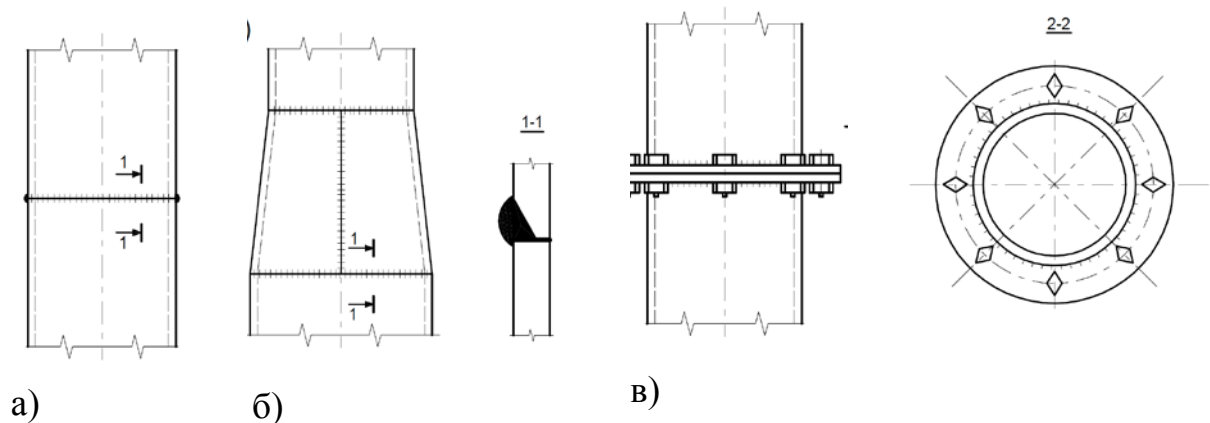


Рисунок 1.6 – Конструктивні рішення вузлів металевих димових труб:

- а) заводський зварний стик елементів стовбура димової труби;
- б) заводський зварний стик циліндричної і конічної частини стовбура димової труби;
- в) фланцеве з'єднання елементів стовбура труби.

Габаритні розміри несучої металеві вежі визначаються технологічними параметрами і встановлюються завданням на проектування. До цих параметрів належать: геометричні розміри стовбура (діаметр і позначка верху труби), кількість газовідвідних стовбурів, позначка верхнього майданчика обслуговування, позначка введення газовідводів у вежу, габарити вежі в основі з умови її розміщення на генеральному плані.

Металеві вежі димових і вентиляційних труб класифікують за конструктивними, геометричними і технологічними ознаками:

- за геометричним обрисом вежі у плані – тригранні, чотиригранні і багатогранні (рис. 1.9, 1.10);



а)

б)

в)

Рисунок 1.7 – Опорні вузли металевих димових труб:

а) опорний вузол металеві димові труби механічного цеху металургійного заводу;

б) опорний вузол димові труби компресорної станції «Південнобузька»;

в) опорний вузол димові труби мартенівського цеху металургійного заводу.

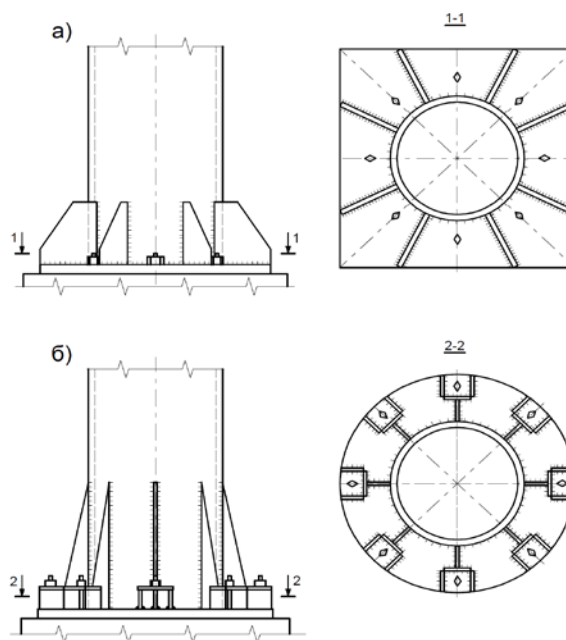


Рисунок 1.8 – Конструкція опорних вузлів металевих димових труб:

а) анкерні болти кріпляться до опорної плити бази колони;

б) анкерні болти кріпляться до бази колони через ребра і траверсу.

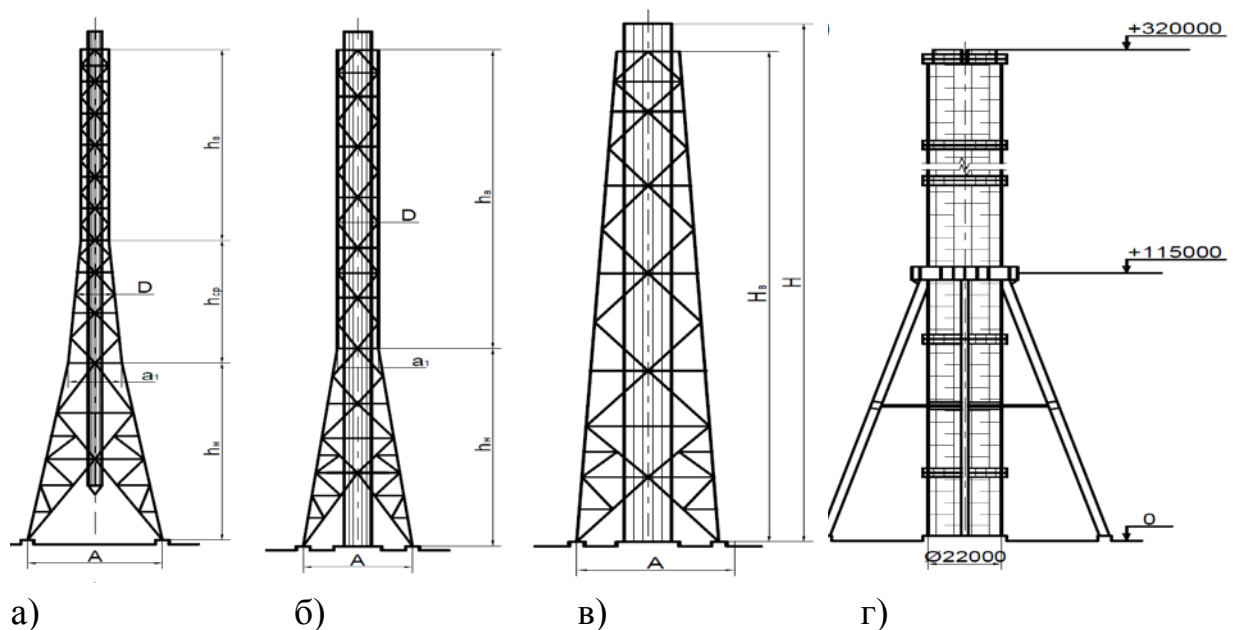
- за обрисом металевих веж за висотою – без перелому, з одним переломом чи с двома переломами по висоті (рис. 1.9, 1.10);



а) б) в) г)

Рисунок 1.9 – Загальні види металевих веж:

а) металева вежа висотою 150 м цеху аміаку хімічного комбінату;
 б) вежі висотою 120 м цеху азотної кислоти хімічного комбінату;
 в) металева вежа висотою 80 м цеху аміаку хімічного комбінату;
 г) металева вежа висотою 30 м цеху трубопрокатного цеху металургійного заводу.



а) б) в) г)

Рисунок 1.10 – Типи силуетів металевих веж:

а) вежа з двома переломами по висоті; б) вежа з одним переломом по висоті; в) вежа без перелому по висоті; г) багатостовбурна труба в несучій оболонці.

- за схемою розкідної решітки – трикутна зі стійками, хрестова, ромбічна (рис. 1.11);

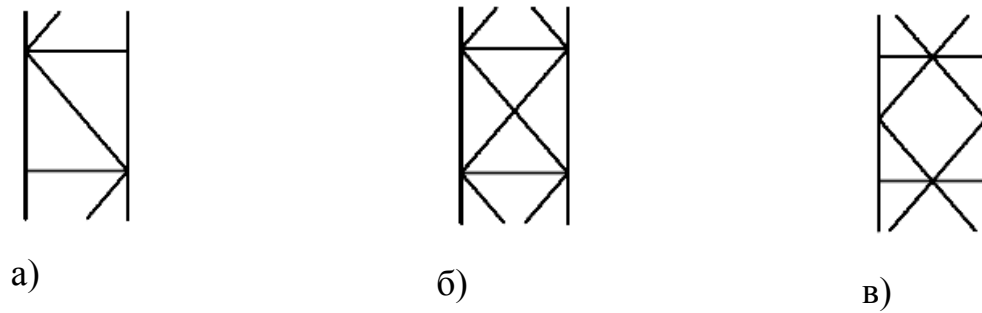


Рисунок 1.11 – Основні схеми решіток веж:

а) трикутна з розпірками; б) хрестова; в) ромбічна.

- за типом перерізів поясів, розкосів і розпірок – елементи вежі відкритого чи замкненого профілю (рис. 1.12);

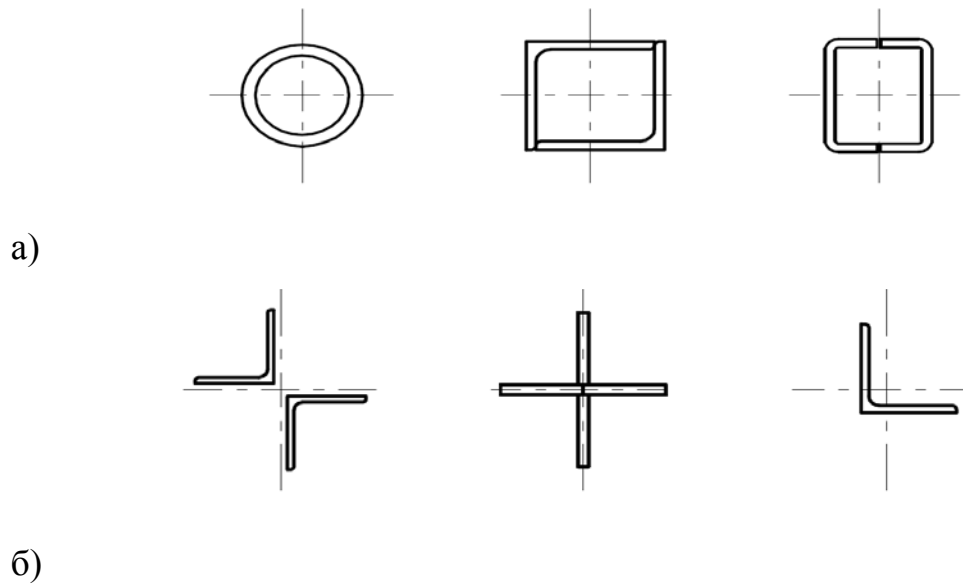


Рисунок 1.12 – Типи перерізів елементів вежі:

а) замкнені профілі; б) відкриті профілі.

- за спиранням газовідвідного стовбура – на окремо встановлений фундамент, на вежу або на спеціальну опору (рис. 1.13).

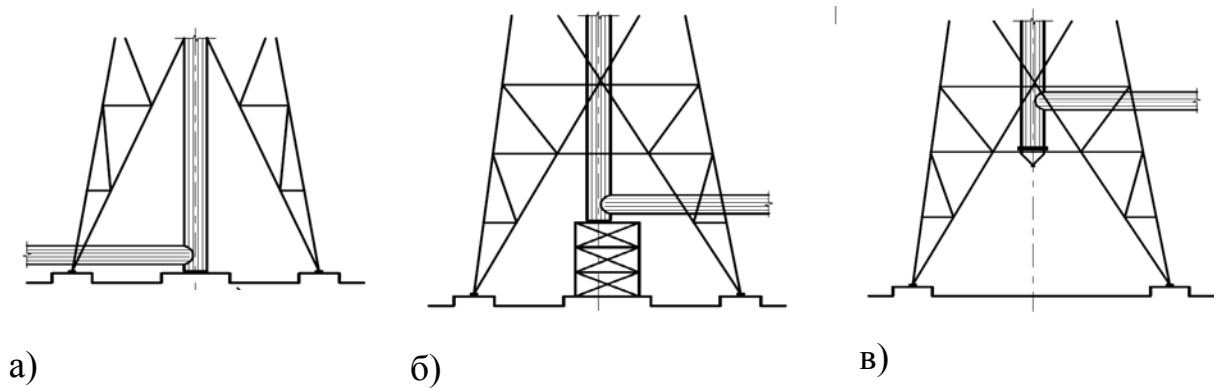


Рисунок 1.13 – Схеми спирання газовідвідного стовбура:

а) на самостійний фундамент; б) на спеціальну опору; в) на діафрагму вежі.

Для витяжних веж висотою до 200 м найбільш поширеними є тригранні і чотиригранні несучі вежі у плані.

Порівнюючи тригранні і чотиригранні вежі, відзначмо, що тригранні вежі не потребують влаштування спеціальних діафрагм для забезпечення незмінності контуру, мають меншу кількість основних елементів, менш чутливі до нерівномірних осідань. До недоліків тригранних веж можна віднести ширші грані порівняно з чотиригранними (ширше у 1,5 рази) через розміщення газовідвідного стовбура (рис. 1.14), ускладнення вузлів сполучення елементів конструкцій, пов'язане з розташуванням граней під кутом 60° .

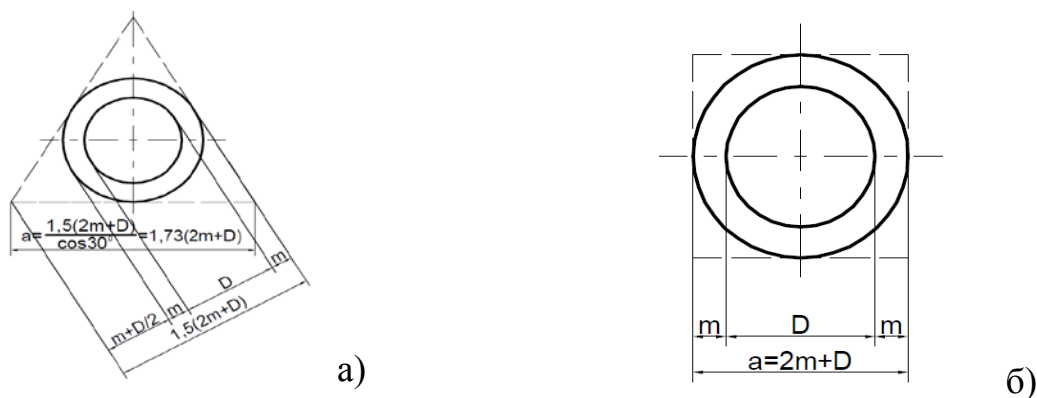


Рисунок 1.14 – Схема розміщення газовідвідного стовбура:

- а) у тригранних вежах;
- б) у чотиригранних вежах.

З естетичної точки зору відсутність взаємно перпендикулярних площин симетрії тригранних веж призводить до того, що при погляді на вежу

збоку паралельно одній із граней вона видається асиметричною, а зблизька здається, що вона «падає».

Враховуючи все це, для витяжних веж із одним газовідвідним стовбуром доцільніше використовувати чотиригранні вежі.

Тригранні вежі широко використовуються у будівництві радіо- і телевізійних веж, для яких вирішальним навантаженням є вплив швидкісного напору вітру безпосередньо на вежу, а вітрове навантаження на обладнання є незначним. Витрата металу на виготовлення таких тригранних веж менша, ніж на чотиригранні на 10-15% [122].

Вежі з двома переломами граней по висоті характеризуються найбільшою кількістю монтажних елементів. Разом з тим, силует вежі з двома переломами граней найбільшою мірою наближається до конфігурації стрижня рівного опору, що забезпечує відносну сталість зусиль по всій висоті пірамідальних частин вежі і призводить до зменшення витрати сталі.

Схема вежі з постійним ухилом поясів характеризуються більш плавним зростанням зусиль у поясах і відносно меншою їх висотою у верхній частині вежі. Такі вежі без переломів поясів, з укрупненими елементами і меншою кількістю вузлових сполучень частіше використовують при експлуатації споруди в умовах підвищеної агресивності середовища.

При обстеженні виявлені деякі співвідношення основних розмірів витяжних веж, що визначають вибір їхнього силуету. До основних розмірів належать (рис. 1.10): H_0 – висота вежі, $H_{пор}$ – висота portalу (нижнього ярусу), h_n – висота нижньої частини вежі, h_e – висота верхньої частини труби, h_{cp} – висота середньої частини труби, A – ширина основи вежі, a_1 – ширина вежі в рівні перелому, H – висота газовідвідного стовбура, D – діаметр газовідвідного стовбура.

Для споруд висотою менше 80 м у всіх випадках рекомендується застосовувати вежі без переломів граней по висоті.

Схема решітки визначається необхідністю розв'язки поясів і гнучкістю елементів самої решітки. В обстежених металевих вежах виявлені

три схеми решіток веж: трикутна з розпірками, хрестова, ромбічна (рис. 1.11).

Вибір типу решітки вежі зумовлений габаритними розмірами споруди і конкретними умовами експлуатації. При великій висоті вежі і великій висоті газовідвідного стовбура переважає влаштування ромбічної решітки. А в умовах підвищеної агресивності зовнішнього середовища найчастіше використовується розріджена трикутна решітка (зі збільшенням панелей поясів), з елементами вежі, зробленими з труб.

Для висотних споруд баштового типу основним розрахунковим навантаженням є дія вітрового потоку на трубу і несучі конструкції вежі. Тому особливе значення має тип перерізів елементів висотних споруд, оскільки від розмірів і форми профілів багато в чому залежить величина вітрового навантаження на споруду.

Основна частка вітрового навантаження у витяжних вежах виникає від тиску вітру на газовідвідний стовбур. Але тип перерізу елементів вежі суттєво впливає також на величину вітрового навантаження і, як наслідок, на зусилля у вежі. Також в умовах сильно агресивного середовища від типу перерізів елементів залежить їхній корозійний знос.

Основними типами перерізів несучих елементів обстежених веж є замкнуті профілі (такі як труби, коробчасті перерізи з прокатних кутиків і гнутих швелерів) і відкриті профілі – хрестові перерізи з двох кутиків або зварені з трьох листів, одиночні кутики (рис. 1.12).

Елементи витяжних веж із труб виготовляються з прокатних або електрозварних труб, а також при великих діаметрах (понад 600 мм) – з труб, отриманих шляхом вальцювання листового прокату. Трубчасті перерізи найкраще відповідають вимогам для елементів витяжних веж. Елементи вежі із труб рівностійкі у всіх напрямках, мають мінімальний опір вітровому потоку, а також найменшу зовнішню поверхню, що сприяє покращенню експлуатаційних якостей споруди, особливо за наявності у повітрі агресивних домішок.

Елементи коробчастого перерізу виконуються з прокатних кутиків і тонкостінних (товщиною 10 – 12 мм) гнутих швелерів. За аеродинамічними характеристиками, корозійною стійкістю вони значно поступаються елементам трубчастого перерізу. Також, структурні зміни металу, що виникають у місці згинання, негативно позначаються на роботі елементів в умовах знакозмінних динамічних вітрових впливів.

Елементи хрестового перерізу широко використовуються в елементах витяжних веж через простоту їх виготовлення. Елементи хрестового перерізу утворюються прокатними кутиками або виготовляються з листової сталі на зварюванні.

Аналіз тривалої роботи типів перерізу, розглянутих вище, дозволяє зробити висновок, що найбільш раціональним типом перерізу для елементів веж є трубчастий переріз.

Як відзначалося раніше, вертикальне навантаження від ваги газовідвідного стовбура може передаватися одним з трьох способів: на самостійний фундамент, на спеціальну опору, що знаходиться всередині вежі, і на одну з діафрагм вежі (рис. 1.13, 1.15).

З метою максимального розвантаження несучої вежі від ваги газовідвідного стовбура краще спирати газовідвідний стовбур на самостійний фундамент. На період монтажу і ремонту газовідвідного стовбура передбачається можливість підвісити його до верхньої діафрагми. Зусилля, викликані в решітці такою підвіскою, знімаються завдяки встановленню додаткових розпірок.

Важливу роль у забезпеченні поперечної жорсткості в горизонтальній площині вежі відіграють діафрагми жорсткості. Для цього вони мають бути геометрично незмінними. Також діафрагми жорсткості використовуються на різних позначках вежі в якості майданчиків для обслуговування споруди у процесі експлуатації. Найбільш складною за своєю схемою є нижня діафрагма, особливо якщо на неї спирається газовідвідний стовбур (рис. 1.13

в). Для сприйняття навантаження від газовідвідного стовбура перерізи елементів діафрагми значно збільшені порівняно з іншими діафрагмами.

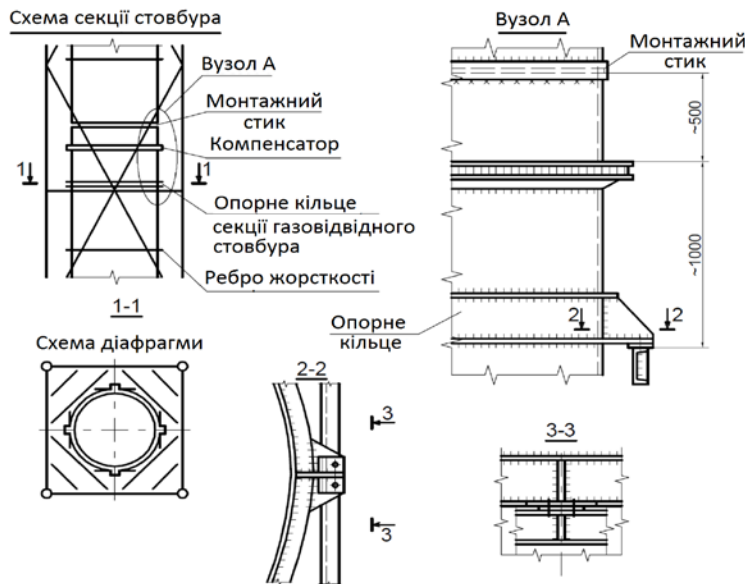
Для елементів діафрагм, що згинаються, застосовують прокатні швелери і двотаври, а при великих вертикальних навантаженнях на балки діафрагми (спиранні газовідвідного стовбура) використовують зварні двотаври. Стиснуті елементи діафрагм виготовляють такого самого перерізу, як і елементи вежі – трубчастого, коробчастого або хрестового.

Для передавання навантаження від газовідвідного стовбура на несучі конструкції вежі застосовують такі схеми спирання, які сумісно (рис. 1.15) або роздільно передають горизонтальні і вертикальні силові впливи (рис. 1.16).

Газовідвідний стовбур знаходиться під постійною дією горизонтальних і вертикальних сил. Вітрові горизонтальні навантаження, що діють на газовідвідний стовбур, передаються на вежу у площині діафрагм, при цьому спеціальними конструктивними заходами забезпечується вільне вертикальне переміщення труби відносно вежі. При спиранні газовідвідного стовбура на кожну діафрагму і сполученій передачі зі ствола на вежу горизонтальних і вертикальних навантажень температурні переміщення гасяться за допомогою встановлення спеціальних компенсаторів поблизу вузла спирання кожної секції газовідвідного стовбура (рис. 1.15). Якщо стовбур повністю спирається на діафрагму в нижній частині споруди і передає на неї вертикальне навантаження, то горизонтальні сили передаються у площинах діафрагм вежі через спеціальні ковзні упори (рис. 1.16).

Зварне з'єднування елементів поясів здійснюється в заводських і монтажних умовах. Заводські з'єднання елементів витяжних веж виконуються тільки на зварюванні. З'єднання поясів із труб однакового діаметра у заводських умовах здійснюється зварюванням впритул на підкладці, що залишається (рис. 1.17 а).

Елементи поясів різного діаметра з'єднують зварюванням впритул через спеціальну конічну вставку (рис. 1.17 б) або шляхом заведення труби меншого діаметра і врізаного в неї хреста у трубу більшого діаметра (рис. 1.17 в).



а)

б)

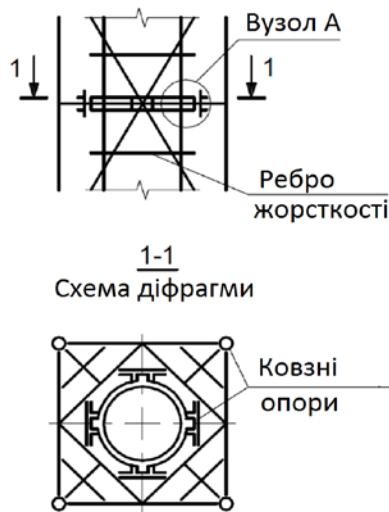
Рисунок 1.15 – Спирання газовідвідного стовбура зі сполученою передачею вертикальних і горизонтальних сил:

а) конструктивні рішення вузла спирання труби і встановлення компенсатора; б) елементи вежі і компенсатор димової труби висотою 90 м.

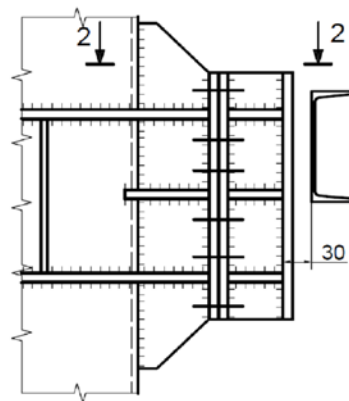
Заводське з'єднання поясів із труб різного діаметру через конічну вставку є доцільним при великих зусиллях і при значних діаметрах елементів (800-1400 мм). Однак при відносно малих товщина елементів, що стикуються ($\delta/R \leq 1/100$), такий стик, що являє собою сполучення тонкостінних оболонок різної форми, потребує додаткової перевірки на місцеву стійкість і крайовий ефект. Для зниження крайового ефекту і концентрації напружень довжина конічної вставки має досягати таких розмірів, щоб ухил конуса складав 1/5-1/7 більшого діаметра елементів, що стикуються. Обидва елементи в місцях сполучення з конічною вставкою підсилюються потовщеними манжетами.

а)

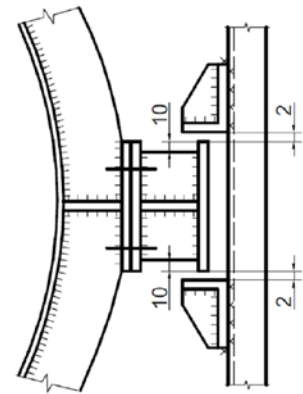
Схема ділянки
газовідвідного стовбура



Вузол А



2-2



б)



Рисунок 1.16 – Вузол передавання горизонтального навантаження
за допомогою ковзних опор:

- а) конструкція вузла передавання горизонтального навантаження;
б) вузол передавання вітрового навантаження з труби на вежу.

При спиранні стовбура на нижню діафрагму вежі важливим є дотримування таких величин зазорів між ковзними опорами і конструкціями діафрагм, що будуть дозволяти вільний розвиток температурних деформацій по висоті труби і передачу вітрових навантажень з труби на вежу (рис. 1.16

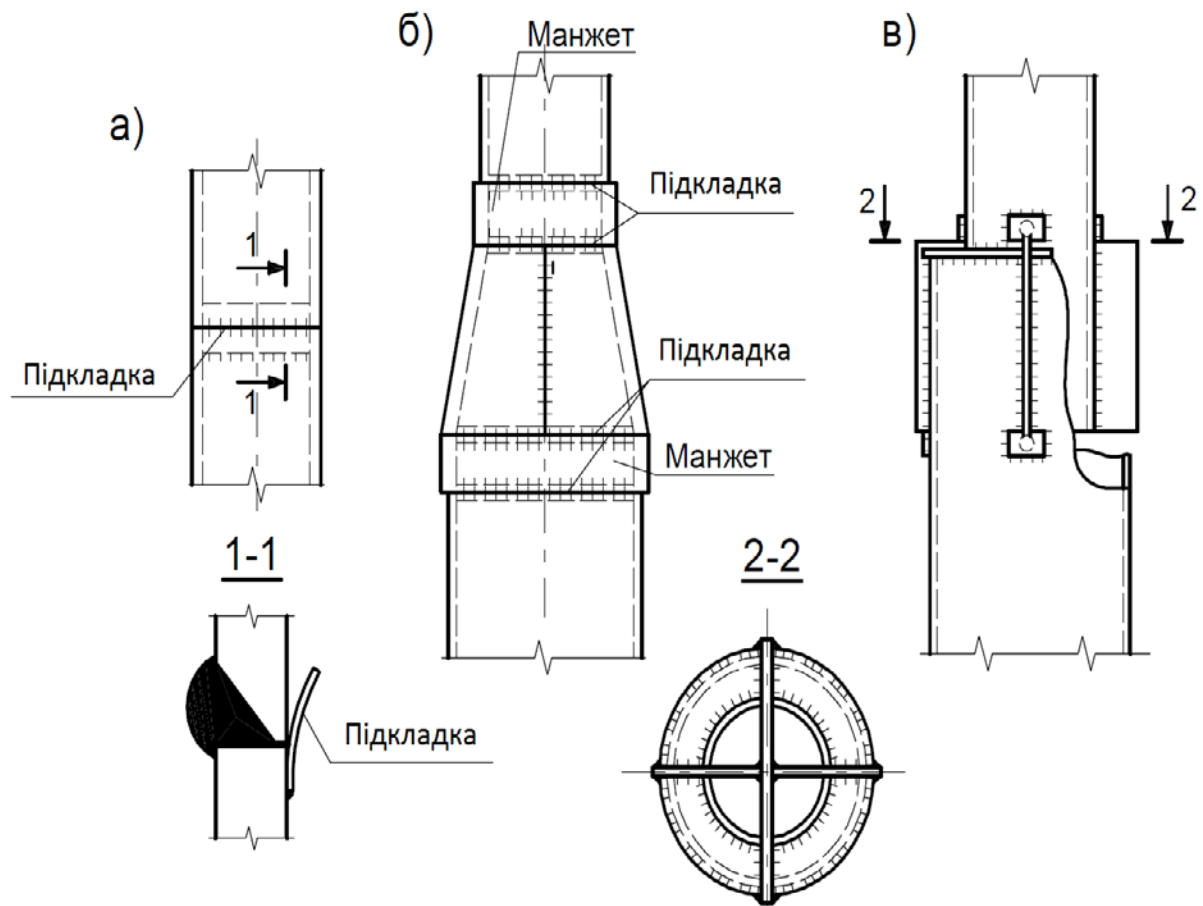


Рисунок 1.17 – Заводські з'єднання елементів металевих димових труб:

а) впритул на підкладці, що залишається; б) впритул через конічну вставку; в) за допомогою врізаного до труби хреста.

Зміна перерізу за довжиною поясів здійснюється або за рахунок зміни габариту перерізу, або його товщини.

При монтажному зварюванні елементів поясів між собою застосовують з'єднання впритул через врізаний зварний хрест (рис. 1.18 б), з'єднання впритул через врізаний зварний хрест на високоміцних болтах (рис. 1.18 в), з'єднання за допомогою кутикових накладок на зварюванні або високоміцних болтах (рис. 1.18 г).

Фланцеві з'єднання поясів несучих металевих веж для перерізів із труб широко розповсюджені (рис. 1.18 а, 1.19). Однак необхідно враховувати, що при значних величинах зусиль розтягу в поясах вежі в таких з'єднаннях

можуть з'являтися втомні тріщини в навіколошовній зоні сполучення фланця з трубою, розвиток яких при тривалому терміні експлуатації в умовах динамічного навантаження призведе до руйнування з'єднання.

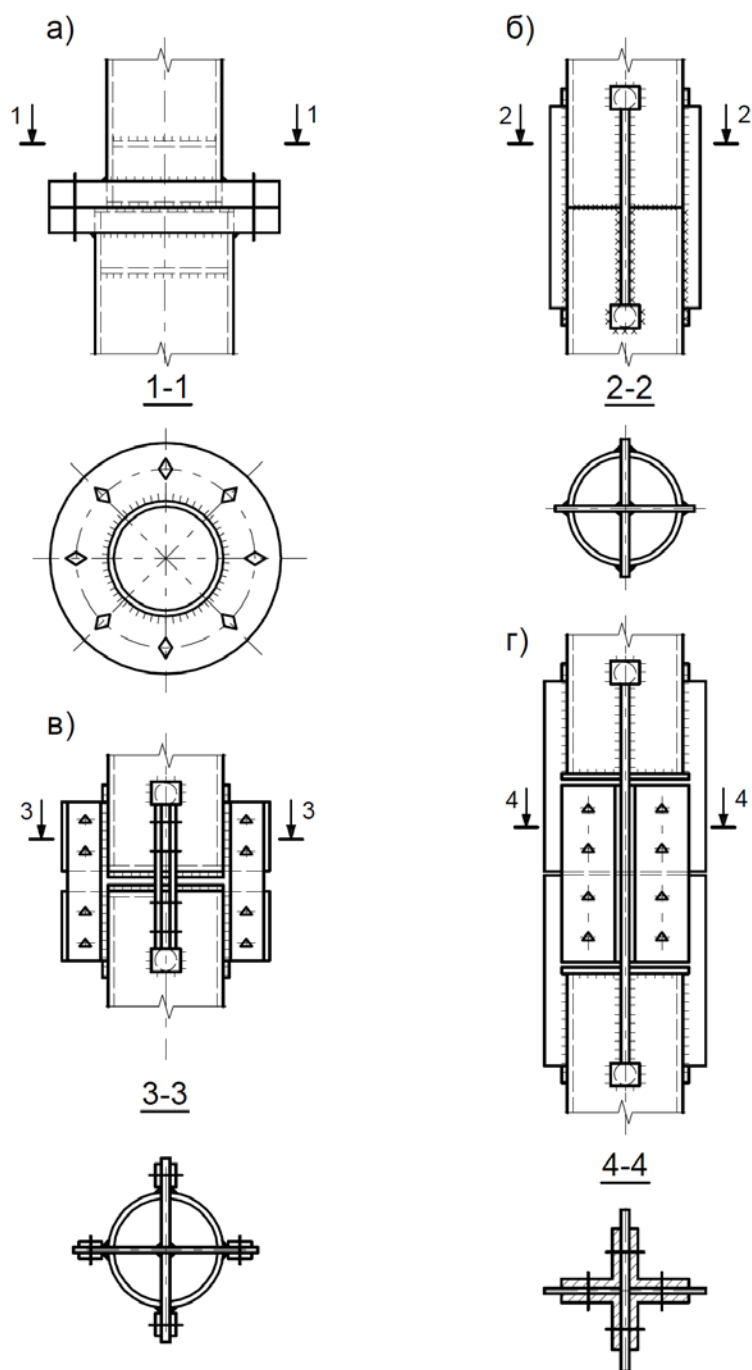


Рисунок 1.18 – Конструктивні рішення монтажних з'єднань із труб:

- а) фланцеве з'єднання;
- б) з'єднання впритул через врізаний хрест;
- в) з'єднання впритул через врізаний хрест на високоміцних болтах;
- г) з'єднання з кутових накладок.

У гратчастих несучих вежах фланцеві стики зазвичай сполучають із центром вузла кріплення решітки (рис. 1.19 а, 1.19 б). Практика проектування витяжних веж показала, що монтажний стик поясів доцільно розміщувати поза вузлами сполучення з решіткою, на висоті 1-1,5 м над рівнем діафрагми. Різниця діаметрів труб, що з'єднуються на фланцях, не повинна перевищувати 50 мм.

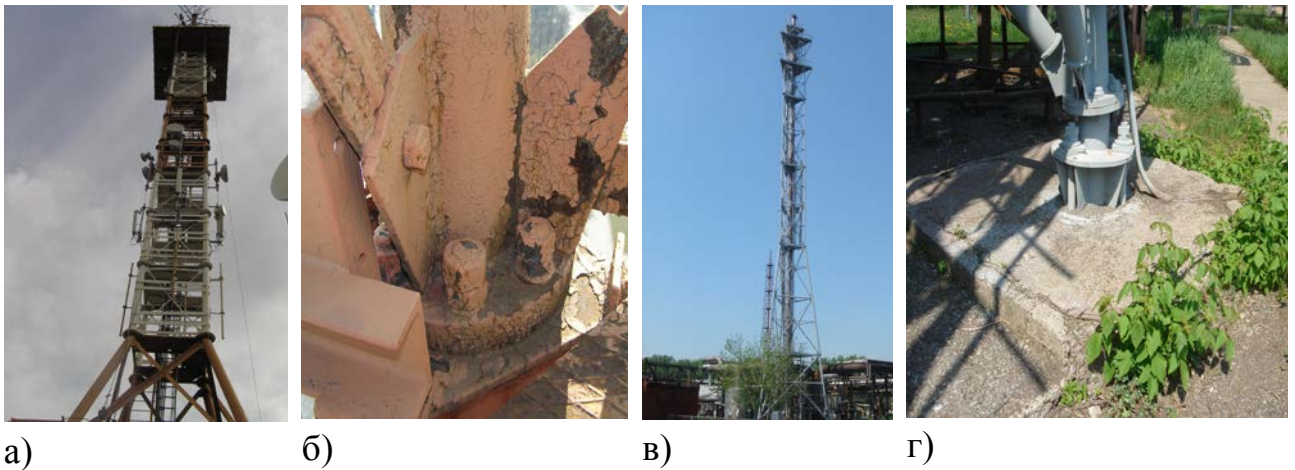


Рисунок 1.19 – Металеві вежі з фланцевими з'єднаннями поясів:

- а) металева вежа висотою 32 м на даху будівлі Держпром у м. Харкові;
- б) фланцевий вузол сполучення елементів поясу вежі;
- в) металева вежа висотою 80 м димової труби факелу;
- г) фланцевий вузол сполучення поясу вежі з фундаментом.

Для поясів хрестового профілю із двох кутиків з'єднання елементів з різними товщинами часто сполучені із заводським стиком, а зміни перерізу за габаритом – з монтажним.

Заводські і монтажні стики поясів із прокатних кутиків здійснюються на зварюванні або високоміцних болтах за допомогою кутикових або листових накладок (рис. 1.20).

На практиці заводські з'єднання на кутикових накладках поясів несучих веж зустрічаються рідко (для невисоких веж).

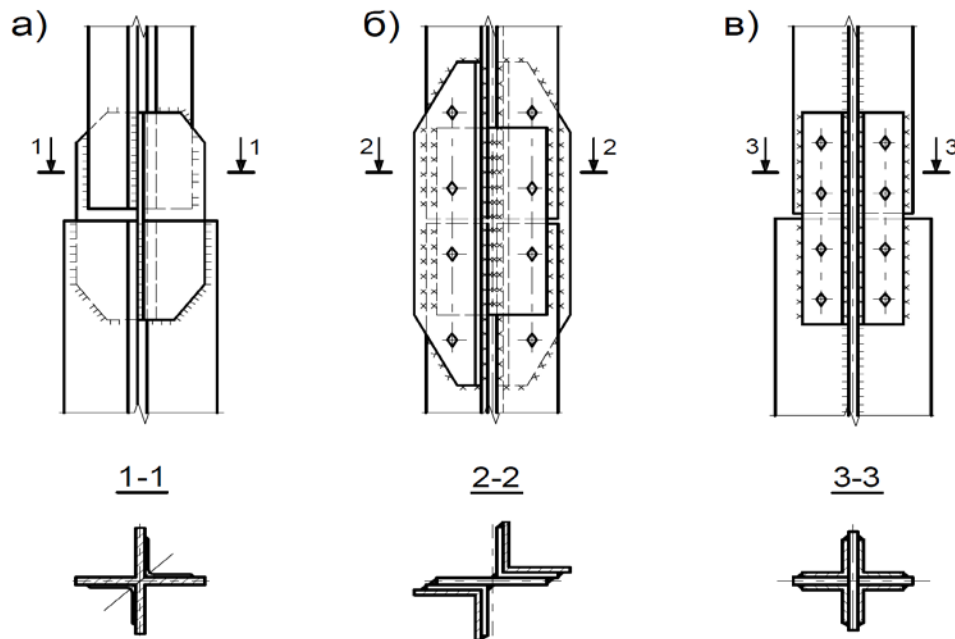


Рисунок 1.20 – Конструктивні рішення заводських і монтажних з'єднань елементів хрестового перерізу:

- а) заводський стик на кутикових накладках;
- б) монтажний стик хрестового перерізу з кутиків;
- в) монтажний стик хрестового перерізу з листової сталі.

Місця зламу поясів вежі при переході з пірамідальної частини у призматичну є відповідальними і достатньо складними вузлами. Найбільш поширена на практиці конструкція вузлів зламу з труб показана на рис. 1.21.

Одним з найбільш відповідальних вузлів вежі є опорний вузол. Через опорний вузол вежі на фундамент передаються нормальні і перерізуючі зусилля. Залежно від напрямку вітрового потоку нормальна сила може бути такою, що стискає або розтягує. Стискальна сила передається на фундамент через опорну плиту, сила розтягу – сприймається анкерними болтами. Закріплення чотиригранної вежі на фундаменті здійснюється чотирма опорними вузлами, в кожному з яких сходяться один пояс вежі і два розкоси сусідніх граней.

Найбільш чіткого передавання зусиль і раціональної умови виготовлення опорного вузла можна досягти при встановленні опорної плити перпендикулярно вісі поясу, а анкерів – паралельно йому (рис. 1.22).

Таке рішення є найбільш надійним і найбільш поширеним конструктивним рішенням при будівництві веж великої висоти з поясами і розкосами трубчатого перерізу.

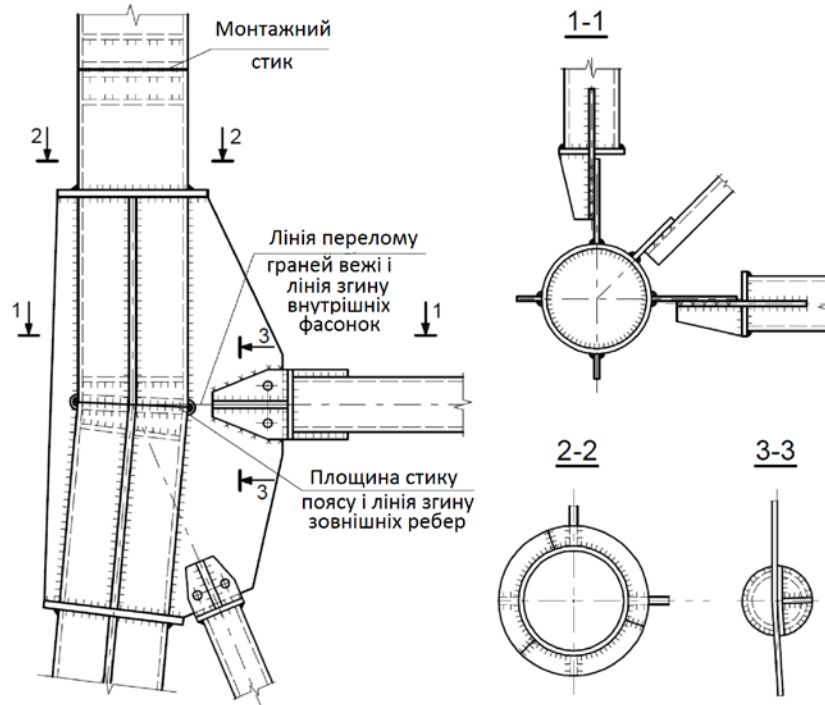


Рисунок 1.21 – Вузол перелому поясу із труб, з'єднаних впритул

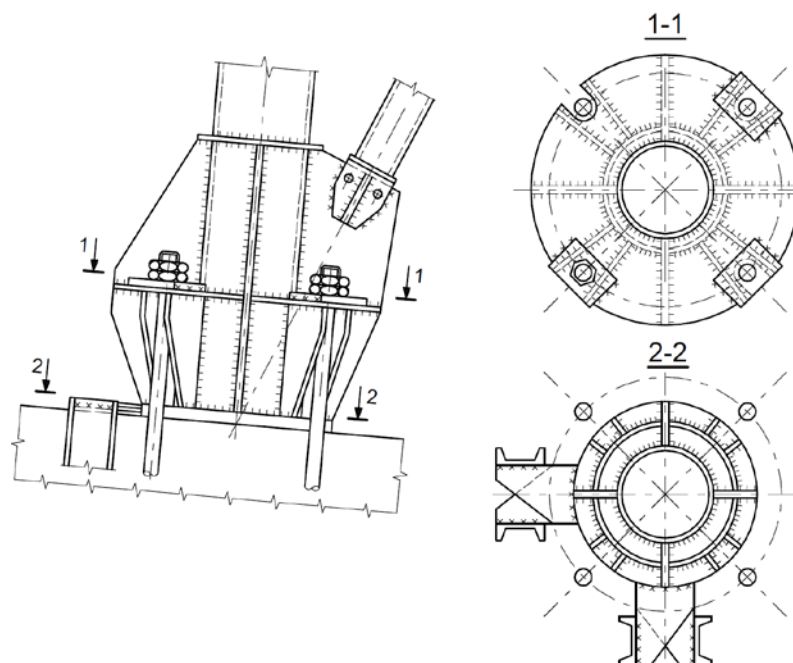


Рисунок 1.22 – Опорний вузол вежі із елементами трубчатого перерізу
с чотирма анкерними болтами

Горизонтальна нерухомість опорного вузла забезпечується спеціальними закладними елементами, з'єднаними з опорною плитою «шпорою».

Передавання зусиль від поясу і розкосів до елементів опорного вузла здійснюється через систему ребер і траверс. Ребра, розташовані у площині граней вежі, є і фасонками для кріплення опорних розкосів.

1.4. Матеріали для виготовлення металевих димових і вентиляційних труб і несучих веж

Для несучих елементів металевих димових і вентиляційних труб традиційно від 50-х років ХХ століття і донині використовуються маловуглецеві сталі спокійного плавлення – ВСт3сп5. Для не розрахункових елементів конструкцій металевих труб (огорожі ходових драбин, світлофорних майданчиків і т.ін.) зазвичай використовують киплячі сталі – ВСт3кп2.

Маловуглецеві сталі ВСт3сп5 і ВСт3пс6 (за ГОСТ 380) мають задовільну корозійну стійкість при роботі у сухих сірчистих газах з температурою до 100⁰С, в окислах азоту і сухому хлорі при температурах до 200⁰С, без спеціального захисту або із захистом лакофарбовими матеріалами [85,139, 140]. При високотемпературному сухому режимі роботи димових труб маловуглецеві сталі застосовують за температури газів, що відводяться, не вище 300⁰С, оскільки за більш високих температур відбувається сильна газова корозія, особливо різко збільшуючись за температур 500⁰С і вище.

У рідких агресивних середовищах, таких як сірчисте (окрім концентрованого), соляне, азотне, плавикове, навіть за кімнатних температур маловуглецеві сталі не є корозійностійкими, оскільки не утворюють пасивуючих плівок. Тому маловуглецеві сталі не можна застосовувати в умовах низькотемпературного режиму без захисту. У таких

середовищах маловуглецеві сталі застосовують, як правило, лише за наявності ефективного захисту.

На практиці, беручи до уваги той факт, що досі не існує довготривалого ефективного антикорозійного захисту металу в рідких агресивних середовищах, застосовують маловуглецеві сталі зі збільшеною товщиною стінки труби на 2-4 мм (порівняно з необхідною товщиною з умов міцності та стійкості), особливо в зоні укутування, що піддається найбільшій корозії.

Таким чином, маловуглецеві сталі марок ВСтЗсп5, ВтЗпс6 і ВСтЗкп2 є основними конструкційними матеріалами для металевих вентиляційних труб, що експлуатуються впродовж тривалого періоду часу (50 років і більше) і працюють у сухих агресивних середовищах за температури газів до 300⁰С.

Високолеговані сталі для димових і вентиляційних труб використовуються за умов потрібності високої стійкості проти корозії і за високих температур газів, що відводяться (понад 300⁰С). Залежно від основних властивостей високолеговані сталі поділяються на такі групи [148,138, 139]:

група I – корозійностійкі (неіржавні), у тому числі сталі, стійкі проти електротехнічної корозії;

група II – жаротривкі (окалиностійкі), тобто сталі, стійкі проти хімічного руйнування поверхні у газових середовищах за температур, що перевищують 500⁰С, і здатні працювати в ненавантаженому або слабконавантаженому стані;

група III – жароміцні, тобто сталі, що мають достатню окалиностійкість у навантаженому стані й високотемпературному середовищі.

Для газовідвідних стовбурів витяжних веж застосовують стійкі проти електрохімічної корозії марки сталей 08Х13, 08Х22Н6Т, 10Х17Н13М2Т і

О6ХН28МДТ, також жаротривкі сталі марок 12Х18Н9Т і 08Х18Н10Т (усі сталі за ГОСТ 5949-75).

Хромисті і хромонікелеві сталі мають високу корозійну стійкість до мінеральних кислот з окислювальною дією (концентрована сірчана і азотна кислоти), до розчинів солей і їдких лугів. Хромиста сталь 08Х13 часто використовується для газовідвідних стволів у середовищах, що містять окисли азоту, і сірководневому середовищі.

У середовищах, що містять окисли сірки, азоту і фосфору, а також сірководень, застосовують хромонікелемолібденову сталь 10Х17Н13М2Т. Високолегована хромонікелемолібданова мідиста сталь О6ХН28МДТ має високу корозійну стійкість і може використовуватись практично в усіх середовищах.

При низькотемпературному вологому режимі для роботи у середовищах, що містять окисли азоту і фосфору, доцільно використовувати хромонікелеві сталі 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т і 08Х22Н6Т. При високотемпературному сухому режимі у середовищах, що містять окисли сірки, хлористий водень, хлор, застосовують хромонікелеві сталі 18Х18Н10Т.

При змінному режимі роботи, найбільш несприятливому для конструкційних матеріалів, у середовищі, що містить окисли азоту і фосфору, застосовують хромонікелеві сталі 12Х18Н9Т і 08Х18Н10Т. У середовищах, що містять окисли сірки і з'єднання галогену, застосовують хромонікелемолібденову мідисту сталь О6ХН28МДТ.

З економічної точки зору застосування цих марок сталей для газовідвідних стовбурів є доцільним лише у вигляді плакувального покриття значно дешевшої мало вуглецевої сталі. Корозійна стійкість плакувального шару рівнозначна стійкості сталі, що використовується для плакування. Лише як виняток і за належного обґрунтування газовідвідний стовбур може бути виконаний повністю з високолегованих сталей.

У якості матеріалу для стовбурів витяжних веж іноді використовують технічний алюміній марки АД1 і сплав алюмінію з марганцем АМц [1, 119]. Ці алюмінієві сплави мають високу корозійну стійкість до впливу сухого сірчистого газу за температур 20 – 40⁰С, а також в атмосфері сірководню і сухих окислів азоту.

Алюмінієві сплави піддаються сильному корозійному руйнуванню в розчинах сірчаної, соляної, азотної, фосфорної та плавикової кислот. Вологий сірчистий ангідрид також викликає значну корозію алюмінієвих сплавів. Корозія алюмінієвих сплавів сильно збільшується і при контакті зі звичайною і неіржавною сталлю. Крім того, застосування алюмінію і його сплавів обмежено областю невисоких температур (до 100⁰С), вище якої погіршуються його властивості міцності.

При експлуатації алюмінієвих сплавів для витяжних труб навіть короточасна зміна в режимі роботи веде до прискореного руйнування алюмінієвих сплавів.

Титан і його сплави мають велику міцність при малій щільності, високу корозійну стійкість в атмосферному повітрі, розчинах лугів неорганічних солей [162]. Титан є найбільш стійким проти корозії в кислих середовищах, в азотній кислоті і царській воді, в сухому сірчистому газі і вологому хлорі.

Стійкість титану до сірчаної, соляної і фосфорної кислоти знижується зі збільшенням концентрації цих кислот. Титан є нестійким у плавиковій кислоті і сухому хлорі. За підвищення температури властивості міцності і захисту титану знижуються. Наприклад, технічний титан марки ВТ1, який застосовують найчастіше, рекомендовано використовувати за температури до 350⁰С.

Елементи витяжних веж з перерізами з профільного металу або листового прокату виготовляються, як правило, з мало вуглецевої сталі за ГОСТ 380-2005 або низьколегованої сталі за ГОСТ 19281-89.

При виборі марок сталі для несучих елементів витяжних веж необхідно враховувати, що вежі експлуатуються на відкритому повітрі, тому за розрахункову температуру необхідно брати температуру найбільш холодної п'ятиденки району будівництва [133].

Протягом багатьох років для призначення марок сталі для конструкцій витяжних веж використовувались дані СНиП – В.3-72 [134]. Наближено ці дані використовується і нині під час проектування витяжних веж.

Відповідно до вітчизняних норм проектування [136, 137] металеві стовбури димових і вентиляційних труб, пояси і вузлові фасонки витяжних веж належать за призначенням і можливими наслідками при досягненні граничних станів до категорії А, а за напруженим станом і умовами можливого руйнування від втоми чи крихкого руйнування – до категорії II. Газовідвідні стовбури, елементи решітки і балки діафрагм за призначенням належать до категорії Б, за напруженим станом – до категорії II. Конструкції й елементи металевих димових труб, пояси і вузлові фасонки витяжних веж відносяться до 1-ї групи конструкцій з показником $S > 26$.

У нормативних документах інших країн [135] сталеві оболонки вільно встановлених димових труб, фасонки ферм витяжних веж належать до 1-ї групи конструкцій, пояси, розкоси й елементи діафрагм витяжних веж – до 2-ї групи конструкцій. Вимоги щодо характеристик ударної в'язкості і хімічного складу металу практично аналогічні до вітчизняних норм.

1.5. Навантаження і впливи на металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі

1.5.1. Класифікація навантажень і впливів на висотні споруди

Димові труби і несучі вежі зазнають спільної дії різних навантажень і впливів з моменту спорудження і протягом усього життєвого циклу експлуатації.

За своєю природою і походженням навантаження на висотні споруди поділяються на такі групи [101]:

- навантаження від постійної ваги несучих і огорожувальних конструкцій, величини яких встановлюються за геометричними параметрами і значеннями щільності використовуваних матеріалів;
- атмосферні навантаження (снігове, вітрове, ожеледне, температурне, льодове та ін.), значення яких пов'язані з деяким періодом повторюваності;
- технологічні навантаження (від дії устаткування, ваги матеріалів, людей та ін.), для яких значення беруться за паспортними, а також прогнозованими величинами, передбаченими умовами експлуатації;
- впливи зсувів земної поверхні (сейсмічних рухів, деформації просідних ґрунтів при замочуванні, гірничих розробок, карстових процесів і т.д.), для яких значення регламентуються спеціальними нормативними документами;
- навантаження, викликані надзвичайними обставинами (вибухові, від зіткнення з транспортом, що рухається, і т.д.).

Усі перераховані навантаження поділяються на постійні і змінні (тривалі, короткочасні та епізодичні).

Навантаження і впливи, що діють на висотні споруди, представлені на рис. 1.23.

До постійних навантажень відносяться: власна вага несучих конструкцій труб і веж, майданчиків, драбин, гарнітури; впливи попередньої напруженості решітки вежі.

До змінних тривалих навантажень відносяться: вага теплоізоляції, антикорозійного покриття газовідвідного стовбура; тиск газів, що відводяться, у газовідвідному стовбурі; температурні деформації газовідвідного стовбура; вага конденсату відкладень на стінках труб; вага пилу на робочих майданчиках.

До змінних короткочасних навантажень відносяться: вітрові навантаження; снігові навантаження; ожеледні навантаження; температурні

кліматичні впливи; навантаження під час короткотривалих випробувань устаткування; температурні впливи при запуску і зупинці виробничих процесів; вага людей, деталей, ремонтних матеріалів; монтажні навантаження.

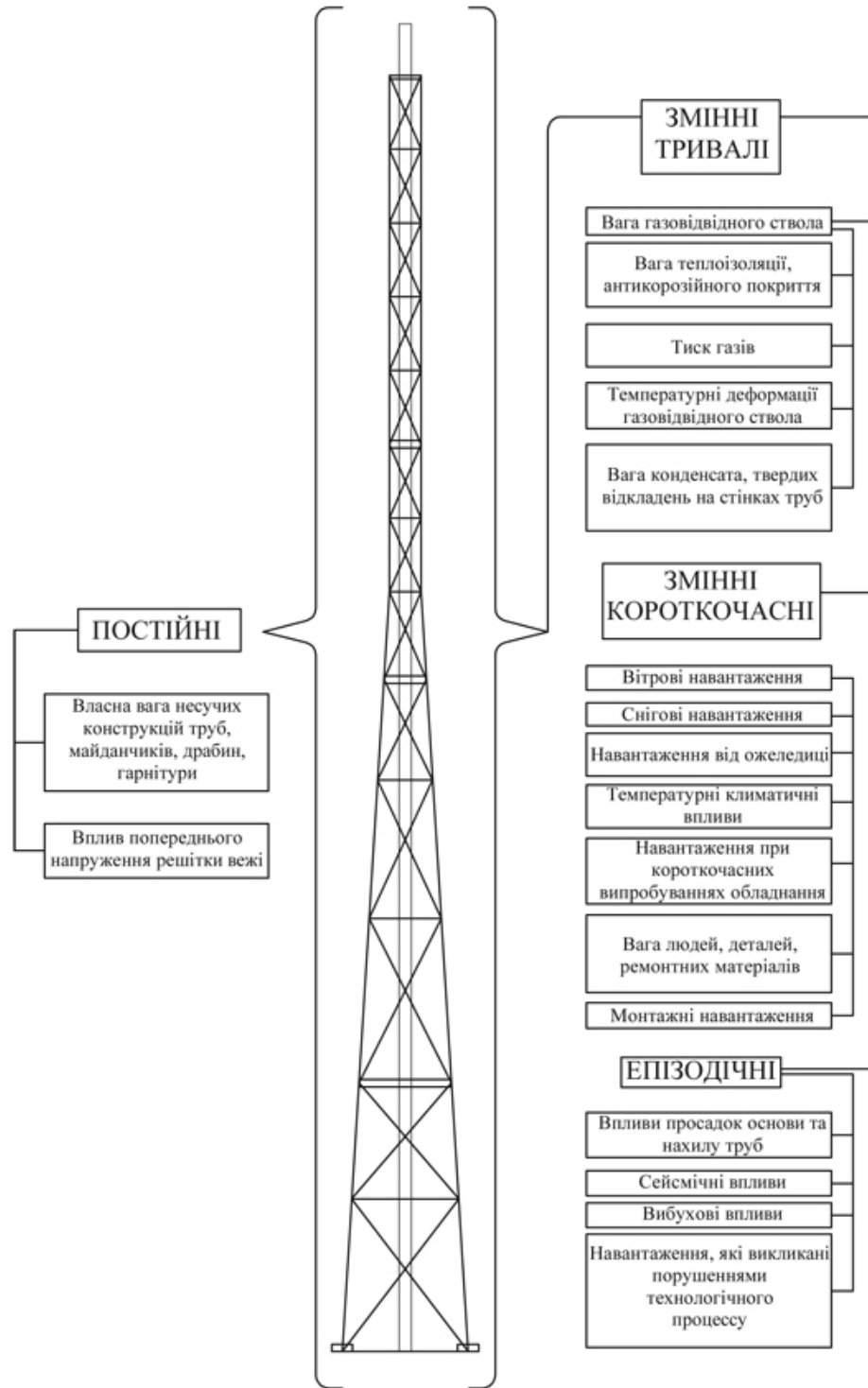


Рисунок 1.23 – Схема навантажень і впливів на висотні споруди

До епізодичних навантажень відносяться: сейсмічні впливи; впливи просідань основи і нахилу труби; вибухові впливи.

Навантаження і впливи за природою походження поділяються механічні і немеханічні.

Основою для призначення навантажень є їхнє характеристичне значення. Розрахункові значення навантажень визначаються через множення характеристичних значень на коефіцієнт надійності за навантаженням γ_f , що залежить від виду навантаження [101].

1.5.2. Постійні та змінні довготривалі навантаження на висотні споруди

Визначення величин постійних та змінних довготривалих навантажень на існуючі димові труби і несучі вежі є достатньо простим і регламентоване нормативними документами [101].

Під час аналізу даних про постійні та змінні довготривалі навантаження від існуючих конструкцій металевих димових труб і несучих веж та обладнання необхідно уточнювати фактичні данні, які дуже часто відрізняються від номінальних значень і довідкових відомостей [113]. За тривалий термін експлуатації елементи металевих димових труб і несучих веж та обладнання може бути замінено або демонтовано. Ґрунтуючись на дані чисельних натурних обстежень можна зробити висновок, що постійні навантаження можуть зрости на 10%, змінні довготривалі навантаження – до 20%.

1.5.3. Вітрові навантаження на димові труби і металеві несучі вежі.

Для висотних споруд спеціального призначення, таких як димові труби і несучі вежі, вітрове навантаження є домінантним порівняно з іншими навантаженнями. Визначення реальних вітрових навантажень на труби і вежі є найскладнішим порівняно з іншими видами навантажень.

Узагальнюючи всі дослідження вітрового навантаження на металеві димові труби і несучі вежі, можна зробити висновок, що вони спрямовані на розв'язання трьох основних завдань:

- вивчення вітрового режиму місцевості, що базується на використанні результатів кліматичних і метеорологічних досліджень;
- визначення сил, викликаних дією вітру на висотні споруди, які вивчаються на основі завдань теоретичної аеродинаміки і даних експериментальних досліджень;
- визначення реакції споруди на вплив сил, що базується на розв'язанні завдань статичної і динамічної висотних споруд.

Основною причиною турбулентності повітряного потоку є шорсткість місцевості, що оточує конкретний майданчик забудови, тому швидкість змінюється залежно від висоти над рівнем землі.

Основною характеристикою вітрового потоку є швидкість вітру. Графік швидкості вітру зазвичай записується анеморумбометром [25, 123]. Істинну швидкість вітру турбулентного потоку у даний момент часу можна представити як суму середньої швидкості вітру і пульсаційної швидкості.

Пульсаційна складова зазвичай характеризується коефіцієнтом пульсацій або інтенсивністю турбулентності.

Коефіцієнт пропорційності називається аеродинамічним коефіцієнтом. Аеродинамічний коефіцієнт визначає частку швидкісного напору, яка переходить у вітровий тиск і знаходиться з експериментів в аеродинамічній трубі.

Висотна споруда з точки зору аеродинаміки є поганообтічною перешкодою. При обтіканні висотної споруди вітровим потоком повітря з'являються зони утворення вихорів (зони турбулентності), які й визначають розподіл вихрового тиску на зовнішні поверхні будівлі чи споруди. Зони турбулентності мають високу інтенсивність у завітреній області [25].

Розміри завітреної області залежать від геометричних характеристик обтічного тіла і від напрямку вітрового потоку.

Картина утворення вихорів в аеродинамічному сліді споруди суттєво змінює значення аеродинамічних коефіцієнтів на завітреній і бокових поверхнях.

Металеві димові труби (споруди циліндричної форми) належать до класу поганообтічних тіл. Внаслідок наявності тертя в повітрі біля димової труби (циліндру), яку обтікає повітряний потік, утворюється так званий граничний шар, у якому швидкість потоку стрімко падає до нуля біля поверхні тіла. Товщина цього шару залежить від в'язкості середовища.

На початку руху, коли швидкість мала, потік навколо металевої труби наближається до загального (потенційного) потоку. Граничний шар служить своєрідним прошарком між потоком і трубою, і якщо у критичних точках виникає підвищений тиск, він передається тільки через граничний шар.

Розташування вихорів не є стійким, і при подальшому збільшенні швидкості i , відповідно, числа Рейнольдса розташування вихорів стає асиметричним. Вихори відриваються по черзі з обох сторін труби через певні проміжки часу і утворюють вихрову доріжку, яка називається доріжкою Кармана.

Нестационарні аеродинамічні сили, що діють на металеві труби, великою мірою залежать від числа Рейнольдса R_e [29, 94, 121, 129, 193].

За даними джерел [29], критичне число Рейнольдса для циліндричних тіл складає $R_e = 3 \cdot 10^5$. При подальшому збільшенні течія у граничному шарі переходить з ламінарного у турбулентний стан і відбувається різке зниження коефіцієнту лобового опору.

При поперечному обтіканні димової труби, як видно з робіт [2], проявляється крайовий ефект і розподіл тиску змінюється за висотою.

Чим вищий ступінь турбулентності вітрового потоку, що набігає на тіло, тим при менших значеннях чисел Рейнольдса R_e настає турбулізація граничного шару. Число Рейнольдса є критерієм відносної значущості сил інерції порівняно з силами в'язкого опору.

У практиці експлуатації висотних споруд добре відомі випадки, коли у них виявлялася схильність до розгойдування в умовах природного вітру. Така нестійкість відображає взаємодію між висотними спорудами і вітровим потоком. Існують два типових явища аеродинамічної нестійкості для металевих труб і веж.

Перше вихрове збудження спостерігається при коливанні димових труб і веж і пояснюється утворенням вихорів у сліді цих споруд при їх обтіканні вітровим потоком.

Друге явище має загальноприйнятту назву галопування. Галопуванню піддаються погано обтічні гнучкі конструкції з аеродинамічними поперечними перерізами (квадратним, прямокутним і ромбовидним) – конструкції елементів веж із кутиків і швелерів. Коливання такого типу визначаються формою і розташуванням споруди відносно потоку вітру, його згинальною і крутильною жорсткостями, величиною конструкційного демпфування. Галопування не притаманне димовим трубам циліндричного обрису.

Важливою особливістю вихрового збудження металевих труб є виникнення інтенсивних коливань уперек потоку в певних інтервалах швидкостей. У цих інтервалах спостерігаються швидкості (критичні), для яких частоти вихорів Кармана визначаються числом Струхалю, близьким до власних частот коливання металевої труби [193].

Числа Струхалю і коефіцієнти поперечної сили C_y для металевих труб залежать від чисел Рейнольдса Re [193].

Вплив потоку повітря на металеву трубу групується у три області:

- область а – ламінарний граничний шар, до критична область (турбулентна вихрова доріжка);
- область б – турбулентний граничний шар, закритична область (процес довільний);
- область в – транскритична область (процес містить періодичну складову).

Натурні і модельні коливання металевих труб [6, 151, 207, 211] показують, що їх коливання вздовж і впоперек потоку відбуваються з довільною амплітудою і фазою, і з частотою, близькою до власної частоти коливань у цьому напрямку. Додавання цих двох взаємно перпендикулярних коливань дає траєкторію, близьку до еліпсу, більша вісь якого перпендикулярна напрямку потоку.

Зі збільшенням швидкості потоку ростуть і амплітуди коливань труби. Це спостерігається як при ламінарному, так і при турбулентному обтіканні. В області падіння лобового опору (кризи опору) спостерігається значне зменшення амплітуди поперечних коливань труби.

При певних швидкостях вітрового потоку відбувається захоплення частоти вихорів Кармана власною частотою коливань металевої труби, і її амплітуда починає рости. Це явище, що називається вітровим резонансом, має автоколивальний характер [6, 207] і викликане аеродинамічною нестійкістю труби. Вона виникає при критичній швидкості вітру, коли від'ємне аеродинамічне демпфування переважає над додатнім демпфуванням, зумовлене внутрішнім тертям у циліндрі.

Силу аеродинамічного демпфування [123, 206] представляють у вигляді суми двох доданків, із яких перший діє у фазі з рухом і пропорційний переміщенню системи, а другий зсунутий відносно руху на $\pi/2$ і пропорційний швидкості коливань.

Важливим параметром є довжина тіла, а також форма частини перерізу, розташованої нижче точок відриву, оскільки ця кормова частина конструкції безпосередньо піддається дії вихрового збудження. Довга кормова частина або заважає утворенню вихорів у сліді, або сприяє приєднанню потоку, що відділився, до поверхні, а потім відриву вниз за потоком.

Турбулентний потік і зміна швидкості за висотою суттєво впливають на коливання при вихровому збудженні і ведуть до такого:

- ефективна частота вихорів змінюється за висотою труби залежно від градієнту середньої швидкості;

- турбулентний потік порушує регулярність поширення вихорів;
- кореляція вздовж металевої труби порушується градієнтом швидкості і турбулентності.

Внаслідок цього аеродинамічні сили стають довільними і менш ефективними.

Для визначення природи і величини збуджувальної сили, що діє при відриві вихорів, виконані широкі експериментальні дослідження, які наразі ще не завершені, і величину цієї сили доводиться оцінювати за наближеними залежностями.

Явище резонансу, що спостерігається при коливанні металевої труби в потоці вітру, може пояснюватися при розгляді труби як автоколивальної системи. У системі металева труба – потік слід розрізняти: підсилювач коливань – вихори, що виникають при обтіканні труби потоком; обмежувач наростання коливань – характеристика затухання в системі.

Металева труба, що коливається, – це елемент системи, що задає частоту коливань. За відсутності вітру металева труба здатна здійснювати лише власні коливання, що затухають.

Вихори пов'язують основну коливальну систему з джерелом енергії – вітровим потоком. При цьому коливання металевої труби впливають на утворення вихорів, нав'язуючи свій період процесу в потоці, що обтікає трубу. Такий зворотний вплив, характерний для будь-якої автоколивальної системи, називають зворотним зв'язком.

Таким чином, режим, що встановлюється у системі металева труба – вітровий потік, зумовлюється швидкістю потоку і характеристикою затухання коливань металевої труби.

Останнім часом за технологічними вимогами і задля більшої стійкості димові труби часто розташовують в ряд або групою (рис. 1.24).

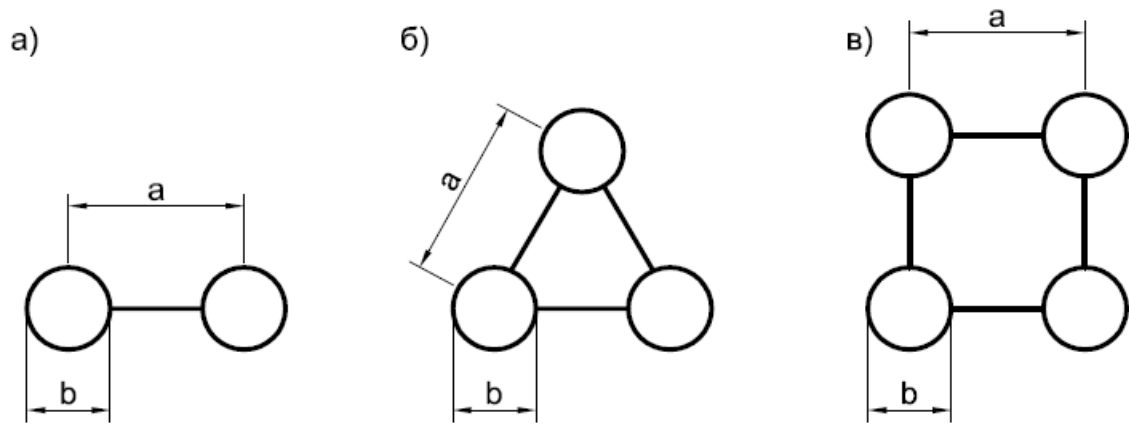


Рисунок 1.24 – Розташування труб у ряд або групою

Таке розташування труб залежно від відстаней між ними може збуджувати автоколивання в аеродинамічному сліді і призводити до вихрового резонансу [25].

Цікавими є дані експериментальних досліджень поведінки пакета з трьох труб залежно від зміни відстані між трубами і кута атаки вітрового потоку [2].

Відповідно до нормативного документа [101], вітрове навантаження на металеві димові труби і несучі вежі розглядається як сукупність:

а) нормального тиску, прикладеного до зовнішньої поверхні споруди;

б) сил тертя, спрямованих по дотичній до зовнішньої поверхні і віднесених до площі її горизонтальної або вертикальної проекції;

в) нормального тиску, прикладеного до внутрішніх поверхонь будівлі чи споруди з проникними огорожами, відкритими отворами чи отворами, що відкриваються.

Дія вітрового потоку на конструктивні елементи несучих веж, виготовлених з прокатних перерізів, перерахованих вище, суттєво відрізняється від впливу на елементи трубчатого перерізу.

Несучі елементи веж (пояси, розкоси і розпірки, елементи діафрагм) часто виготовляються з прокатних парних кутиків, швелерів, двотаврів, гнutoзварних прямокутних перерізів. Для перерізів, що мають кутові точки

(прокатні профілі), на відміну від кругового циліндру, аеродинамічні коефіцієнти практично не залежать від чисел Рейнольдса внаслідок того, що кутові точки фіксують місця зриву потоку.

Різні поперечні перерізи мають характеристичні значення числа Струхаля, що змінюються залежно від положення перерізу відносно напрямку потоку і від числа Рейнольдса. Утворення вихорів буде добре корельованим у прольоті, тому збудження буде більш сильним і більш узгодженим, ніж у випадку кругового перерізу, в якому відрив потоку визначається числом Рейнольдса.

При певних швидкостях вітру в гнучких просторових конструкціях з елементами з вищеперерахованих профілів виникає явище галопування, пов'язане з аеропружною нестійкістю таких тіл. Коливання такого типу виникають у площині, перпендикулярній до напрямку вітру, і зберігають свою інтенсивність навіть при незначній турбулентності потоку, що набігає. Це явище аеродинамічного збудження вивчали на основі квазістаціонарної моделі Ден-Гартог, Паркінсон [207], Новак і Девенпорт [205, 206].

У квазістаціонарній моделі миттєві аеродинамічні сили, що діють на тіло, яке коливається в потоці вітру, беруться такими самими, як і для нерухомого тіла, обтічного потоком з відносною швидкістю, що дорівнює геометричній сумі швидкості встановленого потоку і швидкості поперечних коливань системи. Галопування виникає при формах поперечного перерізу, які мають фіксовані точки відриву. Як і при вихровому збудженні, частоти галопуючих збуджень близькі до власних. Якщо при вихровому збудженні інтенсивні коливання виникають у певних інтервалах швидкостей вітру, то галопування відбувається при всіх швидкостях, що визначаються конструкційним демпфуванням.

Галопування вежі у гладкому потоці детально розглянуто в [205].

Теоретичний аналіз [15] показує, що для всіх конструкцій, які мають певний вид поперечного перерізу, однакові власні форми, але довільну масу і затухання, стаціонарні амплітуди можуть бути описані універсальною

кривою. Координати кривої не залежать від аеродинамічних поперечних сил. Цей факт дозволяє побудувати універсальну криву реакції конструкції вежі експериментально на основі вимірюваних стаціонарних амплітуд коливань аеропружної моделі, не визначаючи при цьому аеродинамічні сталі поперечного перерізу.

Відповідно до нормативних документів [101] аеродинамічні коефіцієнти для елементів ґратчастих конструкцій металевих веж із прокатних профілів (кутик, швелер, двотавр) визначаються залежно від кута атаки вітрового потоку і гнучкості елемента.

1.5.4. Динамічні вітрові навантаження на труби і вежі

Фактичну швидкість вітрового потоку в даний момент часу можна представити як середню швидкість вітру і пульсаційну швидкість, яка перетворює вітровий потік на динамічне навантаження. Зусилля і переміщення елементів металевих труб і веж під дією вітрового навантаження визначаються окремо від статичної складової і динамічної складової.

В якості розрахункової схеми для димових труб і веж, при визначенні динамічної складової береться затиснений в основі консольний стрижень постійного чи змінного за висотою перерізу [101] і розраховується для кожної форми коливань у вигляді системи інерційних сил, прикладених до середини ділянок, на які умовно розбирається споруда [102].

Для металевих димових труб і несучих веж граничного значення власної частоти f_{lsm} , як правило, менше першої власної частоти коливань f_1 , Гц і на практиці, для визначення вітрового навантаження допускається враховувати лише першу форму власних коливань. При розрахунку споруд допускається враховувати динамічну реакцію по трьом нижчим власним формам коливань (двом згинальним, одній крутильній або змішаній крутильно-згинальній).

Коефіцієнт просторової кореляції пульсацій вітрового тиску залежить від розрахункової поверхні труби або вежі, чи окремих конструкцій, для котрих враховується кореляція пульсацій. Розрахункова поверхня включає в себе ті частини навітряних та підвітряних поверхонь, з яких тиск вітру передається на розрахунковий елемент конструкції.

До чинних вітчизняних нормативних документів [101] внесені зміни при визначенні коефіцієнта динамічності вітрового навантаження порівняно з попередньою редакцією [102], де вітрове навантаження розглядалось як сума середньої і пульсаційної складової. Коефіцієнт динамічності для димових труб і несучих веж визначається залежно від їх висоти і діаметра (ширини).

Відповідно до діючих норм [101] характеристичні (нормативні) значення вітрових навантажень відрізняються від проектних величин, визначеними за попередніми нормами [102] на 30 – 40%.

1.5.5. Ожеледно-вітрові навантаження на труби і вежі

Ожеледні (ожеледно-вітрові) відкладення на металевих конструкціях утворюються з таких трьох причин [39]:

- замерзання мокрого снігу;
- осідання і замерзання переохолоджених крапель за наявності туману, мряки або дощу;
- сублімація водяної пари.

Вид ожеледних утворень залежить від розмірів водяних крапель і швидкості їх замерзання при зіткненні з конструкціями. Спектр розмірів крапель у природі є вельми широким, і на конструкціях можуть виникати ожеледні утворення, що складаються з кількох видів або нашарувань. Такі ожеледні утворення називаються складними. Середня щільність такої суміші може коливатися у широких межах, оскільки залежить від того, який вид льоду переважає.

Натурні форми ожеледно-паморозевих відкладень можуть бути дуже різноманітними [14].

На виникнення ожеледних відкладень на металевих конструкціях, окрім перерахованих метеорологічних умов (температура, вологість, опади) впливають такі чинники:

- висотне розташування елементів;
- розміри поперечного перерізу елементів – діаметр, ширина, висота;
- швидкість і напрямок вітру;
- характер місцевості поряд зі спорудою – степ, водойм, населений пункт [14].

Під час експлуатації металевих димових труб і несучих веж ожеледно-вітрові навантаження враховують як сукупність ваги ожеледних відкладень і нормального тиску вітру на елементи, покриті ожеледдю.

Металеві димові труби під час роботи мають більш високу температуру поверхні порівняно з температурою зовнішнього повітря, що перешкоджає ожеледному відкладанню на їхній поверхні. Тобто, при експлуатації металевих димових труб ожеледні навантаження практично не впливають на їх напружено-деформований стан і тримальну здатність.

Ожеледні відкладення на поверхні вентиляційних труб великого діаметра незначно збільшують зовнішній діаметр труб, що призводить до короткочасного незначного збільшення вітрового навантаження. Вертикальне короткочасне навантаження від ваги ожеледних відкладень на поверхні труб також практично не впливає на напружено-деформований стан труби.

Таким чином, ожеледні 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 1-2% власної ваги труби.

Для елементів конструкцій веж більшого перерізу (понад 70 мм) ожеледно-вітрові навантаження суттєво не впливають на їхній напружено-деформований стан. Згинальної жорсткості елементів круглого перерізу більшого діаметра достатньо для сприйняття згину від ожеледно-вітрового навантаження без виникнення суттєвого прогину і додаткового напруження. Для елементів веж круглого перерізу невеликого діаметра (до 70 мм) ожеледно-вітрові навантаження враховують при визначенні напружень у цих елементах, оскільки вони мають незначну згинальну жорсткість. Вага обледеніння, рівномірного по довжині (в основному на горизонтальних розпірках) і додаткове вітрове навантаження (за рахунок збільшення перерізу) викликають в елементі згинальний момент.

На основі аналізу перерізів тримальних елементів обстежених веж можна зробити висновок, що всі перерізи елементів значно більші за 70 мм. Перерізи, менші за 70 мм, застосовуються тільки для елементів шпренгелів або огорожувальних конструкцій.

Результати обстежень технічного стану елементів несучих веж підтверджують вищесказане, оскільки суттєвих пошкоджень від ожеледно-вітрового навантаження не виявлено.

Відповідно до вимог нормативних документів при проектуванні повітряних антенно-мачтових пристроїв та інших подібних споруд, необхідно враховувати ожеледні навантаження з граничними або експлуатаційними розрахунковими значеннями як змінні короткочасні навантаження [101].

1.5.6. Снігові навантаження на висотні споруди

Снігове навантаження на вертикальні металеві димові труби практично відсутнє. Під час роботи температура стовбура металевої димової труби достатньо висока, і сніг на елементах драбин і гарнітури тоне.

Настил світлофорних майданчиків і майданчиків для відпочинку при піднятті на труби виготовляють із круглої арматури діаметром 10-12 мм, відстань між стрижнями арматури 50-70 мм, що не дозволяє снігу накопичуватися на майданчиках. Вітер також здуває сніг з горизонтальних елементів димових труб.

Для майданчиків ґратчастих наскрізних витяжних веж снігові навантаження враховуються при розмірі майданчиків понад 15 м² [149]. Однак майданчики витяжних веж виявляються частково захищеними від прямої дії вітру газовідвідним стовбуром, що може викликати накопичення снігу на них. Тому при розрахунку майданчиків діафрагм витяжних веж снігові навантаження враховуються незалежно від величини площі майданчика і поширюються на покриття настилом поверхню діафрагми.

Згідно з чинними нормами [101] снігове навантаження є короткочасною змінною.

1.5.7. Типи впливів на металеві димові труби і їх несучі вежі

Протягом усього життєвого циклу експлуатації металеві димові труби і несучі вежі знаходяться під спільним дією різноманітних впливів. Це силові, динамічні, корозійні, температурні впливи, експлуатаційні механічні впливи.

До силових впливів відносяться експлуатаційні силові фактори.

До корозійних впливів – атмосферні впливи на зовнішню поверхню висотних споруд, а також димових і вентиляційних газів на внутрішню поверхню димових і вентиляційних труб.

До температурних впливів належать впливи від газів продуктів згоряння або хімічних процесів, сонячної радіації, добових коливань температури, кліматичних змін.

До динамічних впливів відносяться пульсаційний тиск вітрового потоку і зусилля, викликані власними коливаннями конструкцій .

До експлуатаційних механічних впливів належать механічні пошкодження конструкцій під час ремонту або експлуатації, пов'язані з людським фактором.

У життєвому циклі експлуатації висотних споруд і устаткування можна виділити такі етапи: монтаж, випробування, пуск в експлуатацію, стаціонарний режим, регулювання параметрів, аварійні ситуації, спрацювання захисту і зупинка.

На кожному з цих етапів основні параметри загальних експлуатаційних навантажень істотно відрізняються. На рис. 1.25 представлена схема навантаження на різних етапах експлуатації, а саме відображено взаємозв'язок експлуатаційного навантаження силовими p і температурними впливами t та напруженнями σ , що виникають при цьому на різних етапах усього періоду експлуатації висотної споруди.

Найбільші силові впливи p виникають на етапах запуску-наладки технологічного обладнання та при аваріях, температурні впливи t найбільші при аваріях, найбільші напруження σ – при аваріях та спрацюванні захисту.

1.5.8. Силові експлуатаційні впливи на висотні споруди

Силові експлуатаційні впливи належать до змінних тривалих або короткочасних навантажень [101].

У процесі налаштування і випробування устаткування у димових трубах може виникати короткочасний непроектний внутрішній тиск (розрідження або надлишковий тиск). Тиск газів, що відводяться, у стовбурі при роботі димової труби є силовим впливом, що визначається за результатами аеродинамічних розрахунків газовідвідних трактів.

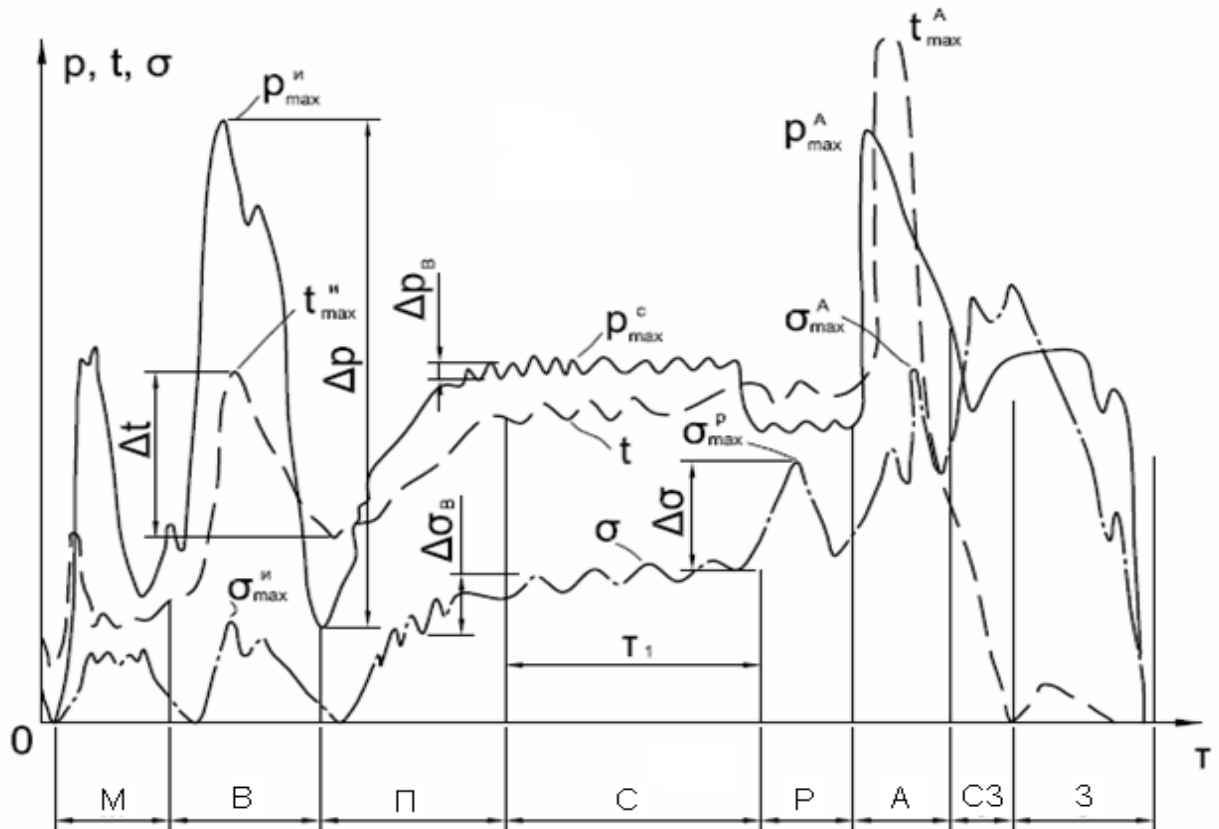


Рисунок 1.25 – Етапи експлуатаційного навантаження:

М – монтаж; В – випробування; П – пуск в експлуатацію;
 С – стаціонарний режим; Р – регулювання параметрів;
 А – аварійна ситуація; СЗ – спрацювання захисту; З – зупинка.

Силкові впливи p 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 роботі, а температури t в аварійних ситуаціях перевищують температури стаціонарного режиму в 1,5 рази і більше (рис. 1.25).

Вага твердих відкладень на стінках труб (рис. 1.26), вага відкладень пилу на горизонтальних поверхнях труб, на світлофорних і робочих майданчиках, вага конденсату враховуються як рівномірно поширені на площі.



Рисунок 1.26 – Відкладення пилу на оголів'ї труби

За результатами досліджень встановлено, що вага відкладень на стінках і горизонтальних елементах труб не перевищує 1-3% власної ваги (постійних навантажень). Однак вони можуть суттєво зменшувати переріз труби і погіршувати тягу, збільшувати силовий вплив за рахунок зростання тиску газів, що відводяться.

1.5.9. Корозійні впливи на металеві димові труби і несучі вежі

Протягом усього періоду експлуатації елементи металевих димових труб і несучих веж піддаються дії безперервних корозійних впливів (рис. 1.27).

Із загальної вибірки дефектів і пошкоджень, виявлених при обстеженні, кількість дефектів, викликаних корозійним впливом, є найбільшою.

Навантажені поверхні стовбурів металевих димових і вентиляційних труб піддаються постійним корозійним впливам від атмосферних впливів, внутрішня поверхня піддається корозійному впливу димових газів [33, 41, 43].

Інтенсивність корозійних процесів залежить передусім від атмосферних впливів, від парціального тиску водяної пари і відносної

вологості, і від агресивності і температури димових і витяжних газів усередині труби [57, 135].

Конструкції несучих веж піддаються атмосферним впливам на зовнішні поверхні елементів.

Металеві конструкції димових труб і несучих веж піддаються в основному електрохімічній корозії. Електрохімічна корозія буває двох типів – корозія в електролітах (підведення рідини до поверхні металу необмежене) і атмосферна корозія (електроліт присутній у вигляді тонкої плівки вологи на поверхні металу).



а)



б)



в)

Рисунок 1.27 – Корозійні пошкодження димових труб:

- а) від атмосферних впливів на зовнішню поверхню труби;
- б) від атмосферних впливів і впливів димових газів;
- в) від впливу димових газів на внутрішню поверхню труби.

1.5.10. Температурні впливи на димові труби

Димові труби за весь життєвий цикл піддаються постійним температурним впливам – від димових газів, що евакуюються, сонячної радіації при однобічному нагріванні, добових коливань температур, кліматичних змін [32, 62, 150].

Температурні перепади у стовбурі димової труби викликають як окремі джерела, так і їхня сукупна дія.

На стовбури металевих димових труб температурні напруження здійснюють не такий суттєвий негативний вплив, як на цегляні

чи залізобетонні, за винятком випадків прогорання футеровки або впливу низьких температур при використанні киплячої сталі.

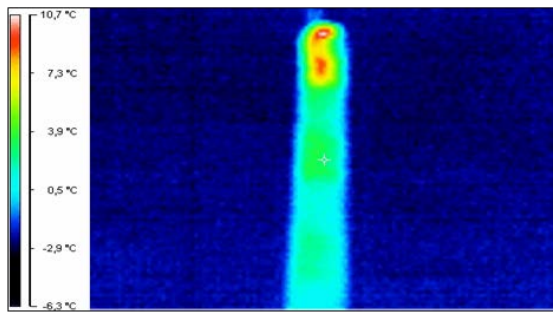
Також існує різновид температурно-силового впливу, викликаний вибухом горючої суміші у стовбурі труби (так званий «хлопок»), з утворенням великої кількості пошкоджень у футеровці (рис. 1.28).



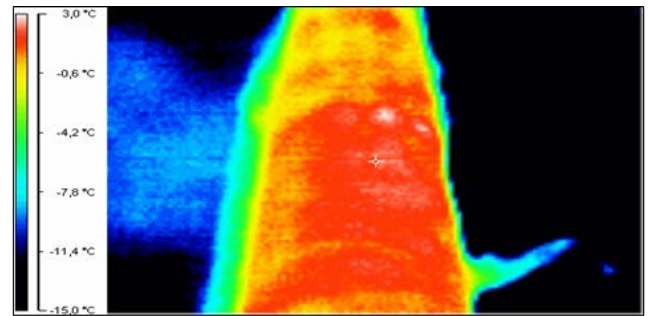
Рисунок 1.28 – Пошкодження футеровки стовбура після вибуху
горячої суміші у трубі («хлопка»)

В аварійній ситуації температурні впливи досягають максимальних значень за весь час експлуатації і температура газів можуть у декілька разів перевищувати температуру газів при стаціонарному режимі (рис. 1.29). Із загальної вибірки пошкоджень футеровки димових труб ушкодження, викликані температурними впливами, складають 50%.

Ці руйнування футеровки добре спостерігаються за допомогою тепловізора (рис. 1.29).



а)



б)

Рисунок 1.29 – Термограми пошкоджень футеровки труб:

- а) у рівні оголів'я;
- б) посередині труби

1.5.11. Експлуатаційні механічні впливи

Разом з вищеперерахованими впливами, за життєвий цикл металеві димові і вентиляційні труби, несучі вежі піддаються й експлуатаційним механічним впливам, пов'язаним із людським фактором. Металеві димові і вентиляційні труби, несучі вежі багаторазово піддаються поточним і капітальним ремонтам.

За даними результатів обстежень технічного стану висотних споруд виявлені численні пошкодження металевих конструкцій від механічного впливу, отримані під час виконання ремонтних робіт.

До таких пошкоджень належать (рис. 1.30):

- вирізи і підрізи опорних ребер баз димових труб;
- розрізи в опорних плитах баз труб;
- вирізи анкерних болтів кріплення труб до фундаментів;
- демонтаж гайок на анкерних болтах;
- демонтаж елементів металевих несучих веж.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.30 – Дефекти металевих труб від експлуатаційних механічних впливів:

- а) вирізи в опорних ребрах баз димових труб;
- б) розрізи в опорних плитах баз труб;
- в) гайки на анкерних болтах демонтовані;
- г) вирізи анкерних болтів кріплення труб до фундаментів.

Усі ці пошкодження мають експлуатаційний механічний характер і зумовлені низьким технічним рівнем персоналу, що проводить ремонтні роботи, і недостатнім контролем ремонтних робіт з боку організації, що експлуатує конструкцію. На жаль, такі експлуатаційні механічні пошкодження при обстеженні виявляються досить часто.

Із загальної вибірки дефектів і пошкоджень металевих димових і вентиляційних труб пошкодження експлуатаційно-механічного характеру складають 9%.

1.6. Історичний огляд досліджень роботи димових труб та їх несучих веж

Дослідження роботи металевих димових труб під дією різних навантажень та впливів проводяться з середини XVIII сторіччя.

Вітрові навантаження для димових труб є домінантними порівняно з іншими навантаженнями і дослідження їх дії на споруди триває близько 300 років. Теоретичні дослідження в галузі газу і рідини започаткували Леонард Ейлер і Даніелем Бернуллі ще у XVIII столітті. Леонард Ейлер (1707 – 1783 рр.) вивів рівняння рівноваги і руху газів і рідини, визначив деякі інтеграли цих рівнянь і сформулював закон збереження маси стосовно рідкого тіла. Даніель Бернуллі вивів термін «гідромеханіка», встановив зв'язок між питомими енергіями (потенційною і кінетичною) під час руху рідини, так зване рівняння Бернуллі. Також, Леонард Ейлер започаткував методи розрахунку на стійкість металевих циліндрів.

Досвід показав, що рівняння руху, складені Ейлером і Бернуллі, не відображають усього комплексу сил, що діють у реальному середовищі при його русі, і мають бути доповнені членами, що враховують сили в'язкості. Основи вчення про рух в'язкої рідини були закладені французьким вченим Луї М.А. Нав'є (1821 р.) і були завершені в роботах Джорджа Г. Стокса (1848 р.). Явище переходу ламінарної течії в турбулентну було досліджено в період 1876 – 1883 рр. англійським фізиком Осборном Рейнольдсом [82]. Рейнольдс установив критерії переходу від ламінарної до турбулентної течії, що носять його ім'я. Також О. Рейнольдс вивів диференціальні рівняння усередненого турбулентного руху рідини.

Д.І. Менделєєв у 1880 р. опублікував монографію «Про опір рідин і повітроплавання», яка стала фундаментальною монографією в цій галузі.

Професор МВТУ М.Є. Жуковський у 1902 р. побудував аеродинамічну трубу для випробування взаємодії тіл з потоком газу. Пізніше на основі лабораторії був створений ЦАГІ.

У 1904 р. відомий гідродинамік Людвіг Прандтль заклав основи теорії граничного шару [121].

Посутній внесок у теорію граничного шару зробили Теодор фон Карман і Карл Польгаузен. Теорія граничного шару дала пояснення істотного для практики явища відриву потоку від поверхні тіла. Великий внесок у розвиток напівемпіричних методів розрахунку турбулентного граничного шару зробили вчені Л.І. Сєдов [128], Л.Г. Лойцянский [82], В.С. Авдуєвський, В.М. Євлєв.

Перші роботи з розрахунку турбулентного граничного шару на рівні диференціальних рівнянь Рейнольдса із залученням напівемпіричних гіпотез А.І. Колмогорова належать Г.П. Глушко.

У книзі американських авторів доктора Е. Сіміу і професора Р.Х. Сканлана «Впливи вітру на будівлі і споруди» [129] показані приклади залежності вітрового навантаження і його розподілу при дії на будівлі і споруди від швидкості вітру.

Особливо цікавими є дослідження, проведені в Інституті будівельних конструкцій (BRI) і Національному інституті керування ґрунтами й інфраструктурою (NILIM), пов'язані з розробкою стратегії аналізу вітрових навантажень будівель і висотних споруд з урахуванням вимог необхідної міцності і технічної надійності [209]. У практичному аспекті цікавими є розрахунково-теоретичні дослідження вібрації, викликані вітровими навантаженнями конструкцій веж змінного перерізу великої висоти [200].

Джон Холмес і Пітер Паєвере на початку 90-х років минулого століття розробили методику розрахунку реакції веж, що стоять окремо, на дію вітру [199].

Реакцію сталюї наскрізної вежі змінного перерізу на дію вітрових навантажень поділяють на три частини: статичну, реакцію на порив вітру і

резонансну складову. При цьому враховується тільки перша форма коливань. Досліджено вплив параметрів форми вежі на згинальні моменти і поперечні сили від вітрових навантажень.

Багато експериментальних досліджень по характеру вітрових навантажень і динамічному стану димових труб і несучих веж наведені у [202]. Розглянуто приклади руйнування димових труб і веж. Надано результати вимірів вітрового потоку і розроблено методику їх визначення.

Нині продовжуються активні теоретичні й експериментальні роботи по вивченню вітрового впливу на висотні споруди, спрямовані на уточнення фактичної роботи висотних споруд під дією вітрового навантаження, оцінку їх довговічності і надійності під дією динамічного навантаження.

Великий внесок у дослідження проблеми вивчення аеродинамічних характеристик потоку для одиночної труби і для труб, розміщених на невеликій відстані одна від одної, зробили автори книг Роуч П. [122], Takami Н. [210], В.А. Гущин і В.Н. Коньшин [34], М.Ф. Барштейн [6], В.А. Локшин [83], А.П. Ортанський [111], Ф.П. Казакевич [63], В.Ф. Юдин і Л.С. Тохтарова, А.І. Цейтлін, І.М. Рабінович.

Під дією вітрових динамічних навантажень в металевих конструкціях може виникнути втомне руйнування і значні дослідження в його визначенні зробили відомі вчені як М.А. Махутов [90, 91], М.П. Мельников [25], В.С. Гиренко [22], П.І. Кудрявцев [78], J.P. Gallagher [197].

Температурні впливи на димові труби мають великі значення для забезпечення надійної експлуатації і дослідженню температурних впливів на метал руб зробили відомі вчені В.М. Горицький [26], І.А. Шишков [164], С.С. Менсон [100], В.І. Янкелевич [190].

За тривалий час експлуатації на металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі корозійні пошкодження суттєво впливають на їх довговічність. Дослідження процесів корозії в металах та інших конструкційних матеріалах виконували С.М. Алексеєв, В.І. Бабушкін, З.Я. Бліхарський [9], Д.А. Гофрейд [30], Є.А. Гузеєв, Р.С. Зайнулін [40, 43], Ф.М. Іванов, В.П.

Корольов, Й.Й. Лучко [84], В.М. Москвін, О.П. Мchedlov-Петросян, В.П. Осоловский [17], В.В. Панасюк [114], В.І. Похмурський, П.В. Ясній і інш.

Проектуванню та розвитку методів розрахунку металевих конструкцій, до яких відносяться і димові труби та їх несучі вежі, присвятили свої дослідження такі відомі вчені, як В.А. Балдін, Є.І. Беленя, О.М. Генієв, А.М. Єльшин [57], Я.М. Ліхтарніков, К.К. Муханов, М.Б. Солодар [131], М.С. Стрелецький [17], В.В. Фурсов і др.

Великий внесок в визначенні дійсної роботи металевих конструкцій зокрема і димових труб та їх несучих веж, визначенні навантажень на ці споруди, в розробці сучасних методів їх розрахунку зробили українські вчені: С.І. Білик, Г.Л. Ватуля [17], В.М. Гордєєв [25], В.В. Кулябко, М.І. Казакевич, Л.І. Стороженко, О.В. Шимановський,

1.7. Надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж

Забезпечення надійності є одним із основних завдань при проектуванні, будівництві і експлуатації будівель та споруд.

В останній час проблеми надійності для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж здобула особливу значимість в зв'язку з великою кількістю випадків аварій на промислових підприємствах в Україні та закордоном.

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

Визначаюче значення при оцінці надійності димових і вентиляційних труб і їх несучих веж має вихідна інформація про геометричні

характеристики конструкцій, дійсні навантаження та розподіл зусиль, інформація про технічний стан та виявленні дефекти та пошкодження, чутливість металу конструкцій до динамічних, температурних і корозійних впливів і т.п.

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

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

Розвитку сучасних методів розрахунку і забезпеченню надійності будівельних конструкцій, будівель і споруд присвятили свої праці відомі вітчизняні вчені такі як М.С. Барабаш [5], О.П. Воскобойнік [19], О.С. Городецький, Є.А. Єгоров, А.І. Лантух-Лященко [25], А.В. Перельмутер [25], С.Ф. Пічугін [25], В.А. Пашинський [113], М.В. Савицький [125], Т.В. Нікіфорова [107], В.О. Семко [127], О.В.Семко [128] і інш.

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

1.8. Висновки по розділу 1

1. Проведений аналіз та узагальнення характеристик вентиляційних і димових труб, їх несучих ґратчастих веж залежно від технологічного призначення, параметрів газів, що відводяться, і методів монтажу.

2. Запропоновано класифікацію димових і вентиляційних труб і несучих веж відповідно до конструктивного рішення, обрису, типу сполучення елементів, типу спирання стовбурів, технологічного призначення, сприйняття динамічного вітрового впливу.

3. Проведено аналіз основних вузлів і сполучень елементів висотних споруд, де виникає найбільша кількість пошкоджень протягом життєвого циклу, а також виконано аналіз передавання навантажень з різних елементів металевих димових і вентиляційних труб на несучі вежі.

4. На основі аналізу виконаних досліджень, а також нормативних документів обґрунтовано вимоги міцності, корозійної стійкості за високих температур, ударної в'язкості при виборі матеріалів для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.

5. Виконано класифікацію різноманітних навантажень і впливів на металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі, проведено аналіз природи їх виникнення, визначено основні параметри силових, корозійних, температурних і експлуатаційно-механічних впливів на металеві димові труби і несучі вежі які потрібно враховувати при аналізі надійності металевих димових труб і несучих веж після тривалого терміну експлуатації.

6. На основі аналізу проведених досліджень сформульована мета і задачі даних досліджень, які наведені у вступі.

1.9. Список використаних джерел у розділі 1

Список використаних джерел у розділі 1 наведено у загальному списку використаних джерел [1, 2, 4, 5, 6, 9, 14, 15, 20, 21, 25, 29, 33, 34, 39, 41, 43, 51, 55, 57, 63, 82, 84, 85, 94, 101, 102, 111, 113, 114, 119, 121, 122, 123, 128, 129, 131, 132, 133-140, 148, 149, 151, 162, 193, 199, 200, 202, 205, 206, 207, 209, 210, 211].

РОЗДІЛ 2. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБ І НЕСУЧИХ ВЕЖ

2.1. Напружено-деформований стан стиснуто-згинаної димової труби

Металева димова труба перебуває під дією внутрішнього і зовнішнього тисків, розподілених по бічній поверхні, і поздовжніх стискаючих навантажень. Зовнішнім тиском на трубу є вітрове навантаження, внутрішнім тиском – надлишковий тиск димових газів; поздовжнім стискаючим навантаженням є власна вага труби (рис. 2.1).

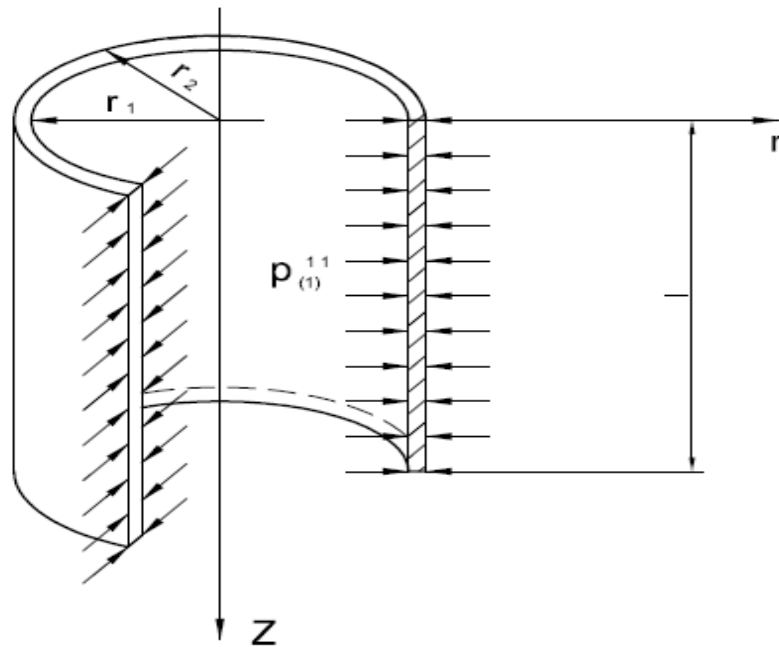


Рисунок 2.1 – Горизонтальні навантаження, що діють на трубу

Розмірами димової труби: l – довжина, r_1 , r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси.

Горизонтальні навантаження, що діють на трубу, задано у вигляді закону

$$p_{(\gamma)}^{1i} = p_{(\gamma)}^{1i}(\theta z) \quad (\gamma = 1, 2), \quad (2.1)$$

або

$$P_{(\gamma)}^{1i} = P_{(\gamma)}^{1i}(\theta z t). \quad (2.2)$$

Для визначення напружено-деформованого стану стиснуто-згинаної димової труби використовуємо метод розв'язання просторової задачі механіки деформованого твердого тіла, запропонований М.М. Філоненко-Бородичем [152, 153, 154], способи побудування основного і коригувального тензорів для пружно-пластичних тіл при малих і кінцевих деформаціях.

При деформації в середині тіла виникають напруження. Напружений стан тіла характеризується тензором напружень (σ). Виділимо із деформованого тіла деякий довільний об'єм V^* , обмежений поверхнею S^* і розглянемо на цій поверхні нескінченно малу поверхню dS^* , орієнтація якої визначається одиничним вектором n зовнішньої нормалі до поверхні. Тіло знаходиться під дією зовнішніх об'ємних сил F і поверхневих сил $p_{(n)}$. Сили розподілені на частині S_1 поверхні, на решті її частини S_2 задані переміщеннями $u^i(S) = u_s^i$. Для опису процесу деформації тіла з плином часу вводяться вектор швидкості v частинок з компонентами v_*^i і тензор швидкостей деформацій $\dot{\epsilon}$ з компонентами $\dot{\epsilon}_{ij}$.

Основними вихідними характеристиками деформованого твердого тіла є тензор напружень (σ), вектор швидкості руху (v), щільність тіла (ρ).

Компоненти цих характеристик мають задовольняти:

- визначальним рівняннями (фізичні співвідношення), характерним для розглядуваного тіла:

- рівнянню руху

$$\nabla_j \sigma_*^{ij} + F_*^i = \rho \frac{dv_*^i}{dt}; \quad (2.3)$$

- рівнянню нерозривності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_i (\rho v_*^i) = 0; \quad (2.4)$$

- рівнянню сумісності деформацій

$$\Delta_k^{ij} \Delta_\beta^{lk} \nabla_l \nabla_i \varepsilon_{j\alpha} = 0, \quad (2.5)$$

або швидкостей деформацій

$$\Delta_k^{ij} \Delta_\beta^{lk} \nabla_l \nabla_i \dot{\varepsilon}_{j\alpha} = 0; \quad (2.6)$$

При цьому визначальними рівняннями (фізичні співвідношення), характерним для розглядуваного тіла, буде

- початковим умовам при $t=t_0$

$$\sigma_*^{ij} = \sigma_0^{ij}, \quad \rho = \rho_0, \quad v_*^i = v_0^i, \quad u^i = u_0^i; \quad (2.7)$$

- граничним умовам (умовам на поверхні тіла S), що можуть бути задані або в напруженнях на поверхні S

$$\sigma_*^{ij} n_j = p_*^i(n), \quad (2.8)$$

або у переміщеннях на S

$$u^i(S) = u_s^i, \quad (2.9)$$

або у швидкостях

$$\dot{u}^i(S) = \dot{u}_s^i, \quad (2.10)$$

або на частині S_1 поверхні у напруженнях, а на частині S_2 – у переміщеннях чи швидкостях.

Рівняння сумісності деформацій (2.5) або швидкостей деформування (2.6) є наслідком варіаційних рівнянь принципу можливих змін напруженого стану для розглядуваного конкретного тіла. Для пружного тіла, як показав Саутуелл [127], рівняння сумісності деформацій є наслідком варіаційного рівняння принципу Кастільяно.

Рівняння руху (2.3) і рівняння нерозривності (2.4) еквівалентні тензорному рівнянню в чотиривимірному просторі x^α ($\alpha=1, 2, 3, 0$).

При цьому, беручи до уваги, що

$$\frac{dv_*^i}{dt} = \frac{\partial v_*^i}{\partial t} + v_*^j \nabla_j v_*^i, \quad (2.11)$$

рівняння (2.3) переписується у вигляді

$$\nabla_j \sigma_*^{ij} + F_*^i = \rho \frac{\partial v_*^i}{\partial t} + \rho v_*^j \nabla_j v_*^i. \quad (3.12)$$

Оскільки

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_*^i) = \rho \frac{\partial v_*^i}{\partial t} + v_*^j \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (2.13)$$

то, враховуючи (2.6), було отримано

$$\rho \frac{\partial v_*^i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho v_*^i) + v_*^j \nabla_j (\rho v_*^i). \quad (2.14)$$

Підставляючи вираз (2.14) у рівняння руху (2.5), отримаємо

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_*^i) + \nabla_j (\rho v_*^i v_*^j - \sigma_*^{ij}) = F_*^i,$$

або

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v_*^i) + \nabla_j K_*^{ij} = F_*^i, \quad (2.15)$$

де компоненти симетричного тензора (K_*) визначаються за формулою

$$K_*^{ij} = \rho v_*^i v_*^j - \sigma_*^{ij}. \quad (2.16)$$

Для виявлення фізичного смислу цього тензора необхідно проінтегрувати рівняння (2.15) по об'єму V , вважаючи $F_*^i = 0$,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v_*^i dV + \int_V \nabla_j K_*^{ij} dV = 0. \quad (2.17)$$

Об'ємний інтеграл другого доданка за формулою Остроградського-Гаусса перетворимо на поверхневий, тоді

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho v_*^i dV + \int_S K_*^{ij} n_j dS = 0. \quad (2.18)$$

Перший інтеграл у (2.18) являє собою зміну в одиницю часу i -тої компоненти імпульсу в розглядуваному об'ємі, другий інтеграл, узятий по поверхні тіла S , визначає потік узагальненого імпульсу через поверхню, отже $K_*^{ij} n_j$ є i -тою компонентою узагальненого імпульсу, що протікає за одиницю часу через одиницю поверхні, перпендикулярну координатній лінії x_i . Тензор (K_*) є тензором щільності потоку узагальнених імпульсів.

Згідно [66] чотиривимірний тензор (T_*) узагальнених кінетичних напружень, визначаються матрицею

$$T = \begin{bmatrix} \rho v_*^1 v_*^1 - \sigma^{11} & \rho v_*^1 v_*^2 - \sigma^{12} & \rho v_*^1 v_*^3 - \sigma^{13} & \rho v_*^1 v_*^0 \\ \rho v_*^2 v_*^1 - \sigma^{21} & \rho v_*^2 v_*^2 - \sigma^{22} & \rho v_*^2 v_*^3 - \sigma^{23} & \rho v_*^2 v_*^0 \\ \rho v_*^3 v_*^1 - \sigma^{31} & \rho v_*^3 v_*^2 - \sigma^{32} & \rho v_*^3 v_*^3 - \sigma^{33} & \rho v_*^3 v_*^0 \\ \rho v_*^0 v_*^1 & \rho v_*^0 v_*^2 & \rho v_*^0 v_*^3 & \rho v_*^0 v_*^0 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Матриця T являє собою обрамлену матрицю тензора (K_*) , обрамлення складається з узагальнених імпульсів ρv_*^i і v_*^0 , а також щільності тіла $\rho v_*^0 v_*^0$. Компоненти тензора узагальнених кінетичних напружень є такі:

$$T^{ij} = \rho v_*^i v_*^j - \sigma^{ij}, \quad T^{i0} = \rho v_*^i v_*^0, \quad T^{00} = \rho v_*^{00} v_*^0. \quad (2.20)$$

Система рівнянь (2.4), (2.15) еквівалентна тензорному рівнянню в чотиривимірному просторі x^α ($\alpha = 1, 2, 3, 0$)

$$\nabla_\alpha T^{\alpha\beta} + F_*^\beta = 0, \quad F_*^0 = 0, \quad (2.21)$$

тут координати x^α ($\alpha=1, 2, 3, 0$) – просторові; координата $x=v_*^0 t$ – тимчасова; параметр v_*^0 має розмірність швидкості.

Геометрія 4-вимірного простору визначається метрикою

$$dl^2 = g_{ij} dx^i dx^j + (dx^0)^2, \quad (2.22)$$

де g_{ij} – компонента метричного тензора просторової системи координат x^i ; $g_{00} = \pm 1$, $g_{0i} = \pm 0$ в силу прямолінійності тимчасової координатної лінії та її ортогональності до координатних ліній просторової системи координат.

Рівняння руху (2.3) і рівняння нерозривності (2.4) рівнозначні тензорному рівнянню (2.21) у 4-вимірному просторі x^α , якщо в якості характеристик напруженого стану і руху взяти тензор узагальнених кінетичних напружень, компоненти якого визначаються формулами (2.20), а 4-вимірний простір характеризується метрикою (2.22). Структура рівняння (2.19) співпадає з рівнянням рівноваги.

При дослідженні пружно-деформаційного стану димової труби при динамічних навантаженнях необхідно побудувати циліндричний тензор кінетичних напружень (T) , побудований у циліндричній системі координат (r, θ, z, x^0) [146]. Відповідно до варіаційного методу тензор кінетичних напружень (T) можна представити у вигляді суми основного (T_0) і коригувального тензора (T_κ)

$$(T) = (T_0) + (T_\kappa), \quad (2.23)$$

побудова яких базується на використанні загального розв'язання рівнянь рівноваги фіктивного тіла

$$T^{\beta\alpha} = 2e^{\beta\alpha}(p) - 2(\nabla_\delta p^\delta + \varphi)g^{\beta\alpha} + \Lambda_\gamma^{\beta\delta} \nabla_\delta (\Lambda_\mu^{\alpha\nu} \nabla_\nu \Pi^{\mu\gamma}). \quad (2.24)$$

У циліндричних координатах розв'язання має вигляд [61]

$$\begin{aligned} T^{11} &= 2(\tilde{e}^{11}(p) - (\nabla_\delta p^\delta + \varphi)) - \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{3223} - \tilde{R}_{0220} - r^2 \tilde{R}_{0330}), \\ T^{22} &= 2\left(\tilde{e}^{22}(p) - \frac{1}{r^2}(\nabla_\delta p^\delta + \varphi)\right) - \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{3113} - \tilde{R}_{0110} - r^2 \tilde{R}_{0330}), \end{aligned}$$

$$T^{33} = 2(\tilde{e}^{33}(p) - (\nabla_\delta p^\delta + \varphi)) - \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{2112} - \tilde{R}_{0110} - r^2 \tilde{R}_{0220}), \quad (2.25)$$

$$T^{00} = 2(\nabla_\delta + \varphi) + \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{2112} - \tilde{R}_{3113} - r^2 \tilde{R}_{3223}),$$

$$T^{12} = 2\tilde{e}^{12}(p) - \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{1323} + \tilde{R}_{0210}), \quad T^{10} = 2\tilde{e}^{10}(p) - \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{0212} + r^2 \tilde{R}_{0313}),$$

$$T^{13} = 2\tilde{e}^{13}(p) - \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{2321} + r^2 \tilde{R}_{0310}), \quad T^{20} = 2\tilde{e}^{20}(p) + \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{0112} - \tilde{R}_{0323}),$$

$$T^{23} = 2\tilde{e}^{23}(p) + \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{1231} - \tilde{R}_{0320}), \quad T^{30} = 2\tilde{e}^{30}(p) + \frac{1}{2r^2}(\tilde{R}_{0113} - \tilde{R}_{0223}).$$

При розв'язанні у формі Морера функції $\tilde{R}_{\lambda\nu\mu\delta}$ визначаємо за формулами:

$$\tilde{R}_{1221} = -2\frac{\partial^2 \Pi_1}{\partial r \partial \theta}, \quad \tilde{R}_{3113} = -2\frac{\partial^2 \Pi_2}{\partial r \partial z}, \quad \tilde{R}_{3223} = -2\left(\frac{\partial^2 \Pi_3}{\partial \theta \partial z} + r\frac{\partial \Pi_2}{\partial z}\right),$$

$$\tilde{R}_{0110} = \frac{\partial^2 \Pi}{\partial r^2}, \quad \tilde{R}_{0220} = \frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial \theta^2} + r\frac{\partial \Pi_0}{\partial r}, \quad \tilde{R}_{0330} = \frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial z^2},$$

$$\tilde{R}_{0112} = -\left(\frac{\partial^2 \Pi_1}{\partial r \partial x^0} + \frac{1}{r}\frac{\partial \Pi_1}{\partial x^0}\right), \quad \tilde{R}_{0113} = -\frac{\partial^2 \Pi_2}{\partial r \partial x^0}, \quad \tilde{R}_{0313} = \frac{\partial^2 \Pi_2}{\partial z \partial x^0},$$

$$\tilde{R}_{3112} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\partial \Pi_3}{\partial r} - \frac{\partial \Pi_2}{\partial \theta} - \frac{\partial \Pi_1}{\partial z}\right) - \frac{1}{r}\left(\frac{\partial \Pi_3}{\partial r} + \frac{\partial \Pi_2}{\partial \theta} + \frac{\partial \Pi_1}{\partial z}\right), \quad \tilde{R}_{0212} = \frac{\partial^2 \Pi_1}{\partial \theta \partial x^0},$$

,

$$\tilde{R}_{3212} = \frac{\partial}{\partial \theta}\left(\frac{\partial \Pi_3}{\partial r} - \frac{\partial \Pi_2}{\partial \theta} - \frac{\partial \Pi_1}{\partial z}\right), \quad \tilde{R}_{0210} = -\left(\frac{\partial^2 \Pi_3}{\partial \theta \partial x^0} + r\frac{\partial \Pi_2}{\partial x^0}\right),$$

$$\tilde{R}_{3213} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial \Pi_3}{\partial r} + \frac{\partial \Pi_2}{\partial \theta} - \frac{\partial \Pi_1}{\partial z}\right) + \frac{2}{r}\frac{\partial \Pi_3}{\partial z}, \quad \tilde{R}_{0210} = \frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r}\frac{\partial \Pi_0}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 \Pi_1}{\partial x^{02}},$$

$$\tilde{R}_{0323} = \frac{\partial^2 \Pi_3}{\partial z \partial x^0}, \quad \tilde{R}_{0310} = \frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial r \partial z} + \frac{\partial^2 \Pi_2}{\partial x^{02}}, \quad \tilde{R}_{0320} = \frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial \theta \partial z} + \frac{\partial^2 \Pi_3}{\partial x^{02}},$$

де Π_i – функції напруженій Морера.

Для визначення напружено-деформованого стану димової труби скористаємося методикою запропонованою Є.Р. Мірошніченко [127]. Оскільки тиск вітру ззовні і газів зсередини труби постійно змінюються в

часі, і навантаження стовбура труби є динамічним, тензор напружень (σ) визначається за допомогою тензора кінетичних напружень (T)

$$(T) = (T_o) + (T_\kappa) \quad (2.26)$$

Побудування цих тензорів базується на використанні загального розв'язання рівнянь рівноваги в циліндричних координатах. Для побудови основного (T_o) і коригувального тензора (T_κ) для металевої димової труби необхідно визначення окремих функцій.

Функції навантажень $Q_{(\gamma)}^{\alpha\beta}$, що діють на трубу, при побудованні основного тензора (T_o) для координати r є такими:

$$Q_{(\gamma)}^{1i} = (\rho v^1 v^i)_{(\gamma)} - p_{(\gamma)}^{1i}, \quad Q_{(\gamma)}^{10} = (g v^1 v^0)_{(\gamma)}, \quad (2.27)$$

а для координати x^0 такими:

$$Q_{(1)}^{0i} = (g v^0 v^i)_1, \quad Q_{(1)}^{00} = g_0 v^0 v^0.$$

Із цього випливає, що на бічній поверхні труби, окрім зовнішніх навантажень $p_{(\gamma)}^{1i}$, необхідно задати компоненти вектора швидкості частинок v_i .

Основний тензор (T_o) для труби під дією на неї зовнішнього (вітровий потік) і внутрішнього (гази продуктів згоряння) тиску отримуємо використовуючи формули (2.22), підсумовуючи тензори $(T_o^{(1)})$ для самоврівноважених частин $\tilde{Q}_{(\gamma)}^{\alpha\beta}$ функцій навантажень і тензора $(T_o^{(2)})$ для несамоврівноважених частин $\tilde{Q}_{(\gamma)}^{\alpha\beta}$ функцій навантажень. В результаті послідовних перетворень і ітерацій визначаємо тензор кінетичних напружень (T).

Для труби зі змінною в часі товщиною обчислення ускладнюються тим, що потрібно враховувати закони зміни товщини $h(x^0)$.

2.2. Розрахунок на міцність і стійкість елементів металевих димових витяжних труб

Розрахунок металевих вентиляційних труб, що експлуатуються протягом багатьох років, виконують відповідно до нормативних вимог, що діють на момент обстеження [16, 135, 136].

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

Металеві димові труби мають постійну товщину ланок по висоті, і їхня геометрія визначається серединною поверхнею. Циліндричні і конічні оболонки є оболонками нульової кривини Гаусу.

Поверхні тонкостінних оболонок мають одну або дві (для сферичних оболонок) осі симетрії і два радіуси кривини, перпендикулярних поверхні:

- меридіональний радіус, що утворює криву обертання – r_1 ;
- кільцевий радіус обертання з початком на осі симетрії – r_2 .

Зовнішнє навантаження у металевих трубах врівноважується в основному нормальними і зсувними зусиллями, і тому оболонки працюють передусім на розтяг і стискання.

Труба являє собою оболонку, утворену обертанням навколо осі лінії, що описується рівнянням $r_1 = r_2(z)$ (рис. 2.2).

Відокремимо двома горизонтальними і двома вертикальними площинами нескінченно малий сегмент dS_1 dS_2 , на який, завдяки осьовій симетрії, будуть діяти лише поздовжні сили N_1 і N_2 . Сила P – складова поверхневого навантаження вздовж нормалі n до серединної поверхні елемента dS_1 dS_2 .

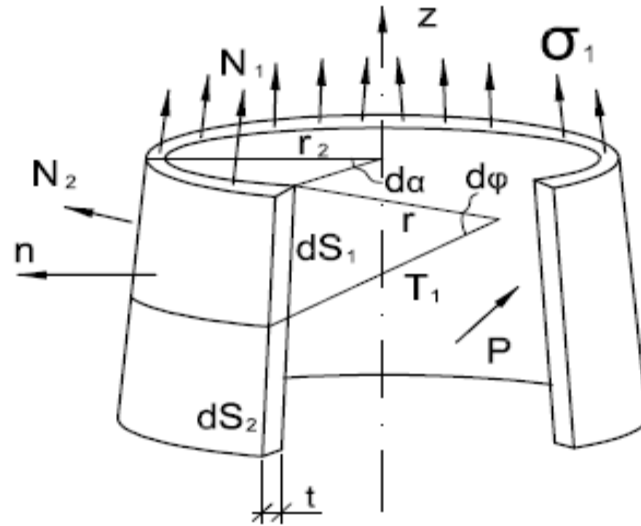


Рисунок 2.2 – Загальний вигляд оболонки обертання

Для визначення стану рівноваги цього елемента треба спроектувати всі сили, що діють на нього, на напрям нормалі n :

$$P dS_1 dS_2 - N_1 dS_2 \frac{d\varphi}{2} - \left(N_1 + \frac{\partial N_1}{\partial S_1} dS_1 \right) dS_2 \frac{\partial \varphi}{2} - N_2 dS_1 \frac{\partial \alpha}{2} - \left(N_2 + \frac{\partial N_2}{\partial S_2} dS_2 \right) dS_1 = 0, \quad (2.28)$$

де $d\varphi = dS_1/r_1$, а $d\alpha = dS_2/r_2$.

Зусилля N_1 і N_2 є рівнодійними нормальних напружень, прикладених до сторін елемента $dS_1 dS_2$:

$$N_1 = \sigma_1 dS_2 t_w; \quad N_2 = \sigma_2 dS_1 t_w. \quad (2.29)$$

Підставляючи (2.28) у (2.29) і спрощуючи його, отримуємо рівняння Лапласа:

$$\sigma_1 / r_1 + \sigma_2 / r_2 = P / t_w. \quad (2.30)$$

Напруження σ_1 і σ_2 у рівнянні (2.30) є невідомими параметрами.

Для отримання другого рівняння рівноваги розглянемо стан рівноваги частини циліндричної оболонки (труби) на рис. 2.3.

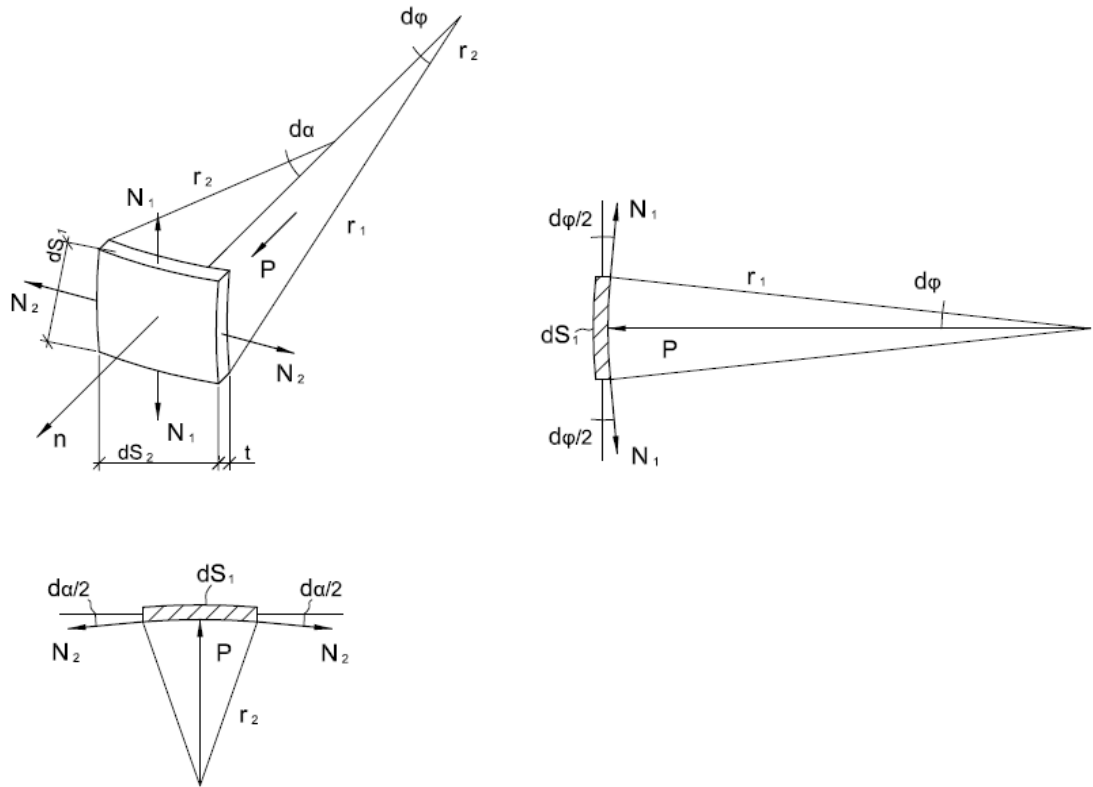


Рисунок 2.3 – Стан рівноваги елемента оболонки

Якщо спроектувати всі сили, прикладені до відсіченої частини, на вісь симетрії z , отримаємо

$$P\pi r_2^2 \sin^2 \varphi - N_2\pi r_2 \sin^2 \varphi = 0. \quad (2.31)$$

При цьому $N_1 = Pr_2$, або

$$\sigma_1 - N_1/t_w = Pr_2/2t_w. \quad (2.32)$$

Підставляючи (2.30) у (2.31), отримаємо таке рівняння:

$$\sigma_2 = \sigma_1(2 - r_2/r_1). \quad (2.33)$$

Використовуючи формули (2.30) і (2.32), можемо визначити напруження в будь-якій точці оболонки, віддаленій від ділянок закріплення і сполучення з іншими конструктивними елементами.

В окремому випадку для циліндричної оболонки значення кільцевих напружень визначаємо, використовуючи формулу (2.30)

$$\sigma_2 / r_2 = P / t_w. \quad (2.34)$$

Для конічної оболонки (перехід труби від одного діаметра до іншого) $r_1 = \infty$, тоді меридіональні і кільцеві напруження в будь-якому перерізі i визначаємо за формулою

$$\sigma_1^i = Pr_2^i / 2t_w \cos \beta ; \quad \sigma_2^i = Pr_2^i / t_w \cos \beta . \quad (2.35)$$

Розрахунок на міцність циліндричних оболонок обертання (труб), що перебувають у безмоментному напруженому стані, виконують за формулою

$$\sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau_s^2} \leq R_y \gamma_c, \quad (2.36)$$

де τ_s – дотичне напруження.

Напруження у стовбурі димової труби, на яку діє розрахункова поздовжня сила N і згинальний момент від вітрового навантаження, обчислюється за класичною формулою

$$\sigma = N / F \pm M / W \leq R_y \gamma_c, \quad (2.37)$$

де N – розрахункова поздовжня сила від вертикального (постійного) навантаження;

F – площа поперечного перерізу труби;

M – розрахунковий згинальний момент;

W – момент опору поперечного перерізу труби ($W = \pi r^2 t$).

Розрахунок на стійкість циліндричних оболонок обертання, стиснутих рівномірно розподіленим навантаженням (елементи вежі), виконують за формулою

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1}} \leq 1, \quad (2.38)$$

де σ_1 – розрахункове напруження в оболонці;

$\sigma_{cr,1}$ – критичне напруження, що відповідає:

- при $r/t \leq 300$ – найменшому зі значень ψR_y або cEt/r ;
- при $r/t > 300$ – критичному напруженню $\sigma_{cr,1} = cEt/r$.

Значення коефіцієнта ψ при $0 < r/t \leq 300$ визначаємо за формулою

$$\psi = 0,97 - \left(0,00025 + 0,95 \frac{R_y}{E} \right) \frac{r}{t} . \quad (2.39)$$

Значення коефіцієнта C визначаємо відповідно до відношення r/t за таблицею 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнта C

r/t	100	200	300	400	600	800	1000	1500	2500
C	0,22	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06

При цьому труби, які розраховуються як стиснуті або стиснуто-згинані, за умовної гнучкості $\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R/E} \leq 0,65$, мають задовольняти умові

$$\frac{r}{t} \leq \pi \sqrt{\frac{E}{R_y}} . \quad (2.40)$$

При дії на трубу рівномірного тиску P (вітрове навантаження), нормального до бічної поверхні, розрахунок на стійкість виконується за формулою

$$\sigma_2 \leq \gamma_c \sigma_{ск,2} , \quad (2.41)$$

де $\sigma_2 = Pr/t$ – розрахункове кільцеве напруження в оболонці;

$\sigma_{ск,2}$ – критичне напруження, що визначається за формулами:

- при $0,5 \leq l/r \leq 10$

$$\sigma_{ск,2} = 0,55E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r} \right)^{3/2} , \quad (2.42)$$

- при $l/r \geq 10$

$$\sigma_{ск,2} = 0,17E \frac{r}{l} \left(\frac{t}{r} \right)^2 , \quad (2.43)$$

тут l – довжина циліндричної оболонки.

Розрахунок на стійкість металевої димової труби (замкненої кругової оболонки обертання), 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

$$\frac{1}{\gamma_c} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}} \right) \leq 1. \quad (2.44)$$

Цоколь труби і місце переходу від одного діаметра до іншого мають конічну форму, і розрахунок цих ділянок також виконується для дії поздовжньої сили і зовнішнього бокового тиску окремо і для їх спільної дії (рис. 2.4).

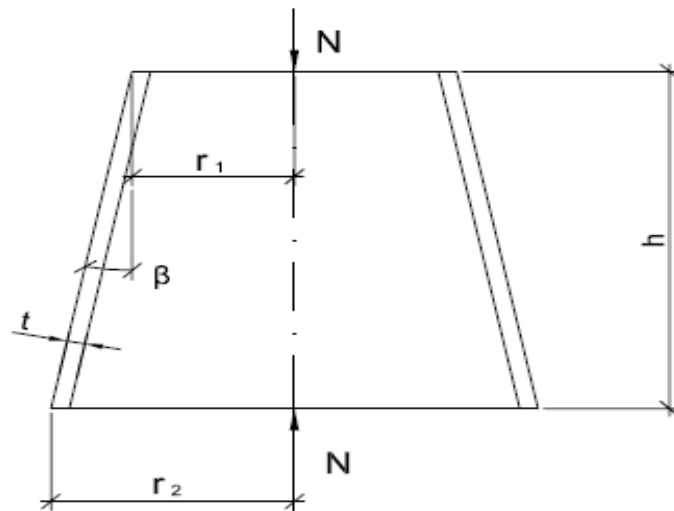


Рисунок 2.4 – Схема розрахунку на стійкість конічної оболонки під дією зусилля стискання

Стійкість конічної оболонки (труби) з кутом конусності $\beta \leq 60^\circ$, стиснутої поздовжньою силою N , оцінюємо за формулою

$$\frac{N}{N_{cr} \gamma_c} \leq 1, \quad (2.45)$$

де N_{cr} – критична сила, що визначається за формулою

$$N_{cr} = 6,28 t \sigma_{cr,1} r_m \cos^2 \beta, \quad (2.46)$$

тут $\sigma_{cr,1}$ – критичне напруження, що визначається за формулою (2.42) із заміною радіуса r на радіус r_m , що дорівнює

$$r_m = \frac{0,9r_2 + 0,1r_1}{\cos \beta}. \quad (2.47)$$

Якщо конічна ділянка труби працює під дією зовнішнього рівномірного тиску P , нормального до бічної поверхні, стійкість перевіряємо за формулою

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}\gamma_c} \leq 1, \quad (2.48)$$

де $\sigma_2 = Pr_m$ – розрахункове кільцеве напруження у трубі;

$\sigma_{cr,2}$ – критичне напруження, що визначається за формулою

$$\sigma_{cr,2} = 0,55E \frac{r_m}{h} \left(\frac{t}{r_m} \right)^{3/2}, \quad (2.49)$$

тут h – висота конічної частини.

Розрахунок на стійкість конічної частини труби, що піддається одночасній дії сили стискання від постійного навантаження N і рівномірного тиску P , нормального до бічної поверхні, виконується за формулою

$$\frac{1}{\gamma_c} \left(\frac{N}{N_{cr}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}} \right) \leq 1. \quad (2.50)$$

2.3. Сучасні методи розрахунку металевих димових і вентиляційних труб, їх несучих веж

Нині 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 короточасних навантажень, епізодичних навантажень, динамічних та температурних впливів вітрового потоку та газів продуктів згоряння в середині труби. В основу цих програм покладено систему аналізу скінченних елементів (МСЕ), що дає можливість чисельного моделювання напружено-деформованого стану димової труби.

Використання сучасних програмних комплексів для труб кінцевої довжини дає змогу визначення точних значень 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 та пошкоджень і дійсного технічного стану конструкцій.

Металеві димові та вентиляційні труби, які експлуатуються тривалий час (30 років і більше), розраховувались за допомогою аналітичних методів та нормативними документами тих часів.

При оцінці технічного стану металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж після тривалого терміну експлуатації та під час реконструкції необхідно проводити розрахунок з урахуванням навантажень та впливів за сучасними нормативними документами.

Проведемо аналіз розрахунків реальних димових та вентиляційних труб та їх несучих веж після тривалого їх терміну експлуатації, здійснених за допомогою сучасних програмних комплексів (Selena-Result, SCAD, ЛІРА САПР) та сучасних нормативних документів [101, 136].

Металева витяжна труба висотою 100,00 м в металевій несучій вежі заввишки 92,50 м комбінату «Мінеральні добрива» у м. Россош побудована 1978 році. Термін експлуатації на час обстеження – 35 років.

Газовідвідний стовбур являє собою тонкостінну циліндричну оболонку з внутрішнім діаметром 2600 мм, товщиною стінки 5 мм. Оболонка складається з окремих царг, з'єднаних на монтажному зварюванні. Витяжна труба у процесі експлуатації спирається через опорне кільце на балки робочого майданчика вежі на позн. 18.50 м. Газовідвідний стовбур

виготовлений зі сталі 03X13AG19. Труба призначена для видалення продуктів згоряння і побічних продуктів при виготовленні азотної кислоти.

Гратчаста вежа висотою 92.50 м навколо труби – вільно встановлена чотиригранна вежа змінного перерізу по висоті. Пояси вежі опираються на окремо встановлені фундаменти.

По висоті вежі влаштовані діафрагми, що забезпечують геометричну незмінність поперечних перерізів і використовуються як майданчики для обслуговування і переходу. Горизонтальні вітрові навантаження від вихлопної труби передаються на майданчики вежі через кільцеві упори, встановлені на позн. 30.30 м, 40.70 м, 49.30 м, 56.30 м, 63.70 м, 70.90 м, 78.10 м, 83.50 м, 92.50 м. Конструкція упорів забезпечує можливість температурного розширення вихлопної труби відносно вежі. Геометричні розміри і перерізи елементів вежі та її загальний вигляд представлені на рис. 2.5.

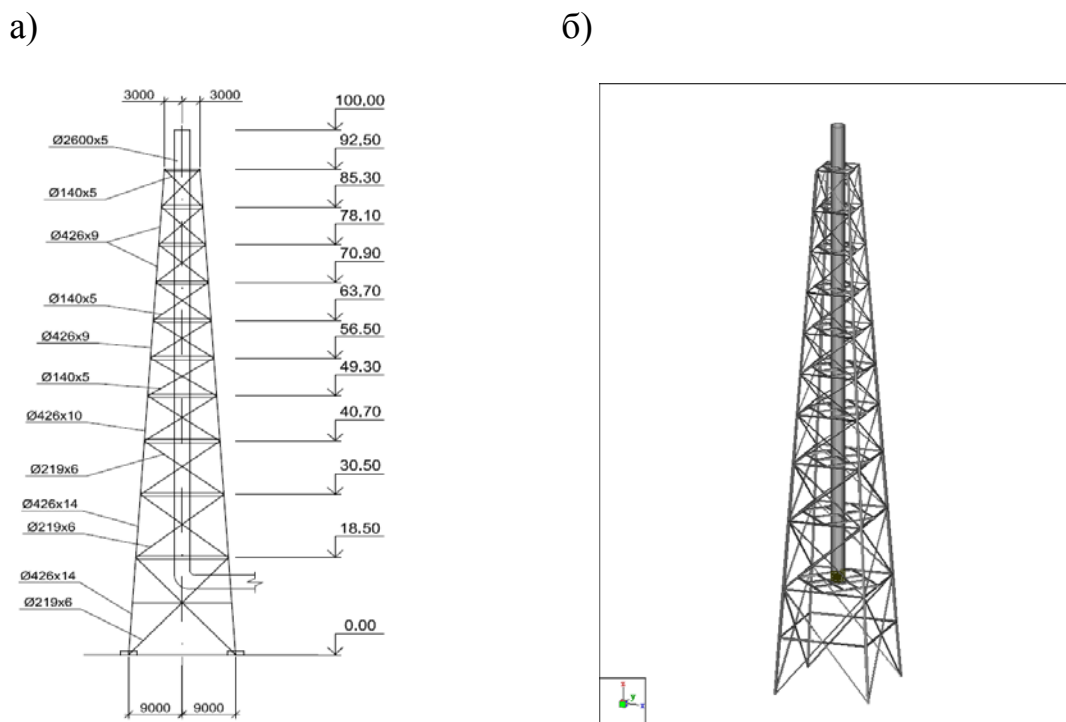


Рисунок 2.5 – Металева витяжна труба висотою 100,00 м в несучій вежі заввишки 92,50 м комбінату «Мінеральні добрива» у м. Россош:

- а) геометричні розміри і перерізи елементів вежі;
- б) загальний вигляд вежі.

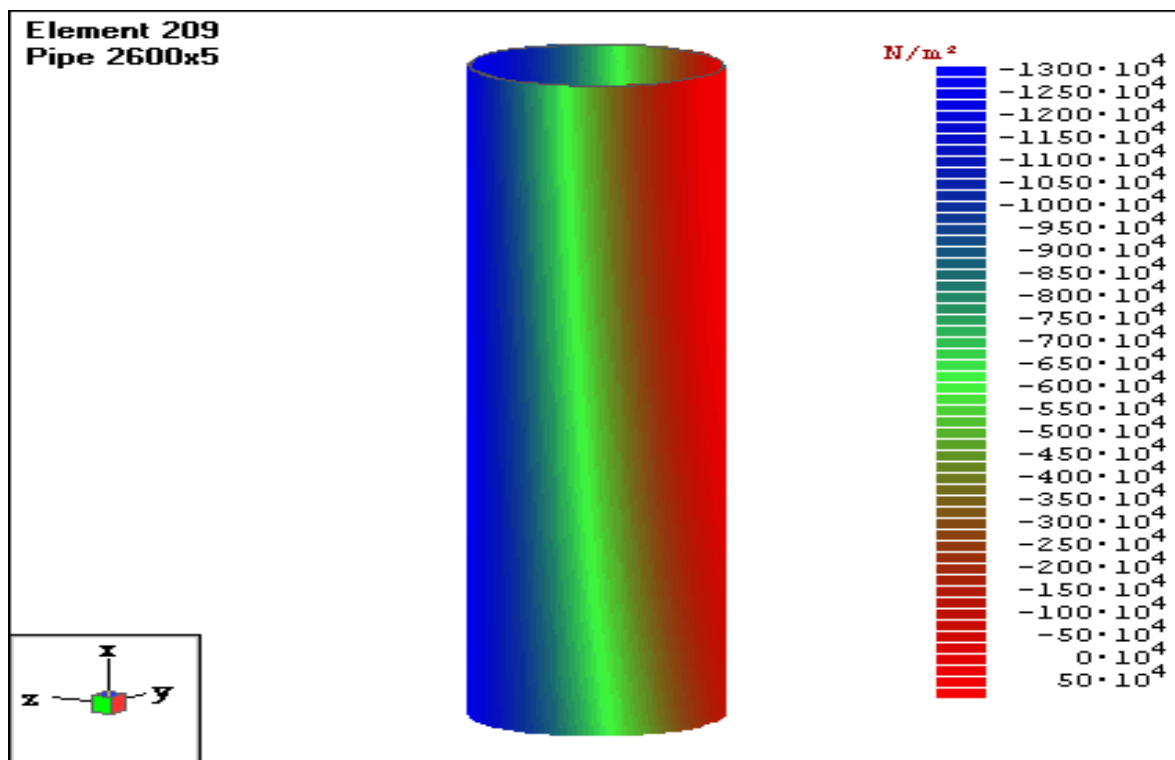


Рисунок 2.7 – Поздовжні напруження у зовнішній фібрі в основі труби

Поздовжні напруження стиснення досягають у зовнішній фібрі в основі труби значних величин -13 кН/см^2 , напруження розтягування труби мають незначні величини $-0,5 \text{ кН/см}^2$.

У разі виходу з роботи горизонтальних упорів, що передають вітрове навантаження на діафрагми вежі, згинальний момент у трубі на незакріпленій ділянці значно зростає, і напруження стискання у зовнішній фібрі можуть досягати розрахункового опору, при цьому розвиваються великі зони пластичних деформацій і відбувається втрата стійкості труби.

Характерною особливістю роботи тонкостінних оболонок під дією навантаження є явище крайового ефекту, який полягає в різкому збільшенні зусиль і переміщень у місцях стрибкоподібної зміни геометричних або фізичних параметрів конструкції.

У газовідвідних стовбурах, розміщених у несучих вежах, таким місцем є перерізи, де труба спирається на діафрагму жорсткості. Використання розрахункового програмного комплексу Selena-Result дозволило визначити напружено-деформований стан стінки труби в зоні

крайового ефекту та визначити дотичні (рис. 2.8) і кільцеві (рис. 2.9) напруження у зовнішніх фібрах в основі труби.

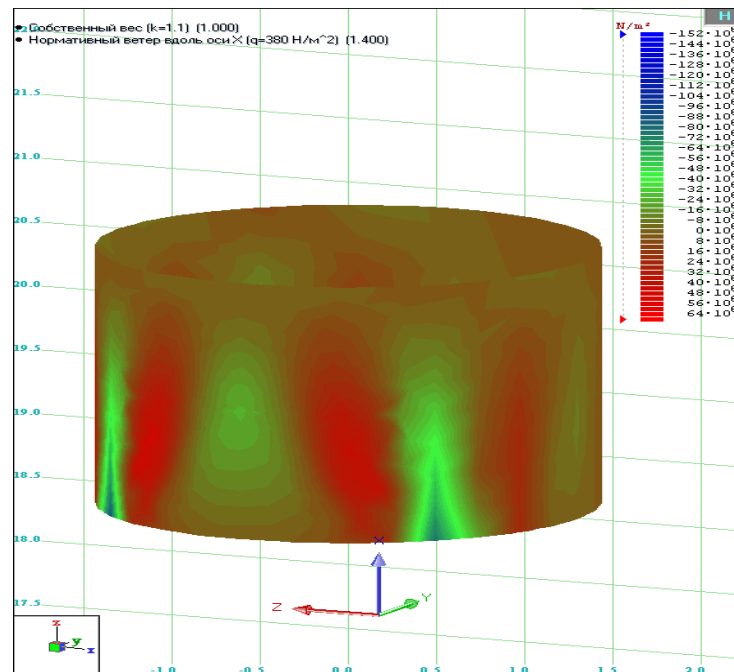


Рис. 2.8 – Дотичні напруження у зовнішній фібрі в основі труби

Максимальні дотичні напруження стиснення на окремих ділянках в зоні крайового ефекту досягають $-15,2$ кН/см², розтягнення – $6,4$ кН/см².

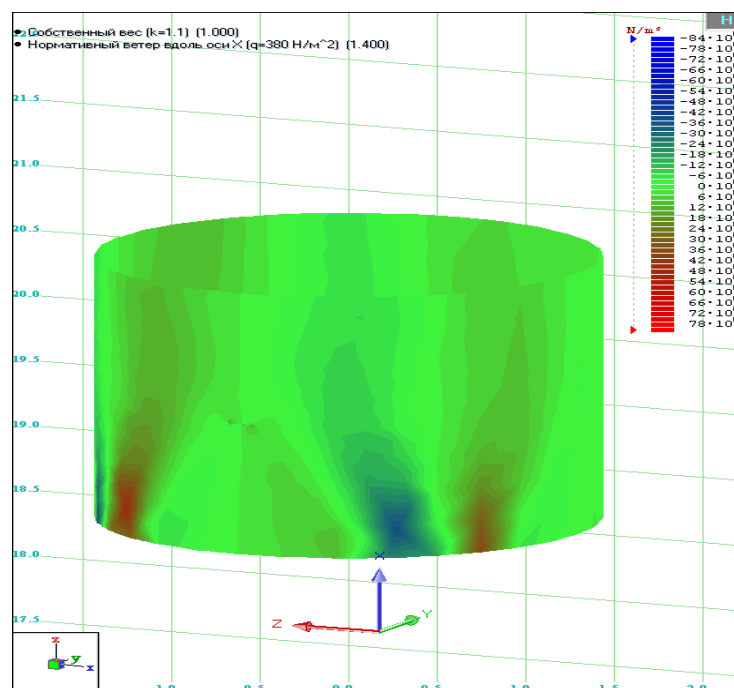


Рисунок 2.9 – Кільцеві напруження у зовнішній фібрі в основі труби

Максимальні кільцеві напруження стиснення в зоні крайового ефекту досягають величини $-8,4 \text{ кН/см}^2$, розтягнення – $7,9 \text{ кН/см}^2$.

Використання програмних комплексів для розрахунку газовідвідного стовбура в несучій вежі також дає можливість враховувати зусилля, що виникають у стовбурі від прогину вежі під дією вітрового навантаження.

Разом із розрахунками на силові впливи для димових і вентиляційних труб проводяться спеціальні розрахунки внутрішньої аеродинаміки у газовідвідному стовбурі, теплотехнічні і санітарно-гігієнічні розрахунки газовідвідних стовбурів за допомогою сучасних програмних комплексів SCAD та ЛІРА САПР.

Розглянемо розрахунок несучої вежі заввишки 92,50 м комбінату «Мінеральні добрива» у м. Россош в середині якої розташована труба, яка експлуатуються понад 35 років. Розрахунок виконано за допомогою програмного комплексу Selenia-Result (Licence ID: 0969511952/0), на основі чинних на момент обстеження нормативних документів [101, 103, 136, 137] з урахуванням реального стану конструкцій.

Металева вежа навколо труби є найбільш поширеною конструктивною формою витяжних веж (чотиригранна симетрична вежа), яка розглядається як консольна просторова ферма змінного перерізу.

Основні навантаження на вежу зводяться до вертикальних (постійних і тривалих змінних) і вітрових (короткочасних змінних).

Вертикальні навантаження розподіляються порівну між поясами, решітка сприймає місцеве вертикальне навантаження.

При розрахунку на горизонтальне вітрове навантаження враховувалися дві можливі схеми навантаження чотиригранної вежі (рис. 2.11).

За першою схемою, максимальне вітрове навантаження перпендикулярне одній із граней (рис. 2.10 а), за другою – вітрове навантаження діє діагонально до вежі (рис. 2.10 б).

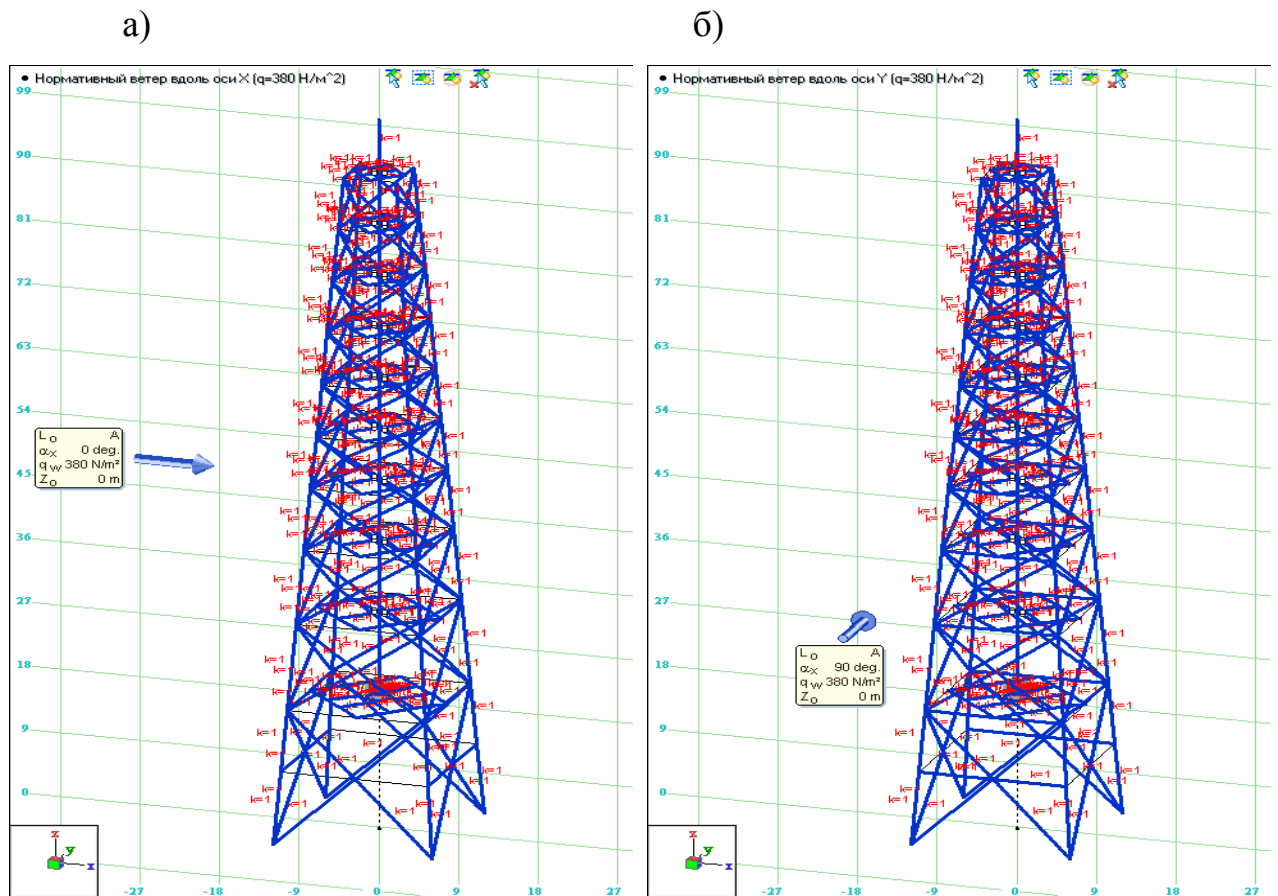


Рисунок 2.10 – Схема дії вітрового навантаження на вежу:

- а) вітрове навантаження перпендикулярне одній із граней;
- б) вітрове навантаження діє діагонально до вежі

Для визначення зусиль у поясах і навантажень на фундаменти використовується перша схема навантаження, для визначення зусиль в елементах решітки – друга. За першою схемою, зусилля в поясах, що лежать по діагоналі, перпендикулярній дії вітру, дорівнюють нулю, а в напрямі вітрового навантаження виникають зусилля, рівні за величиною і протилежні за знаком. У розрахунку нижньої призматичної частини вежі враховувались додаткові зусилля в елементах решітки, які є наслідком спільності деформацій розкосів і поясів.

При побудованні розрахункової схеми несучу вежу можна представити як просторову стрижневу конструкцію з шарнірним сполученням елементів у вузлах, трубу в місці спирання на діафрагму вежі – як циліндричну оболонку (рис. 2.11).

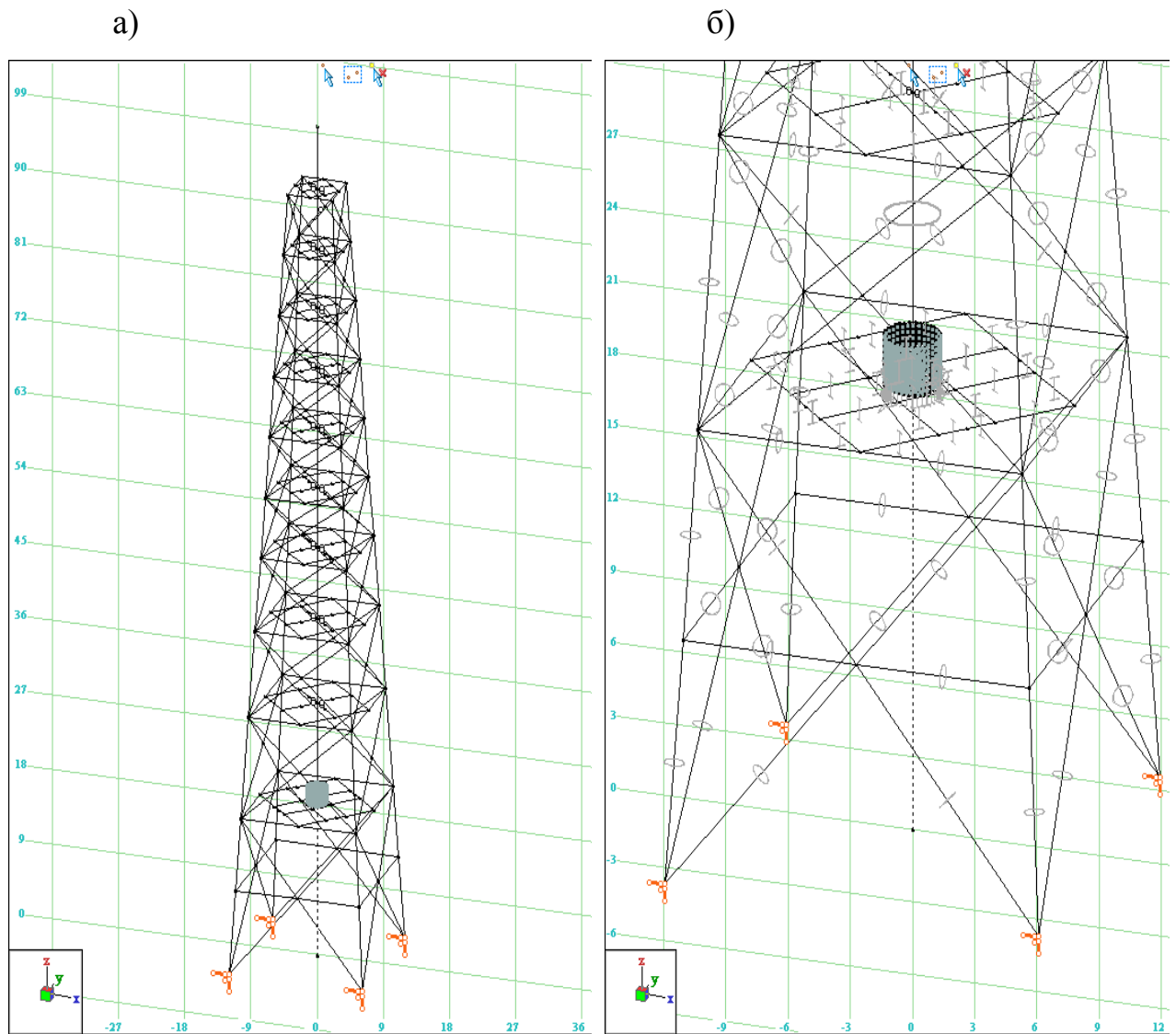


Рисунок 2.11 – Розрахункова схема споруди:

а) спільність труби і вежі;

б) фрагмент у місці спирання труби на вежу

В результаті розрахунку визначено напруження у елементах вежі і переміщення вузлів (від характеристичних значень навантажень) з урахуванням сумісності роботи витяжної труби і несучої вежі (рис. 2.12).

Вихідні дані для складання розрахункових схем і визначення навантажень узяті на основі даних візуального й інструментального обстежень конструкції вежі.

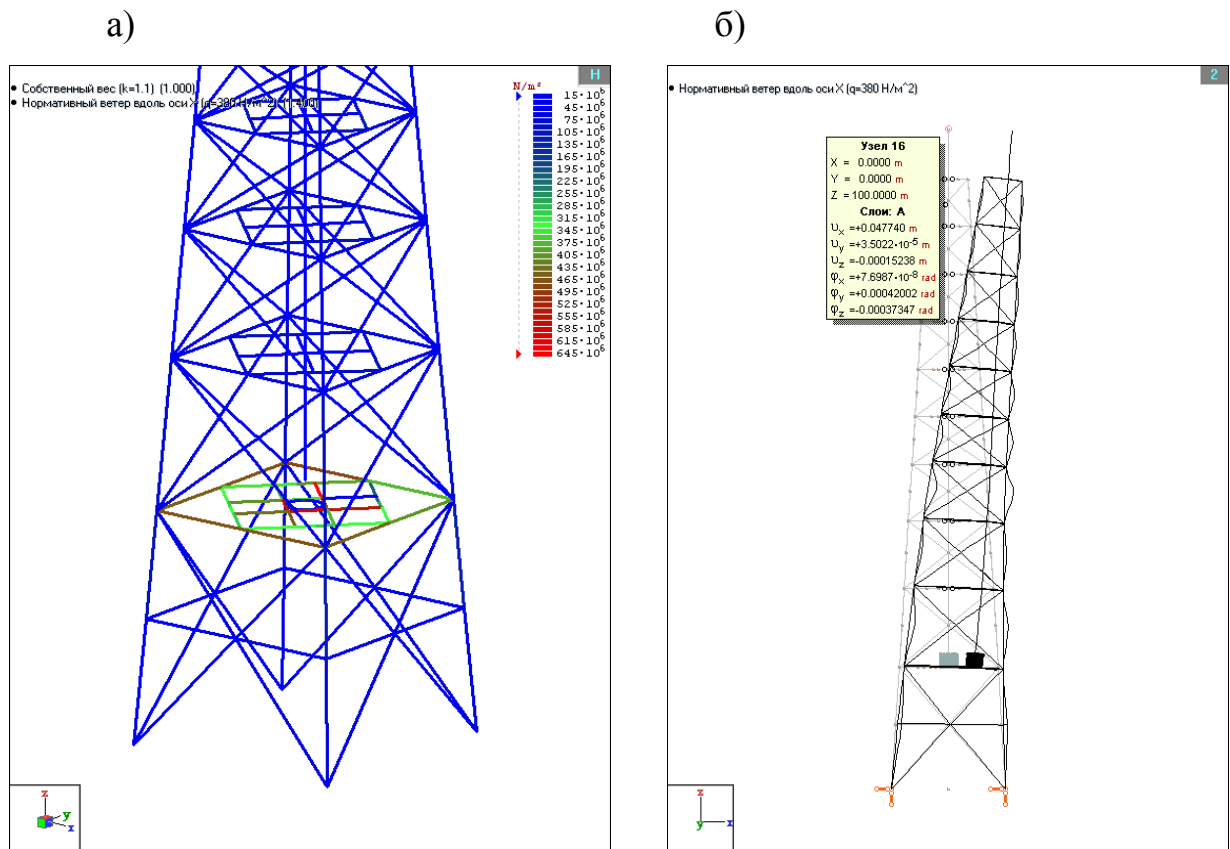


Рисунок 2.12 – Напруження у елементах і переміщення вузлів вежі:

- а) – напруження від власної ваги і вітру;
- б) – переміщення вузлів

Напруження в найбільш навантажених поясах та розкосах вежі досягають - $19,5 \text{ кН/см}^2$, в несучих балках діафрагми, на яку спирається витяжна труба, досягають - $25,6 \text{ кН/см}^2$. Напруження в несучих металевих балках діафрагми перевищують величину розрахункового опору, і ці балки необхідно підсилити.

Переміщення несучої вежі на позн. 92,50м від нормативного вітрового навантаження досягають - 456 мм, що не перевищує гранично допустимих нормативних значень $0,006H - 555 \text{ мм}$.

При виконанні розрахунку металеві чотиригранної вежі висотою 75,00 м комбінату «Азот» у м. Сєвєродонецьк як просторової конструкції, використані дані натурного обстеження і програмно-обчислювальний комплекс SCAD Office (ліцензія № 7276). Загальний вигляд і розрахункова схема вежі представлені на рис. 2.13.

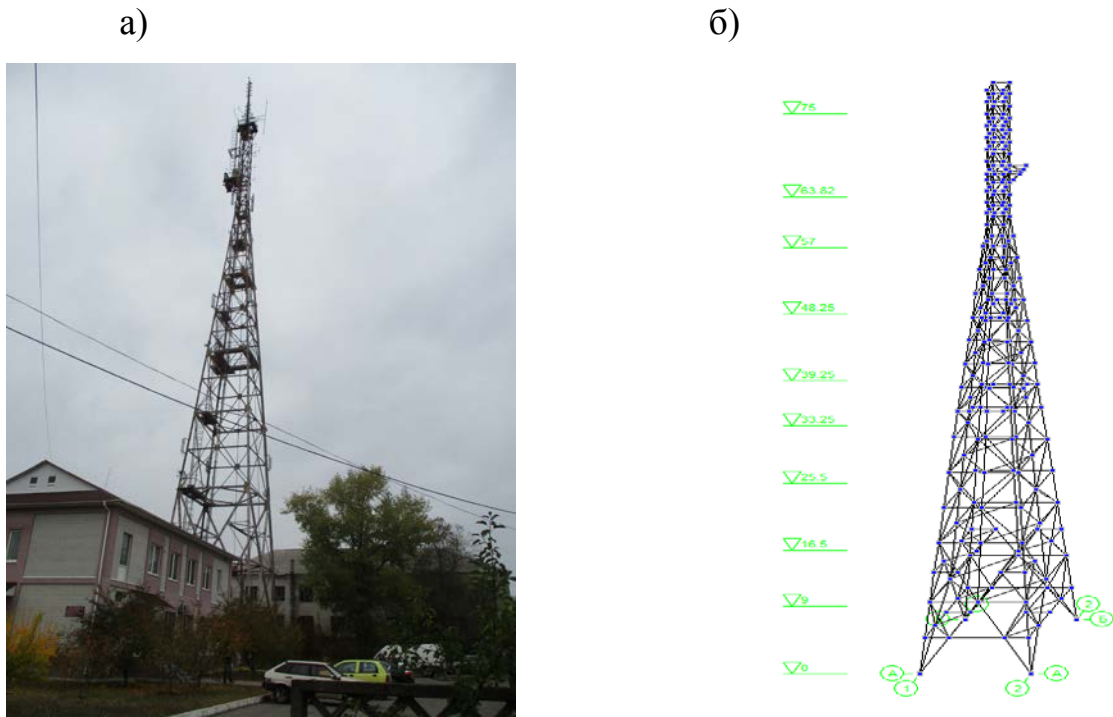


Рисунок 2.13 – Загальний вигляд (а) і розрахункова схема вежі (б)

При розрахунку були використані різні види навантажень – власна вага ($L1$), вітер по осі X ($L2$), вітер по осі Y ($L3$, рис. 3.14 а), вітер по діагоналі ($L4$, рис. 3.14 б), сніг ($L5$), устаткування ($L6$).

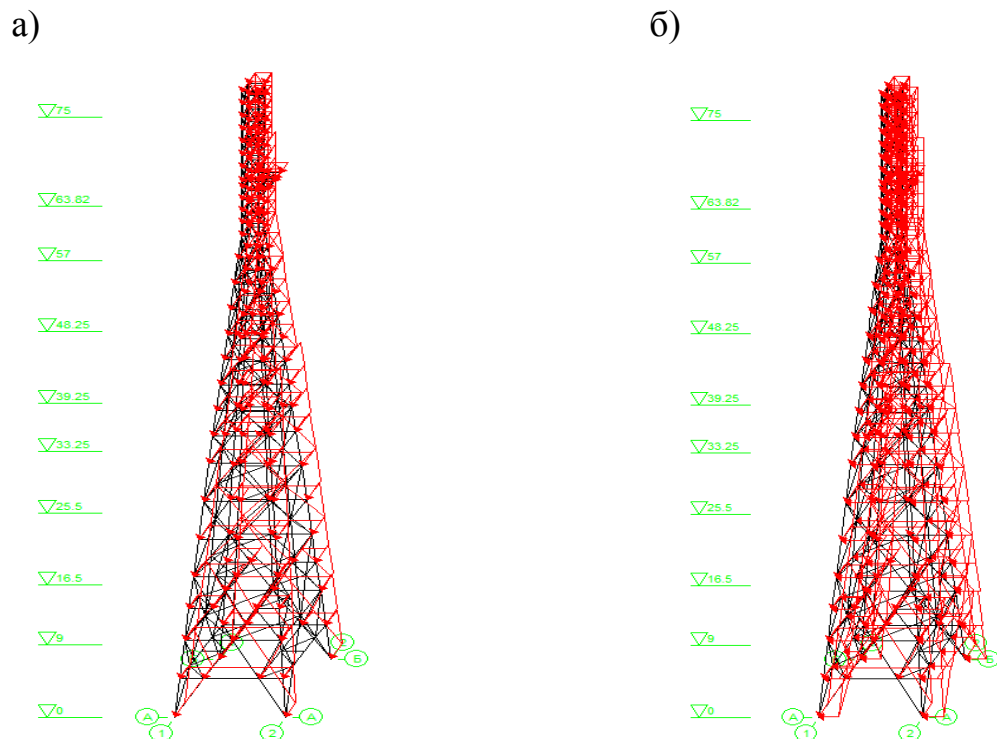
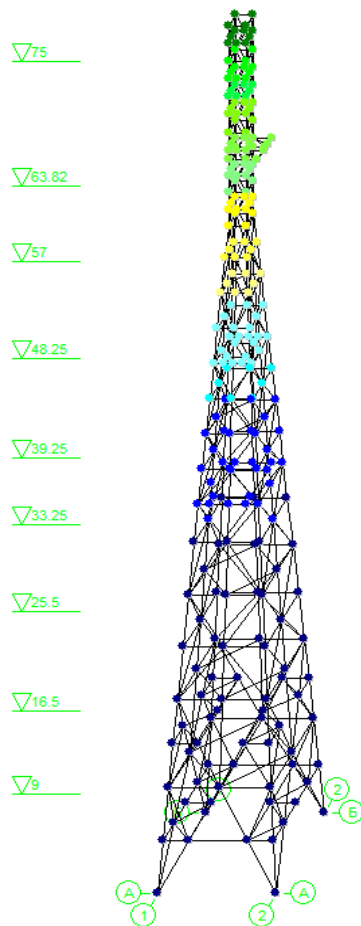


Рисунок 2.14 – Завантаження вежі вітровим навантаженням:

- а) вітер по осі Y ;
- б) вітер по діагоналі

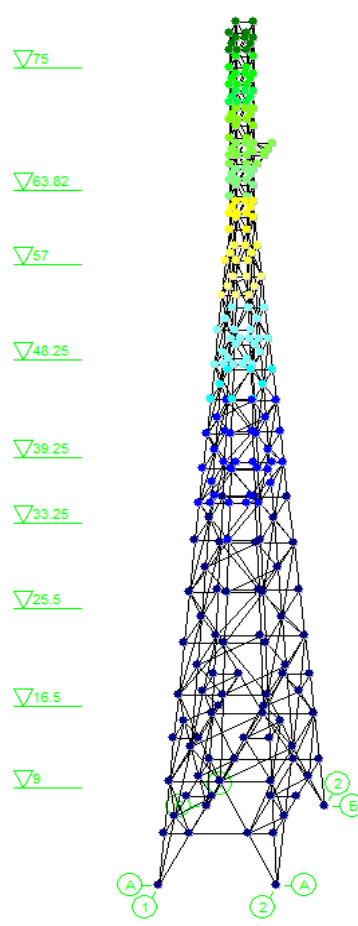
Напруження в елементах вежі визначені для трьох комбінацій навантажень і представлені на рис. 2.15.

а)



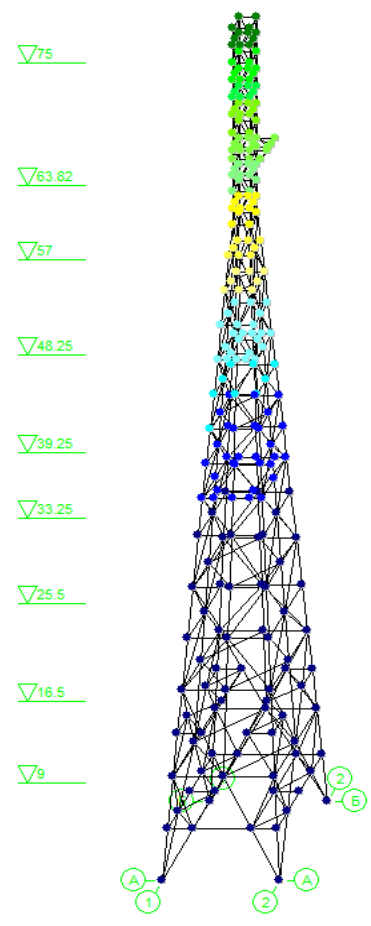
✓	0.05	22.28
✓	22.28	44.5
✓	44.5	66.72
✓	66.72	88.95
✓	88.95	111.17
✓	111.17	133.4
✓	133.4	155.62
✓	155.62	177.84
✓	177.84	200.07
✓	200.07	222.29
✓	222.29	244.51
✓	244.51	266.74
✓	266.74	288.96
✓	288.96	311.19

б)



✓	0.05	22.81
✓	22.81	45.57
✓	45.57	68.33
✓	68.33	91.09
✓	91.09	113.86
✓	113.86	136.62
✓	136.62	159.38
✓	159.38	182.14
✓	182.14	204.9
✓	204.9	227.66
✓	227.66	250.42
✓	250.42	273.18
✓	273.18	295.94
✓	295.94	318.7

в)



✓	0.01	22.48
✓	22.48	44.94
✓	44.94	67.4
✓	67.4	89.86
✓	89.86	112.33
✓	112.33	134.79
✓	134.79	157.25
✓	157.25	179.72
✓	179.72	202.18
✓	202.18	224.64
✓	224.64	247.1
✓	247.1	269.57
✓	269.57	292.03
✓	292.03	314.49

Рисунок 2.15 – Напруження в елементах вежі при різних комбінаціях навантажень:

а) комбінація навантажень $L1+L2+L5+L6$;

б) комбінація навантажень $L1+L3+L5+L6$;

в) комбінація навантажень $L1+L4+L5+L6$

У результаті розрахунку з урахуванням технічного стану і реальних навантажень, що діють на вежу, отримано максимальний коефіцієнт використання стиснутих елементів – 0,89 (пояс нижнього ярусу), що дозволяє вважати несучу здатність конструкції вежі забезпеченою. Для інших несучих елементів вежі напруження є значно меншими за розрахунковий опір сталі.

Деформаційна схема вежі при найбільш несприятливому поєднанні навантажень (характеристичні значення) представлена на рис. 2.16.

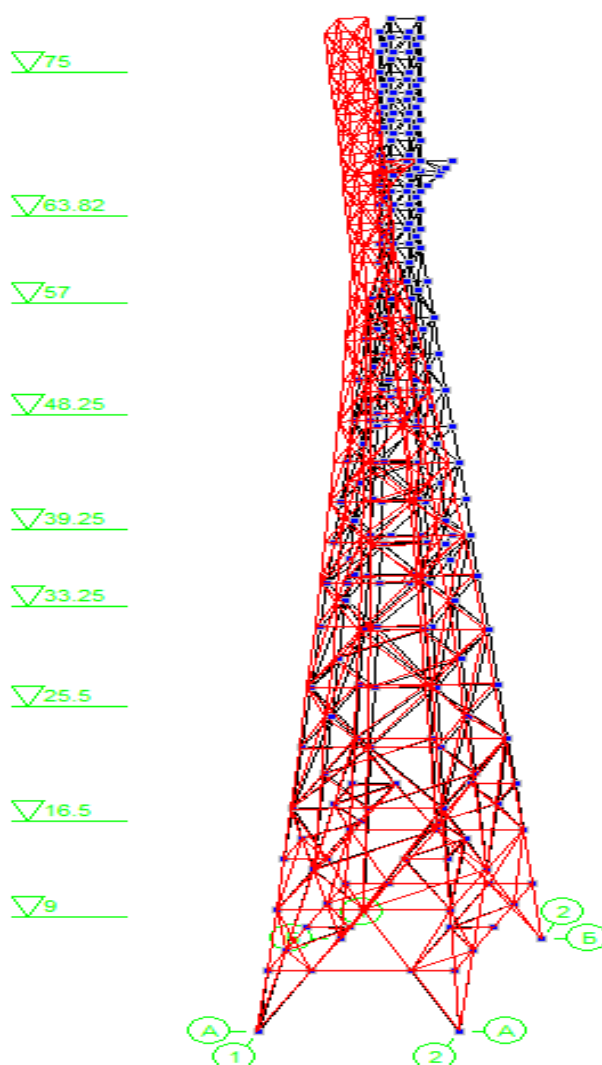


Рисунок 2.16 – Деформаційна схема вежі

Максимальне значення розрахункове переміщення верхнього вузла вежі складає 340 мм, що є меншим за фактичні величини (275мм) і допустиму величину відповідно до нормативних документів [96].

Порівняємо результати розрахунків металевої витяжної труби (H=100,00 м) і несучої вежі (H=92,50 м) комбінату «Мінеральні добрива» у м. Россош, металевої димової труби і несучої вежі (H=75,50 м) комбінату «Азот» у м. Сєверодонецьк виконаних за допомогою програмних комплексів SCAD, Selen-Result, ЛІРА САПР (ліцензія № 1/5451) і аналітичними методами. Величини напружень σ в елементах конструкцій на різних відмітках та переміщень f на рівні верхньої площадки вежі співставленні в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – 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 ы несуча вежа Н=92,50 м комбінату «Мінеральні добрива» у м. Россош						
σ_1	пояс вежі нижнього ярусу	$\leq 235 (R_v)$	212	-	206	201
σ_2	розкіс вежі нижнього ярусу	$\leq 235(R_v)$	194	-	187	181
σ_3	труба на опорі	$\leq 235(R_y)$	145	-	136	134
f	верхній ярус вежі	≤ 600 (0.006Н)	522	-	495	505
Труба і несуча вежа Н=75,00 м комбінату «Азот» у м. Сєверодонецьк						
σ_1	пояс вежі нижнього ярусу	$\leq 235 (R_v)$	225	213	-	208
σ_2	розкіс вежі нижнього ярусу	$\leq 235(R_v)$	204	195	-	197
σ_3	труба на опорі	$\leq 235(R_y)$	225	216	-	220
f	верхній ярус вежі	≤ 450 (0.006Н)	381	340	-	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.

Практично всі проектні перерізи несучих елементів димових труб та несучих веж розрахованих аналітичними методами, задовольняють вимогам

розрахунку несучої здатності по сучасним програмних комплексам. Сучасні програмні комплекси дають змогу моделювати роботу димових труб та несучих веж різної складності, розраховувати їх з урахуванням просторової роботи конструкцій, отримувати більше розрахункової та графічної інформації, значно зменшують час на проведення розрахунків.

Розрахунок веж також допустимо проводити шляхом розкладення просторової вежі на плоскі ферми з відповідним розподіленням навантажень по гранях. Плоску розрахункову схему також можна обчислювати за допомогою аналітичних і графічних методів.

2. 4. Висновки по розділу 2

1. Розглянуто напружено-деформований стан елементів димових труб і веж трубчастого перерізу (циліндра кругового поперечного перерізу) під дією стискаючих торцевих і згинальних навантажень у системі циліндричних координат. Розглянуто методи розрахунку тензора напружень (σ) і кінетичного тензора напружень (T) для пружно-пластичних елементів димових труб і несучих веж.

2. Проаналізовано методи розрахунку на міцність і стійкість циліндричних і конічних ділянок труб при стисканні або розтягу, а також під дією навантажень, прикладених нормально до осі труби.

3. Розглянуто сучасні методи розрахунку з використанням різних програмних комплексів (SCAD, Selena-Result, ЛІРА САПР), проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з результатами отриманими аналітичними методами.

2.5. Список використаних джерел у розділу 2

Список використаних джерел у розділі 2 наведено у загальному списку використаних джерел [8, 16, 96, 97, 103, 135, 136, 137, 146, 152, 153, 154].

РОЗДІЛ 3. УТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК ПОШКОДЖЕНЬ В МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБАХ І НЕСУЧИХ ВЕЖАХ

3.1. Розвиток пошкоджень в елементах металевих димових трубах і їх несучих вежах від динамічних впливів

Основними динамічними впливами на металеві димові і вентиляційні труби і несучі вежі є вітровий вплив і коливання (вільні і вимушені від дії вітрового навантаження).

Відомо, що найбільший внесок у напружено-деформований стан (НДС) стовбурів труб і несучих веж робить вітровий вплив. Зробімо аналіз динамічних впливів на висотні споруди й основних закономірностей багатоциклової і мало циклової пошкоджуваності металу з урахуванням особливостей напруженого стану їхніх елементів.

Під дією циклічних навантажень у металевих конструкціях димових труб може виникати втомне пошкодження металу. Втома металу розуміється як ступінь ослаблення (пошкоджуваності) його структури в умовах багаторазової дії нормальних, дотичних та еквівалентних напружень.

Напруження руйнування при багаторазово повторюваних навантаженнях для маловуглецевих і низьколегованих сталей, з яких виготовляють димові труби і несучі елементи веж, у 2,0-2,5 рази менші за руйнівні напруження σ_u при одноразовому навантаженні. Граничне значення максимальних напружень циклу (σ_{max}), яке відповідає великій кількості навантажень (базі випробувань N_0) зразків без руйнування, вважають границею витривалості (втоми), що позначається σ_r . Індекс «r» позначає коефіцієнт асиметрії циклу і дорівнює $r = \sigma_{min}/\sigma_{max}$, де σ_{min} – мінімальне напруження циклу. При повному симетричному знакозмінному циклі навантаження ($r = -1$) границя втоми позначається як σ_{-1} . Для багатьох сталей, як зазначалося раніше, $\sigma_{-1} = 0,4\sigma_s$. Знаком σ_0 позначають границю втоми при віднульовому (пульсаційному) циклі зміни напружень.

Характеристики втоми залежать від багатьох чинників, а саме: від масштабного фактора K_d розмірів деталей; ефективного коефіцієнта концентрації напружень K_σ ; стану поверхні K ; частоти змінних напружень ν_i навколишнього середовища.

Корозійний знос металевої димової труби знижує границю втоми внаслідок зменшення робочого перерізу, водневого і радіаційного набуття крихкості сталі, проявів ефекту Ребіндера.

В умовах багатоциклового навантаження метал димових труб у зоні пружних деформацій дуже важко зруйнувати. Але на практиці трапляються випадки втомного руйнування труб під дією змінних навантажень в області пружних експлуатаційних напружень, менших за границю плинності σ_y . У таких випадках процес втоми металу необхідно розглядати як локальний, який розвивається в мікрообластях, де виникають мікропластичні деформації до настання загальної плинності металу зразка. Цей факт пояснюється тим, що на рівні мікроструктури сталь має анізотропні складові (ферит, перліт, цементит) складної конфігурації з різними механічними і теплофізичними властивостями. Найбільш імовірними осередками мікропластичної деформації є структурні елементи (зерна) з гострими кутами, що мають знижені міцнісні і пластичні характеристики. Аналогічно до тріщин, гострі кути викликають високий ступінь концентрації напружень. У м'яких структурних елементах (зернах) полегшуються умови зародження мікротріщин через розвиток у них об'ємного напруженого стану з високим ступенем жорсткості. Жорсткість напруженого стану визначається відношенням головних напружень ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) до інтенсивності напруження σ_i :

$$\sigma_i = \sqrt{0,5 \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}. \quad (3.1)$$

У металі ще до прикладення навантаження існують залишкові самоврівноважені поля напружень, зумовлені різними теплофізичними

властивостями його структурних елементів (зерен). Після прикладення зовнішнього навантаження фактичні напруження в робочому перерізі являють собою результат підсумування суворо орієнтованих напружень від зовнішнього навантаження і дезорієнтованих внутрішніх напружень, що самоврівноважуються, і виникає стан з характерними різкими піками і градієнтами. При цьому фактичні напруження дорівнюють середньоінтегральним номінальним напруженням σ_n від прикладеного навантаження. Згладжування піків і градієнтів напружень в окремих зонах відбувається за рахунок виникнення в них пластичних деформацій, які проявляються у вигляді смуг ковзання. 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.

Виходячи з зазначеного раніше, першопричиною втомних пошкоджень при змінних пружних напруженнях є факт утворення і розвитку мікропластичних деформацій у найбільш термодинамічно нерівномірних мікрооб'ємах структурних елементів.

Для багатьох металевих димових труб характерним є малоциклове навантаження в умовах пульсуючого внутрішнього тиску з подальшим розвитком малоциклової втоми в металі. Для прогнозування залишкового ресурсу металевих труб необхідно враховувати основні закономірності малоциклової втоми.

В основі малоциклової пошкоджуваності (втоми) металів лежить реалізація локалізованого руйнування в результаті виникнення і накопичення мікропластичних деформацій (ε_L) ділянок конструктивних елементів, видимих при візуальному огляді. Процес руйнування при циклічному навантаженні можна розділити на три основні стадії – ініціація (зародження) тріщини, розвиток (поширення) тріщини і руйнування (доламування).

На першій стадії відбувається накопичення мікропластичних деформацій ε_L . Процес пошкоджуваності металу контролюється величиною

амплітуди місцевих (у зонах концентрації напружень) пластичних деформацій. Момент утворення тріщини відповідає моменту досягнення в металі критичних (граничних) деформацій $\varepsilon_{л.пр.}$.

Критичною (граничною) деформацією вважається гранична інтенсивність (логарифмічна деформація), що відповідає відносному звуженню зразка при розриві ψ :

$$\varepsilon_{л.пр.} = \ln[1/(1-\psi)] . \quad (3.2)$$

Таким чином, на першій стадії малоциклової втоми граничний стан елемента відповідає умові $\varepsilon_{л.} \leq \varepsilon_{л.пр.}$. При накопиченні мікропластичних деформацій і досягненні рівня критичних деформацій ($\varepsilon_{л.} = \varepsilon_{л.пр.}$) у металі утворюється тріщина. Якщо вважати величину накопиченої деформації за один цикл навантаження $\varepsilon_{л.}$, сумарна накопичена деформація за N циклів навантаження у граничному стані складатиме $N \cdot \varepsilon_{л.} = \varepsilon_{л.пр.}$.

На основі дослідних даних, симетричному знакозмінному циклу навантаження краще відповідає ступенева функція рівняння Коффіна-Менсона – $N_p^m \varepsilon_{л.} = 0,5 \varepsilon_{л.пр.}$. Для більшості сталей $m \approx 0,5$.

В умовах симетричного знакозмінного навантаження кількість циклів до руйнування пов'язана з коефіцієнтом запасу пластичності $n_{\varepsilon л}$ і визначається за формулою:

$$N_p = (0,5 n_{\varepsilon л.})^{1/m}, \quad (3.3)$$

де коефіцієнт запасу пластичності дорівнює $n_{\varepsilon л.} = \varepsilon_{л.пр.} / \varepsilon_{л.}$.

Оцінка коефіцієнта запасу пластичності металу дуже важлива для визначення характеристик працездатності і безпечності металевих димових труб. Зокрема, при $m = 0,5$ довговічність елементів при малоцикловому навантаженні знаходиться у квадратичній залежності від величини n_{ε} :

$$N = 0,25 n_{\varepsilon л.}^2 . \quad (3.4)$$

Амплітуду пластичної деформації $\varepsilon_{\text{л}}$ необхідно перевіряти за фактичними значеннями граничної пластичності металу $\varepsilon_{\text{л.нр}}$, з урахуванням повної ε_o і пружної деформації ε_y за формулою $\varepsilon_{\text{л}} = \varepsilon_o - \varepsilon_y$. Величину ε_y вважаємо відношенням граничної втоми σ_{-1} до модулю пружності E . Вважаючи, що $\sigma_{-1} \approx 0,4 \sigma_{\text{в}}$, отримаємо $\varepsilon_y \approx 0,4 \sigma_{\text{в}}/E$.

Враховуючи, що більшість сталей для металевих димових труб зміцнюється за ступеневою функцією $\sigma = C \varepsilon^n$ (де C і n – константи міцності і зміцнення), можна встановити взаємозв'язок кількості циклів руйнування N_p з коефіцієнтом запасу міцності за локальними (місцевими) напруженнями $n_{\text{сл}}$ за формулою:

$$N_p = 0,25 n_{\text{сл}}^{2/n}. \quad (3.5)$$

У формулі (4.5) $n_{\text{сл}} = \sigma_{\text{л.нр}} / \sigma_{\text{л}}$, де $\sigma_{\text{л.нр}}$ і $\sigma_{\text{л}}$ – граничні і локальні пластичні напруження.

Коефіцієнт деформаційного зміцнення n для маловуглецевих і низьколегованих сталей, що використовуються для виготовлення металевих димових труб, вимірюється у межах 0,1-0,25. Тому показник ступеня при $n_{\text{сл}}$ значно більший, ніж показник ступеня при $n_{\text{ел}}$ і вимірюється у межах 8-20.

Створення і вдосконалення методу визначення коефіцієнта запасу міцності за локальними напруженнями $n_{\text{сл}}$ є дуже важливим і актуальним завданням. При цьому найбільша складність полягає у питанні про оцінку локальних пружно-пластичних напружень з урахуванням їхнього неоднорідного розподілу, зумовленого конструктивними концентраторами напружень. Також дуже важливою є можливість помітного зниження граничної пластичності $\varepsilon_{\text{л.нр}}$ у результаті місцевого деформаційного набуття крихкості і старіння.

Наведені формули (3.3, 3.5) відображають механізм малоциклової пошкоджуваності металу в умовах знакозмінного навантаження із заданою деформацією $\varepsilon_{\text{л}}$, що, як правило, реалізується в лабораторних умовах при випробуванні малогабаритних зразків.

Багато металевих димових труб працює в режимі пульсуючого циклу змін напружень, і процеси малоциклової пошкоджуваності зумовлені більш складними взаємодіями внутрішніх і зовнішніх напружень. У такому випадку процес руйнування елементів контролюється максимальними заданими напруженнями, а не деформаціями. При цьому зазвичай використовують ступеневі функції, які добре описують дослідні криві довговічності в координатах «число циклів навантаження до руйнування – прикладене циклічне напруження». У цьому випадку рівняння циклічної довговічності матиме вигляд:

$$N_p = A n_\sigma^m, \quad (3.6)$$

де A і m – константи, визначені дослідним шляхом;

n_σ – коефіцієнт запасу міцності за номінальними робочими напруженнями.

Коефіцієнт $n_\sigma = \sigma_u / \sigma_p$, де σ_p – робоче номінальне напруження. При $n_\sigma = 1,0$ рівняння циклічної довговічності $N_p = A$.

Криві довговічності зручно представляти у логарифмічних координатах у вигляді кількох прямих, що перетинаються між собою. Криві довговічності, визначені за критеріями малоциклової пошкоджуваності й експериментально, за формулами (3.4) і (3.5), збігаються за характером, тобто відповідають одному й тому ж закону. Розрахункові дані, отримані на основі формули (3.6), дещо менші за результати мало циклових випробувань з тріщино подібними дефектами.

Механізм розвитку тріщин можна застосовувати для елементів висотних споруд. Для прогнозування зростання втомних тріщин в елементах металевих димових труб і веж необхідно використовувати інформацію про закономірності зростання тріщин під дією циклічних навантажень.

Кінетична діаграма втомного руйнування (КДВР) дозволяє оцінити втомну міцність і довговічність металу в конструкціях димових труб і несучих веж (рис. 3.1).

Кінетична діаграма втомного руйнування складається з трьох ділянок [27, 70, 197]. Перша ділянка – ділянка затухаючої швидкості розвитку тріщини, що з лівого боку обмежена асимптотою, відповідною пороговому значенню коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). Друга ділянка – ділянка, що характеризує стабільне зростання втомної тріщини й описується емпіричним рівнянням Періса.

Третя ділянка відповідає переходу від втомного зростання тріщини до спонтанного руйнування і обмежується з правого боку значенням критичного коефіцієнта інтенсивності напружень при циклічному руйнуванні.

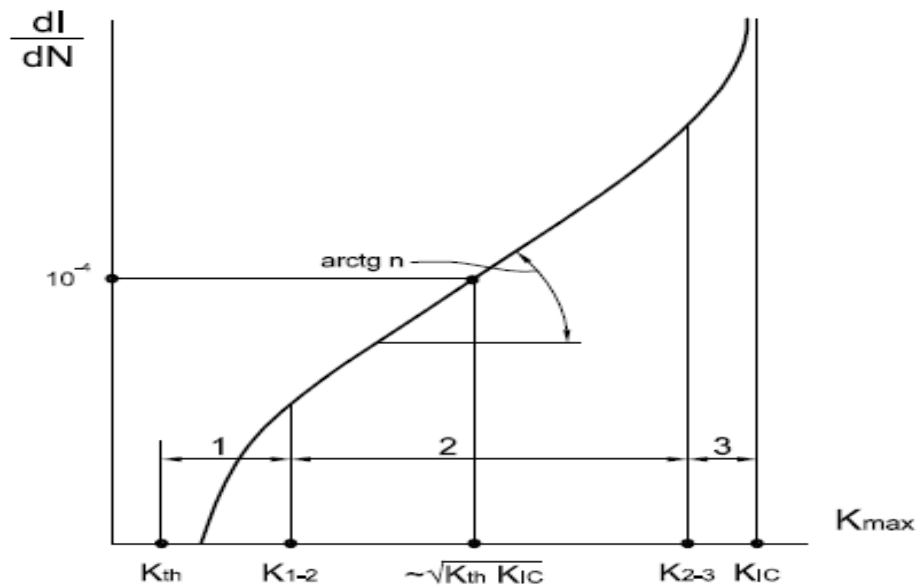


Рисунок 3.1 – Діаграма втомного руйнування в логарифмічних координатах

Для малоциклової і багатоциклової втоми для вірогідного опису повної діаграми втомного руйнування використовують залежність

$$\frac{dl}{dN} = C_0 \left(\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_{fc} - K_{\max}} \right)^q, \quad (3.7)$$

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

C_0, q – емпіричні коефіцієнти;

K_{th} – поріг коефіцієнт інтенсивності напружень;

K_{fc} – критичний коефіцієнт інтенсивності при циклічному навантаженні;
 K_{max} – максимальний коефіцієнт інтенсивності напружень у циклі навантаження.

Більш просте співвідношення $\frac{dl}{dN}$, що враховує локальних характер руйнування у вершині тріщини, описується рівнянням Періса

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (3.8)$$

де ΔK – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень за один цикл;

C, n – експериментальна константа матеріалу.

Коефіцієнт C і показник ступеня n у рівнянні Періса 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 $n = 2...10$, а параметр $C = 10^{-25}...10^{-8}$. Визначення емпіричних залежностей C і n виконують за методикою, розробленою О.О. Барон і Б.С. Бахрачевою [7]. Відповідно до цієї методики допускається, що швидкість поширення втомної тріщини пропорційна до розміру оборотної пластичної зони перед вершиною тріщини, і показник n можна представити у вигляді залежності

$$n = \frac{\lg r_{fc} - \lg r_{th}}{\lg K_{fc} - \lg K_{th}}, \quad (3.9)$$

де r_{fc}, r_{th} – радіуси оборотних пластичних зон, відповідні до величин K_{fc} і K_{th} .

Значення r_{fc}, r_{th} визначається з умов

$$r_{fc} = \frac{(1 - 2\mu)^2}{2\pi} \left(\frac{K_{fc}}{\sigma_m} \right)^2,$$

$$r_{th} = \frac{(1 - 2\mu)^2}{2\pi} \left(\frac{K_{th}}{\sigma_m} \right)^2,$$

де μ – коефіцієнт Пуасона;

σ_m и σ_b – границя текучості і тимчасовий опір.

Проведені дослідження показали існування лінійної залежності між параметрами C і n , яка описується співвідношенням

$$C = (0,2 \cdot 10^{-3}) \exp^{-6.9048n}. \quad (3.10)$$

У результаті можна вважати, що на лінійній ділянці кінетичної діаграми втомного руйнування швидкість поширення тріщини визначається єдиним параметром.

Необхідно зазначити, що рівняння Періса (4.8) описує тільки середню лінійну ділянку кінетичної діаграми втомного руйнування.

При циклічному впливі вітрового навантаження для напружено-деформованого стану стовбурів металевих труб та елементів несучих веж розмах коефіцієнта інтенсивності напружень ΔK дорівнює

$$\Delta K = K_{max} = \sigma_{max} f_{KI} \sqrt{\pi l_m}, \quad (3.11)$$

де σ_{max} – максимальне еквівалентне напруження циклічного навантаження.

У результаті співвідношення (3.7) з урахуванням співвідношення (3.10) матиме вигляд

$$\frac{dl}{dN} = C (\sigma_{max} f_{KI} \sqrt{\pi l_m})^n. \quad (3.12)$$

Оскільки в більшості випадків $\sigma_s \leq \sigma_{0,2}$, оцінювання стійкості конструкцій до тріщин виконується за критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень залежно від критичних значень температур в'язко-крихкого переходу. Статична стійкість конструкцій до тріщин виконується за умови

$$K_I \leq K_{Ic} , \quad (3.13)$$

де K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), $МПа\sqrt{м}$;

K_{Ic} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $МПа\sqrt{м}$.

На пружній стадії роботи матеріалу ($\sigma_3 \leq \sigma_{0,2}$) розрахунок виконується за значеннями коефіцієнта інтенсивності напружень

$$K_I = \sigma_3 f \sqrt{\pi l_m} , \quad (3.14)$$

де σ_3 – фактичне експлуатаційне напруження, $МПа$;

l_m – розмір тріщини чи тріщиноподібного дефекту зварювання з урахуванням пластичної зони у вершині тріщини, мм;

f_{kl} – виправна функція залежно від НДС і орієнтації тріщиноподібного дефекту.

На практиці, оцінювання в'язкості руйнування проводять на основі кореляційної залежності, отриманої В.С. Гіренко [39]. Це зумовлено відносною складністю випробувань за критеріями механіки руйнування, обмеженим об'ємом досліджуваного матеріалу і широким температурним діапазоном роботи конструкцій. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} визначається за величиною ударної в'язкості KCV за формулою:

$$K_{Ic} = \sqrt{0,1 \times KCV(t, k) \times \left(\frac{E}{1 - \mu^2} \right)} , \quad (3.15)$$

де KCV – значення ударної в'язкості, $МДж/м^2$.

Критичну довжину тріщини знаходимо з умови (3.6), вважаючи, що $K_I = K_{Ic}$ і $l_m = l_{кр}$, і розрахунок проводиться для найменшої температури експлуатації

$$l_{кр} = \pi \left(\frac{K_{Ic}(t,k)}{\sigma_3(b) \times f_{kl}} \right)^2 \quad (3.16)$$

Величина циклічного критичного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) відповідає переходу від стабільного розвитку тріщини до нестабільного. У багатьох дослідженнях підтверджено існування лінійної емпіричної залежності між критичним КІН K_{Ic} і циклічним навантаженням КІН K_{fC}

$$K_{fC} = 1,080 K_{Ic} - 34,341 \quad (3.17)$$

У тих самих дослідженнях було встановлено кореляційну залежність між величиною порогового КІН і відношенням σ_v/σ_m , що описується лінійним рівнянням

$$K_{th} = 27,831 \sigma_v/\sigma_m - 23,275 . \quad (3.18)$$

На основі робіт [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 47, 48, 49] виявлена усереднена величина для визначення розвитку тріщини залежно від границі плинності і коефіцієнта асиметрії циклу, що визначається з виразу

$$K_{th} = 12,7 - 0,006 \sigma_m - (11,37 - 0,0065 \sigma_m)R , \quad (3.19)$$

де R – коефіцієнт асиметрії циклу ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$).

Графічне представлення залежностей 3.18 і 3.19 показано на рис. 3.2. Інтегрування рівняння у межах зміни довжини тріщини від $l_{нач}$ до $l_{кон}$ дає вираз для визначення числа циклів навантаження N , необхідних для розвитку тріщини за даний період впливів.

Інтегруючи вираз Періса по dl і виражаючи кінцеву довжину тріщини, отримуємо залежність

$$l_{кон} = \left((l_{нач})^{\frac{2-n}{2}} - N \left[\frac{n-2}{2} \right] \cdot C(\sigma_{max} f_k)^n \right)^{\frac{2}{2-n}} , \quad (3.20)$$

де N – кількість циклів навантаження із заданим рівнем максимальних напружень.

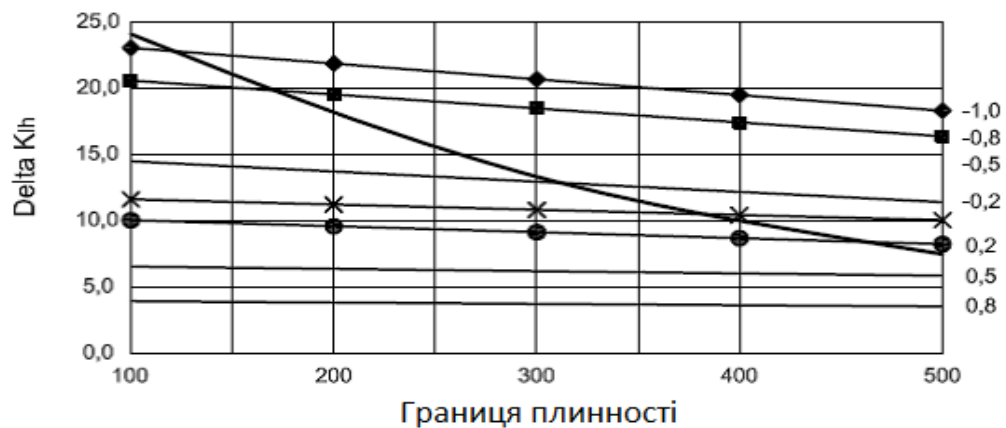


Рисунок 3.2 – Залежність порогового КІН від границі плинності і асиметрії циклу

Для визначення кінцевої довжини тріщини необхідно виконати таке:

- на основі дефектоскопічного контролю визначити максимальну довжину тріщини подібного дефекту і дібрати найбільш придатні вирази для коефіцієнта концентрації напружень K ;
- за фактичними експлуатаційними напруженнями σ_{max} у перерізі і в'язкості руйнування K_{IC} знайти критичну довжину тріщини $l_{кр}$;
- за визначеними напруженнями циклу σ_{max} і σ_{min} розрахувати розмах циклу $\Delta K = K_{max} - K_{min}$;
- обчислити значення постійних матеріалу для циклічної швидкості зростання тріщин за результатами лабораторних випробувань металу на втому;
- визначити криву зростання тріщини $l = N(d)$ в елементах конструкцій і визначити, інтегруючи рівняння Періса, число циклів, за яке вихідна тріщина або дефект l_0 в елементі конструкції досягає критичної величини.

Ця методика проведення розрахунку не дозволяє врахувати специфіку випадкового стаціонарного навантаження стовбурів димових труб вітровими і температурними впливами. Внаслідок цього можливо використовувати вираз (3.20) у такому вигляді:

$$l_{кон(i,j,k)} = \left(\left(l_{нач(i,j,k)} \right)^{\frac{2-n}{2}} - N_{(i,j)} \left[\frac{n-2}{2} \right] \cdot C_{(j,k)} \left(\sigma_{max(i,j)} \gamma_{ост} f_{KI} \right)^n \right)^{\frac{2}{2-n}}, \quad (3.21)$$

де $\gamma_{ост}$ – коефіцієнт, що враховує вплив залишкових зварних напружень і визначається відповідно до [58].

Дія вітрового впливу, температур навколишнього середовища, механічної неоднорідності зон зварних з'єднань і залишкових зварних напружень враховується шляхом підсумування прирощення довжини тріщини. Прирощення довжини тріщини враховується для кожного силового і температурного періоду і для кожної зони, через яку проходить зростання тріщини: металу шва (МШ), навколошовної зони (НШЗ), основного металу (ОМ).

Ресурс конструкції вичерпується періодом, у якому сума прирощень довжини тріщини дорівнює її критичному розміру.

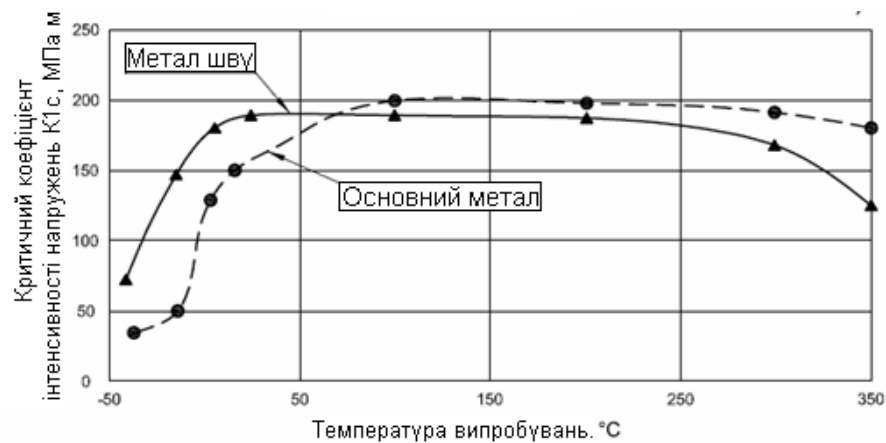
Визначення

- порогового коефіцієнта інтенсивності напружень K_{th} (при якому тріщиноподібний дефект не розвивається протягом заданого числа циклів $N=10^4 \dots 5 \cdot 10^7$),
- критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{lc} (значення найбільшого коефіцієнта інтенсивності напружень циклу, при якому відбувається доламування зразка)

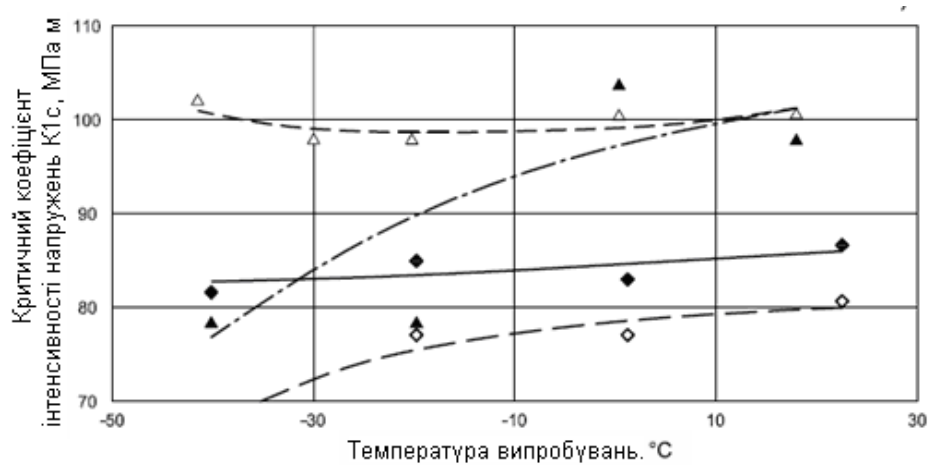
нині виконується на основі емпіричних залежностей і експрес-оцінки на основі відомих залежностей [22, 39,35, 36, 28, 93, 76]. Натурні випробування сталей для визначення параметрів статичної і циклічної стійкості до тріщин

надто складні і дорогі. На рис. 3.3 і 3.4 представлені параметри статичної і циклічної стійкості до тріщин.

а)



б)



в)

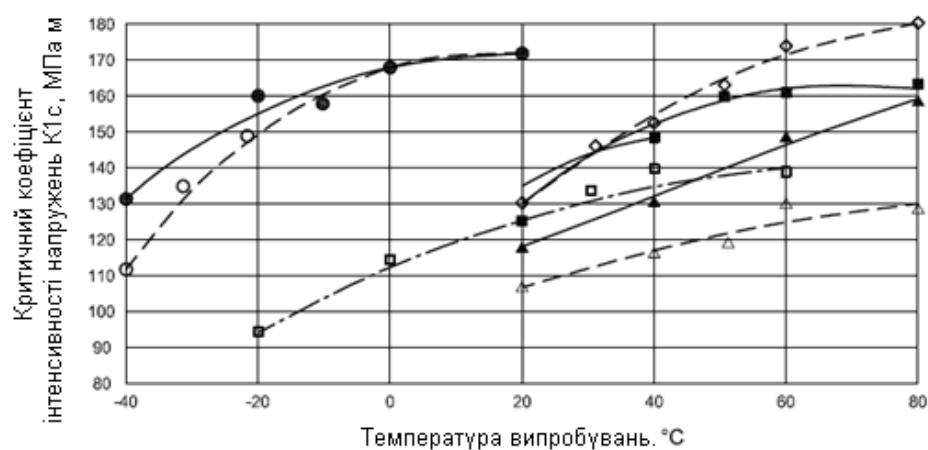


Рисунок 3.3 – Критичні коефіцієнти інтенсивності напружень залежно від температури:

- а) $K_{1с}$ основний метал і метал шва;
- б) $K_{1с}$ випробування зразків товщиною 20 мм;
- в) $K_{1с}$ за емпіричною залежністю В.С. Гіренко (по KCV).

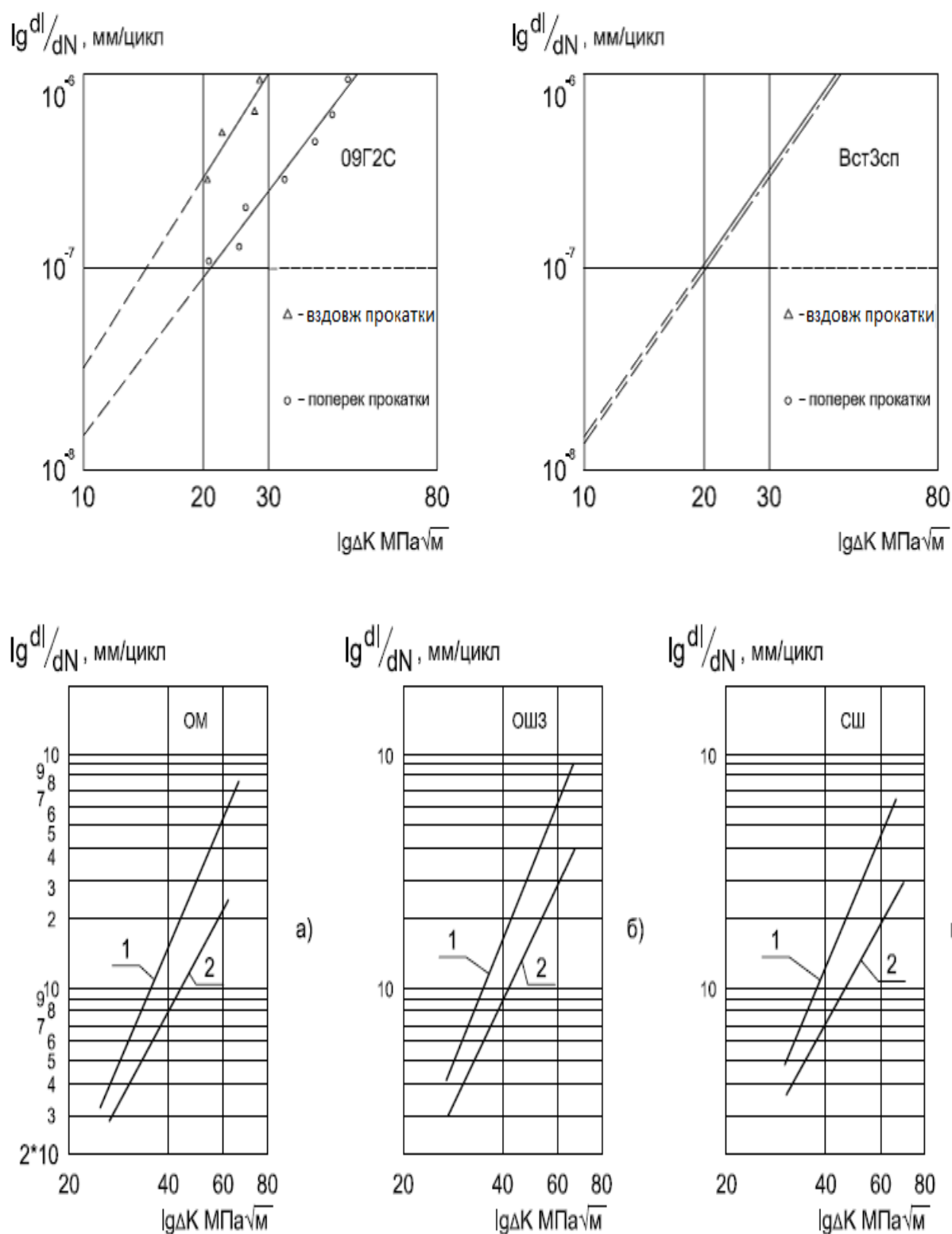


Рисунок 3.4 – Параметри циклічної стійкості до тріщин

Механічні властивості сталей, параметри статичної і циклічної стійкості до тріщин сталей, що застосовуються для виготовлення металевих димових труб і несучих веж, представлені в таблицях 3.1, 3.2, 3.3, 3.4.

Таблиця 3.1 – Механічні характеристики сталей при $T = +20^{\circ}\text{C}$

Марки сталі	σ_m , кгс/мм ²	σ_m , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %
09Г2С	34,50	51,60	30,20	73,7
14Г2АФ	52,00	70,00	24,00	64,0
ВСт3сп	29,83	47,83	28,00	60,7

Таблиця 3.2 – Значення параметрів статичної стійкості до тріщин для сталей ВСт3сп, 09Г2С і 14Г2АФ

$T, ^{\circ}\text{C}$	Розвиток тріщини впоперек прокатки Розвиток тріщини вздовж прокатки		
	ВСт3сп	09Г	14Г2АФ
+20	148,0/125,3	169,7/150,3	73,33
0	140,4/130,4	169,3/148,6	-
-10	142,8/111,8	164,2/135,7	-
-20	147,3/107,9	156,8/128,4	-
-30	138,5/96,4	158,9/120,6	-
-40	130,1/87,2	152,4/110,2	-
-50	124,9/87,3	149,4/103,4	-
-60	125,6/80,1	142,1/94,1	48,28

Таблиця 3.3 – Параметри циклічної стійкості до тріщин

Сталь	Уздовж прокатки		Упоперек прокатки	
	C	n	C	n
09Г2С	$4,82 \cdot 10^{-11}$	2,89	$8,03 \cdot 10^{-11}$	2,36
ВСт3сп	$5,52 \cdot 10^{-11}$	2,61	$8,42 \cdot 10^{-11}$	2,42
14Г2АФ	$1,57 \cdot 10^{-11}$	2,98	-	-

Таблиця 3.4 – Значення параметрів

$T, ^{\circ}\text{C}$	Параметри n/C (мм/цикл)/(МПа)		
	ОМ	НШЗ	МШ
+20	$3,50/1,24 \cdot 10^{-9}$	$3,56/1,25 \cdot 10^{-9}$	$3,50/1,42 \cdot 10^{-9}$
-70	$3,62/8,40 \cdot 10^{-9}$	$2,84/8,10 \cdot 10^{-9}$	$3,50/8,86 \cdot 10^{-9}$

3.2. Розвиток корозійних пошкоджень у металевих димових трубах і несучих вежах

Зовнішні поверхні стовбурів металевих димових і вентиляційних труб, елементів несучих веж піддаються постійному корозійному зносу від

атмосферних впливів, а внутрішня поверхня димових і вентиляційних труб – корозійному впливу димових і вентиляційних газів [43, 115]. На інтенсивність корозійного зносу передусім впливають атмосферні чинники, парціальний тиск водяної пари і відносна вологість, агресивність і температура димових і витяжних газів усередині труби [160].

Корозійні процеси від атмосферних впливів значною мірою залежать від температури і вологості навколишнього середовища. При підвищенні температури від 0 до $+10^{\circ}\text{C}$ парціальний тиск збільшується приблизно у два рази. Інтенсивність атмосферної корозії металу залежить від сезонного коливання вологості. Максимальна швидкість корозії спостерігається в осінньо-зимовий період, коли в повітрі найвищий вміст водяної пари (г/м^3) (абсолютна вологість). Для України це період року з температурою $0\dots+8^{\circ}\text{C}$, коли, поряд з високою вологістю, випадає велика кількість опадів. Кількість циклів переходу температури через 0°C не впливає на швидкість та інтенсивність корозійних процесів у металі.

Швидкість корозійних процесів у металі залежить передусім від агресивності середовища. У таблицях 3.5 і 3.6 наведені класифікації корозійних середовищ відносно металу [26, 27]. Підвищена атмосферна корозійна стійкість сталі досягається завдяки зміні її хімічного складу (легуванню).

Таблиця 3.5 – Класифікація корозійних середовищ

Робоче середовище	Неагресивне	Слабко-агресивне	Середньо-агресивне	Сильно-агресивне
$V_{\text{кор}}, \text{мм/рік}$	не більше 0,01	не більше 0,05	не більше 0,1	більше 0,1

Таблиця 3.6 – Класифікація груп конструкцій за швидкостями корозійного зносу

Група	I	II	III	IV
$V_{\text{кор}}, \text{мм/рік}$	$<0,05$	$0,05\dots0,08$	$0,085\dots0,014$	$>0,15$

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%.

Виходячи з вищесказаного, основні корозійні процеси всередині труби викликані утворенням конденсату [37].

Існують три можливі стани утворення конденсату:

- температура насичення речовин, що конденсуються, нижча за температуру газів і температуру поверхні стінки ($t_z > t_{cm} > t_{nac}$), і в такому режимі у трубі виключена конденсація;
- температура насичення речовин, що конденсуються, нижча за температуру газів, але вища за температуру стінки ($t_z > t_{nac} > t_{cm}$), і в такому режимі утворення конденсату відбуватиметься на поверхні;
- температура насичення речовин, що конденсуються, вища за температуру газів і температуру поверхні стінки ($t_{nac} > t_z > t_{cm}$), і в такому режимі конденсація відбуватиметься в об'ємі димових газів.

На утворення конденсату також впливає вміст твердих частинок (тобто аерозольність димових газів), оскільки саме навколо них у першу чергу починається процес конденсації вологи.

Під одночасною дією розтяжних напружень (у розтягнутих і стиснуто-згинаних елементах) і агресивних середовищ виникає нерівномірна корозія з утворенням гострих тріщин.

3.3. Утворення температурних пошкоджень у димових трубах

Протягом експлуатації в димових трубах виникають значні температурні перепади у стовбурі, викликані різноманітними технологічними процесами.

За наявності футеровки у стовбурі труби виникають серйозні термічні напруження, що призводять до значних зусиль розтягу з холодного боку конструкції і стискання з гарячого. Це викликано тим, що при нагріванні температура шарів, на які безпосередньо впливають джерела нагрівання, зростає значно швидше, ніж температура внутрішніх шарів, які нагрівається лише внаслідок теплопровідності. При охолодженні картина змінюється на діаметрально протилежну – внутрішні шари зберігають отриману температуру значно довше, їх температура падає значно повільніше. Враховуючи, що при нагріванні об'єм матеріалу стовбура і футеровки труби збільшується, а при охолодженні зменшується, в окремих випадках у конструкції будуть виникати внутрішні напруження. Якщо за своєю величиною вони будуть перевищувати сили зчеплення частинок матеріалу між собою, то має початися утворення тріщин.

Границя міцності керамічних матеріалів на розтяг значно менша за границю міцності на стискання, і як наслідок у цих конструкціях відбувається утворення тріщин. Після утворення тріщин у футеровці труби остання досить швидко вийде з ладу, і металевий стовбур піддається дії високих температур у місці утворення тріщини з більш високим градієнтом температур, що призведе до появи додаткових напружень.

Таким чином, на термін служби футеровки металевих димових труб основний вплив здійснюють часті зміни температури газів, що відводяться, і її різкі коливання, або перевищення розрахункової максимальної температури. У першому випадку це призводить до поступового виходу футеровки з ладу внаслідок утворення тріщин і руйнування, у другому – до появи додаткових розтяжних напружень у металевих стовбурах труб.

Пульсуючі температурні режими призводять до того, що напружено-деформований стан стовбура димової труби виявляється іншим, ніж у випадку з трубами, що працюють у звичайному режимі. Стовбур труби під таким впливом піддається дії нестационарних температурних полів, які призводять до виникнення у ньому внутрішніх температурних напружень. Величина і знаки температурних напружень визначаються їхнім характером, тобто різким підвищенням і різким зниженням температури.

При збігові теплопровідності різних матеріалів труби можуть виникати стискаючі напруження, які при охолодженні труби стають розтяжними. Знакозмінні температурні напруження можуть призвести до скорочення терміна служби димової труби.

З підвищенням температури механічні властивості металу, такі як модуль пружності, границі міцності, пропорційності і плинності, зменшуються. При цьому пластичність, як правило, збільшується, але за деяких температур і залежно від складу сталі може і знижуватись.

Для металевих димових труб і веж за нормальної температури статична міцність не залежить від тривалості часу її прикладання. Але за високих температур механічні характеристики металу димових труб визначають як при короткочасних, так і при тривалих випробуваннях. Міцність металу при тривалих випробуваннях і під дією високих температур визначає його тривалу міцність. Напруження, при якому зразок руйнується не раніше заданого часу, називають границею тривалої міцності σ_{dl} . Границя тривалої міцності σ_{dl}^{400} вказує, що при дії напруження 250 МПа зразок руйнується не раніше ніж через 400 годин. Границя тривалої міцності нижча за границю міцності при короткочасних випробуваннях.

На практиці для визначення механічних властивостей зразка металу при тривалій роботі і під дією високих температур його нагрівають в електропечі і навантажують, фіксуючи час до руйнування t_p . Час руйнування зразка зменшується зі зростанням напруження в ньому.

Залежність границі тривалої міцності σ_{dl} від часу за постійної температури $t^{\circ}\text{C}$ описується кривою тривалої міцності. У подвійних логарифмічних координатах ця залежність у певних межах має вигляд прямої лінії.

Розміри навантажених елементів труби за високої температури безперервно змінюються, тобто відбувається повзучість. Залежність залишкової деформації від часу випробувань при постійному напруженні і постійній температурі є кривою повзучості. При випробуванні на повзучість до нагрітого зразка прикладають постійне навантаження і через деякий час вимірюють подовження зразка.

Залишкова деформація спочатку швидко зростає (незатухаюча повзучість), далі протягом основного часу залишається постійною (встановлена повзучість), і наприкінці перед руйнуванням зразка швидкість повзучості стрімко збільшується. Підвищення температури і збільшення напруження прискорює розвиток повзучості.

Найбільше напруження, при якому деформація повзучості за певний відрізок часу не перевищує заданого значення, називається границею повзучості. Границя повзучості позначається $\sigma_{0,2/100} = 150 \text{ МПа}$, що свідчить про те, що при напруженні 150 МПа повзучість за 100 годин викликає відносне подовження 0,2%.

Для фланцевих з'єднань елементів димової труби витягання болта при збільшенні пластичних деформацій із плином часу призводить до зменшення пружної деформації і падінню напружень (ослабленню натягу болтового з'єднання). Це явище називається релаксацією напружень.

Під дією високих температур на металеві димові труби може відбуватися інтенсивне окислення стовбура труби. У нерівномірно нагрітих димових трубах повзучість із плином часу призводить до перерозподілу напружень: у більш холодних зонах напруження збільшується, у більш гарячих – зменшується.

Звичайні маловуглецеві сталі для металевих димових труб при значних напруженнях у стовбурі застосовують до температур 300 – 400⁰С. Низьколеговані жаротривкі сталі на основі нікелю та інших тугоплавких металів застосовують при температурах до 700 – 800⁰С. Для роботи димових труб при більш високих температурах використовують металокерамічні і керамічні матеріали.

У чинних нормативних документах стовбур димової труби розраховують на температурні впливи, відповідно до стаціонарного температурного режиму, і при проектуванні металевих стовбурів цими впливами зазвичай нехтують.

На величину пластичних деформацій впливає температура і рівень напружень, оскільки під циклічною температурною дією температура і величини напружень можуть змінюватись у значних межах, призводячи до найбільш різноманітних комбінацій «температура-напруження».

Урахування цих залежностей можна реалізувати в межах існуючих алгоритмів і методів розрахунку будівельних конструкцій, які можна застосовувати до конструкцій димових труб. Найбільш перспективним методом розрахунку стовбура висотних димових труб, що працюють в умовах пульсуючих температурних режимів, є метод скінченних елементів (МНЕ). Цей метод дозволяє найбільш повно врахувати особливості роботи конструкцій і поведінки матеріалів, характерні при температурних і силових впливах. У якості практичного методу розрахунку димових труб використовуються обчислювальні комплекси Ліра, SCAD, ANSYS та ін., які побудовані на базі методу МНЕ.

Розраховуючи конструкції методом скінченних елементів, необхідно враховувати характер температурних полів і полів вологи, фактичні фізико-механічні та реологічні властивості матеріалів, вплив процесу циклічної температурної дії на розвиток пластичних деформацій і деформацій повзучості, виникнення і розвиток тріщин.

3.4. Деформаційне старіння металу димових труб

У процесі виготовлення, транспортування і монтажу елементів димових труб і несучих веж у металі можливим є виникнення пластичних деформацій. Холодна деформація в металі може відбуватися задовго до експлуатації труби, наприклад, при вальцюванні труб, виконанні формозмінних операцій при виготовленні переходу від горизонтального газоходу до вертикальної частини труби (рис. 3.5), при переході циліндричної частини труби в конічну.



Рисунок .35 – Вигин димової труби при переході від горизонтального газоходу до вертикального стовбура

Як відомо, пластична деформація призводить до зростання міцнісних і зниженню пластичних характеристик металу. Попередня пластична деформація сприяє набуттю крихкості металу елементів димових труб і несучих веж. Тому при виготовленні і монтажі елементів труб, пов'язаних з деформуванням труб, величину деформацій обмежують.

Явище зміни механічних характеристик металу димових труб, пов'язане з холодною пластичною деформацією, називають деформаційним старінням.

При експлуатаванні металевих димових труб холодна деформація може бути наслідком циклічності навантаження в локальних зонах зміни перерізу труб (концентраторах напружень).

Сутність деформаційного старіння полягає у направленій дифузії атомів (вуглецю, азоту та ін.) до наведених пластичною деформацією дислокацій з подальшим блокуванням скупченнями (атмосферами) атомів домішок.

Деформаційне старіння визначається величиною холодної пластичної деформації ε_{id} (ступенем наведених дислокацій), температурно-часовими факторами експлуатації – температурою T_c і часом старіння τ_c .

При цьому необхідно розрізняти зміну механічних характеристик через деформаційне зміцнення і набуття крихкості і власне деформаційне старіння металу.

За фізичною сутністю ефект деформаційного набуття крихкості достатньо простий і оцінюється різницею величин вихідної пластичності (наприклад, відносного подовження δ) і ступеня пластичної деформації. При цьому діаграма розтягу металу звужується і піднімається.

Таким чином, деформаційне набуття крихкості знижує запас пластичності, підвищує границю плинності σ_m , і відношення границі плинності σ_m до границі міцності σ_σ , позначуване коефіцієнтом $k_{m\sigma}$, дорівнює

$$k_{m\sigma} = \sigma_m / \sigma_\sigma. \quad (3.22)$$

При цьому границя міцності сталі не змінюється, тобто

$$\sigma_\sigma^{Do} = \sigma_\sigma, \quad (3.23)$$

де Do – параметр, що являє собою відношення прирощення будь-якої механічної характеристики до її вихідної величини.

Указані закономірності зміни властивостей сталі після деформаційного набуття крихкості піддаються кількісному оцінюванню у випадку апроксимації діаграми розтягу ступеневою функцією

$$\sigma_i = C \varepsilon_i^n, \quad (3.24)$$

де σ_i і ε_i – фактичні напруження і деформації;

C і n – константи міцності і зміцнення.

На відміну від деформаційного набуття крихкості, деформаційне старіння проявляється після експлуатації попередньо пластично деформованого металу і пов'язане зі складними кінетичними і термоактивованими процесами взаємодії домішкових атомів з тільки-но утвореними пластичною деформацією дислокаціями. Тому тут набувають важливості, окрім ступеня пластичної деформації ε_{id} , час τ_c і температура старіння T_c , а також інші чинники.

Величина пружного напруження ($\sigma_o \approx 0,7 \sigma_m$) під час вилежування зразків при штучному і природному старінні ($\tau_c \sim 1$ рік) не позначається на ступені деформаційного старіння. При цьому діаграма розтягу додатково звужується і піднімається. Це є додатковим свідченням того, що основний метал димових труб під дією пружних деформацій не піддається деструктивним змінам.

Деформаційне старіння порівняно швидко насичується і практично повністю гальмується при певному критичному часі старіння $\tau_c = \tau_{скр}$, досягаючи граничної величини $D_c = D_{скр}$ (тут D_c – аналог коефіцієнта D_o).

В умовах природного старіння при $T_c = +20^0$ для маловуглецевих і низьколегованих сталей час старіння $\tau_{скр} \approx 0,5-1,0$ рік. При підвищенні температури експлуатації час старіння $\tau_{скр}$ скорочується. Таким чином, зміна властивостей металу димових труб через деформаційне старіння може повністю відбутися ще до моменту запуску димової труби в експлуатацію.

Як було зазначено вище, джерелом дислокацій у металі димових труб можуть бути пластичні деформації, що виникають під час транспортування, монтажу та експлуатації труб.

Необхідно проаналізувати також вплив деформаційного старіння на метал при виробленні труб холодним формоутворенням. Листовий прокат шляхом вальцювання і зварювання перетворюється на трубу заданого діаметра з деформацією $\varepsilon_0 = t/D$ (тут t і D – товщина і діаметр труби). Деформація складе $\varepsilon_0 \approx 1 \div 2\%$. Для сталі 17ГС ($\sigma_m = 350$ МПа, $\sigma_s = 560$ МПа, $\delta = 32\%$) при вказаних деформаціях ступінь деформаційного старіння $D_c = 2 \div 3\%$. При цьому границя міцності збільшується до $\sigma_s = \sigma_s^{D_0} = 570 \div 580$ МПа, а відносне подовження δ в результаті деформаційного набуття крихкості і старіння знизиться до $\delta = 29 \div 30\%$.

Холодна пластична формозміна труб найбільш інтенсивно позначається на величині σ_m , яка зростає від 350 МПа до 390 ÷ 400 МПа після деформаційного набуття крихкості і старіння ($\varepsilon_0 \approx 1 \div 2\%$). Факт зміни механічних характеристик труб підтверджується при порівняльних випробуваннях зразків, вирізаних з труб незалежно від терміну їх експлуатації і листового прокату сталі 17ГС. Однак при виробництві різних труб деформація ε_0 може бути більше 1 ÷ 2%, і фактичні зміни властивостей металу можуть виявитися помітно вищими за вказані значення.

Під час аналізу діагностичної інформації про механічні характеристики металу необхідно враховувати не тільки розміри труб (відношення t і D), але й розміри і форму зразків, за результатами випробувань яких вона визначалася. Показники міцності для сталі 17ГС плоских зразків можуть бути більшими за ті ж для круглих зразків на 15% (більшою мірою границя плинності σ_m), і при цьому зниження пластичних характеристик може досягати 30%.

У результаті проведеного аналізу можна констатувати, що в процесі експлуатації димових труб механічні характеристики основного металу практично не змінюються. Відзначені відхилення властивостей металу

димових труб, що експлуатуються тривалий час, необхідно пов'язувати з масштабним фактором і явищем технологічної спадковості під час виготовлення, транспортування, зберігання і монтажу. При оцінюванні ступеня зміни властивостей металу димових труб, експлуатованих тривалий час, необхідно розрізняти ефекти деформаційного набуття крихкості і старіння. Факт наближення границь плинності σ_m і міцності σ_v (зростання $k_{mv} = \sigma_m / \sigma_v$), помітний при обстеженні технічного стану металу димових труб, не пов'язаний із часом експлуатації димових труб, а зумовлений прирощенням σ_m (через деформаційне набуття крихкості) і залежить від величини пластичної деформації і характеру діаграми розтягу сталі.

3.5. Утворення і розвиток пошкоджень у зварних з'єднаннях металевих димових труб та елементів веж

Утворення і розвиток пошкоджень металевих димових труб і несучих веж зумовлені великою кількістю різноманітних впливів за тривалий період експлуатації споруд.

Виходячи з даних численних обстежень технічного стану, у переважній більшості випадків пошкодження зароджуються і розвиваються в основному металі, у зварних і болтових з'єднаннях елементів металевих димових труб і веж. Найчастіше несприятливі впливи призводять до утворення і розвитку тріщин у зварних з'єднаннях і в основному металі.

Розгляньмо зародження і розвиток пошкоджень у зварних з'єднаннях елементів металевих димових труб і веж. У розділі 1 проаналізовано способи з'єднання елементів металевих димових труб, основними з яких є зварні з'єднання. У зварних з'єднаннях елементів димових труб використовуються кутові і стикові шви з обробленням крайок (рис. 4.6).

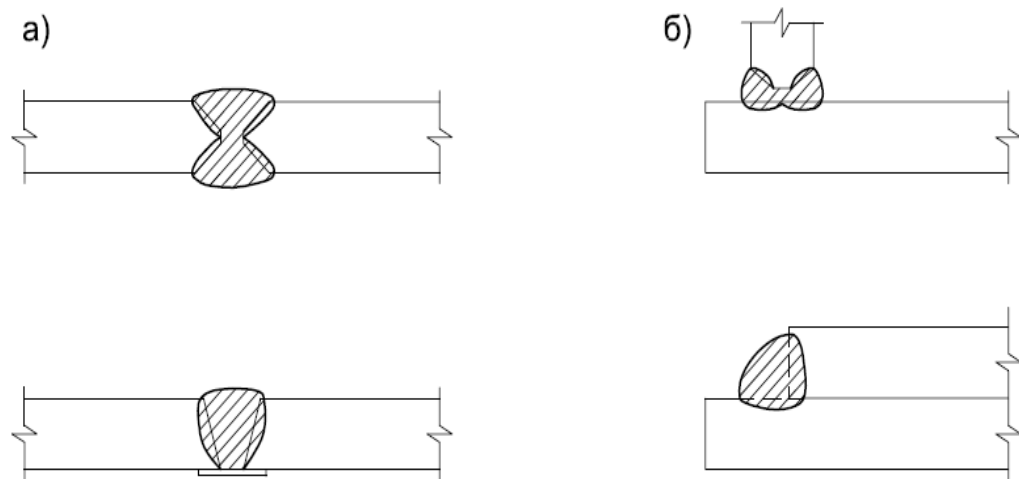


Рисунок 3.6 – Основні типи зварних швів:

а) стикові шви;

б) кутові шви

Дефектоскопічний контроль зварних металевих димових труб у процесі їх виробництва, а також досвід їх обстеження показує, що у зварних з'єднаннях, як правило, є технологічні дефекти – непровари, підрізи, пори, шлакові включення, розшарування та ін. Такі дефекти розміру до 0,3 мм вважаються допустимими у зварних з'єднаннях будівельних металевих конструкцій [76, 108, 161].

До питання про наявність дефектів у зварних з'єднаннях і отримання зварних з'єднань високої якості підходять у виробничих умовах з двох позицій [64, 69, 147] – встановлюють вимоги щодо неприпустимих дефектів і нормують величини допустимих дефектів.

При оцінюванні циклічного ресурсу зварних з'єднань конструкцій необхідно орієнтуватися на фактичні розміри технологічних дефектів, використовуючи дані статистичної обробки результатів дефектоскопії зварних швів під час натурного обстеження конструкцій у найбільш напружених місцях і місцях конструктивної концентрації напружень.

Аналіз розмірів і форми технологічних дефектів типу пор, підрізів, непроварів, виявлених під час виготовлення металевих конструкцій, представлений у дослідженнях К.І. Єрємона [58].

Згідно з даними, наведеними у цій роботі, 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 - 0,4 мм у діаметрі.

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

Непровари і підрізи також належать до тріщиноподібних дефектів, які ініціюють втомні тріщини уже під час перших циклів динамічного навантаження.

За даними роботи [24], непровари є частими дефектами зварювання. За результатами комплексного контролю «ультразвук-рентген» побудовані гістограми розподілення довжини виявлених непроварів, і ці дані наведені на рис. 3.7.

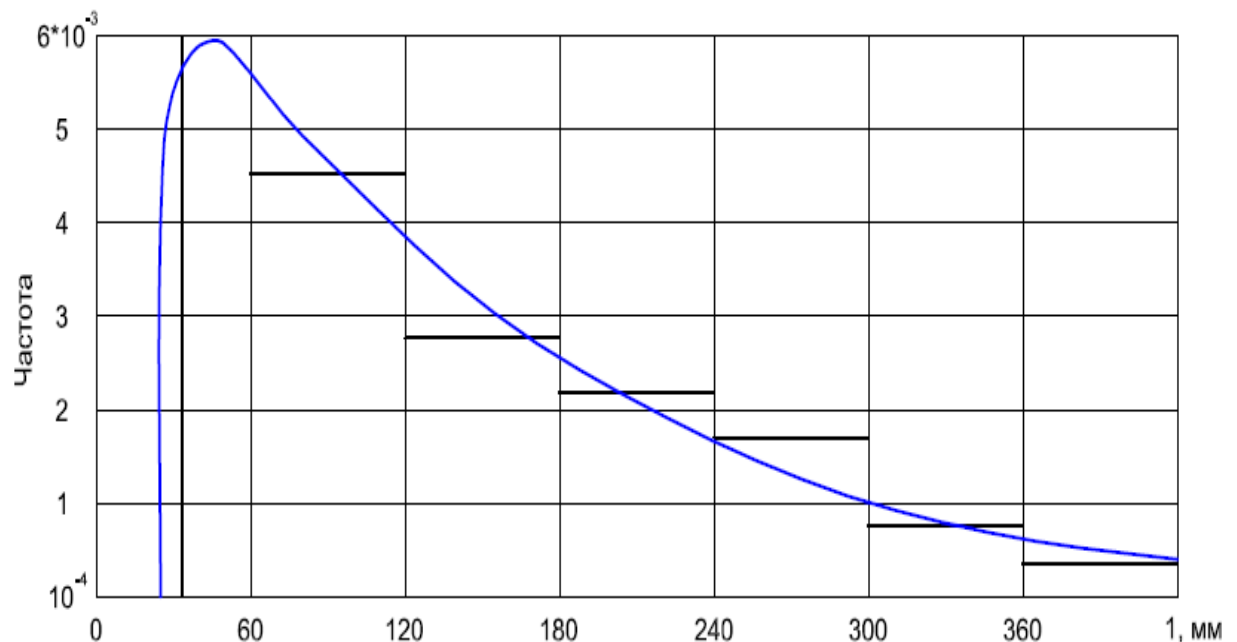
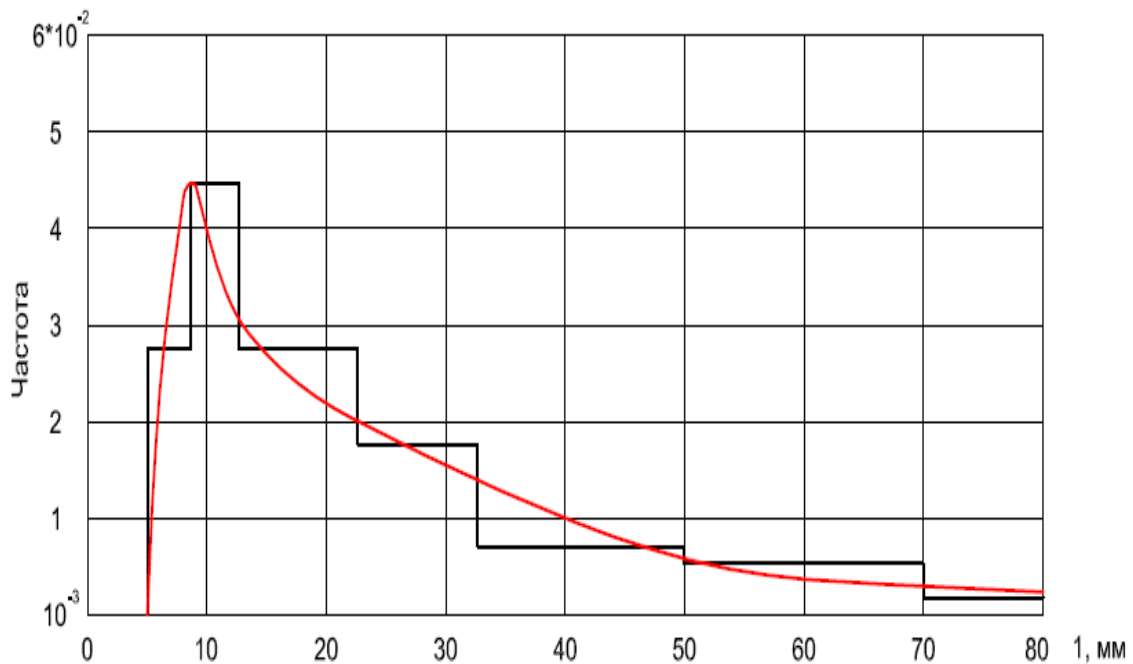


Рисунок 3.7 – Розподіл довжини виявлених непроварів

Гістограми розподілу довжини підрізів, виявлених у зварних швах, наведені на рис. 3.8.



Рунокис 3.8 – Розподіл довжини виявлених підрізів

Аналізуючи наведені результати дефектоскопії зварних швів, можна констатувати високу ймовірність присутності непроварів у зварних з'єднаннях.

Результати статистичного аналізу дефектоскопії зварних швів свідчать, що розміри існуючих дефектів часто перевищують значення, встановлені нормами [132].

При оцінюванні циклічного ресурсу елементів конструкцій необхідно орієнтуватися на ймовірні, характеристичні розміри вихідних дефектів. Значення цих дефектів, згідно з наведеними даними, розташовані в інтервалі 0,01 – 0,5 мм. Необхідно враховувати і дефекти в інтервалі 0,6 – 0,7 мм, ймовірність яких є незначною [56,76].

Число циклів до появи втомної тріщини з вихідного тріщиноподібного дефекту зварювання не перевищує 8-12% сумарного ресурсу циклічної навантажувальності зварної конструкції, відповідно до даних робіт [13,88,89,90], а за даними роботи [59] – менше 5-8%.

У роботах [72, 73, 157] показано, що стадія зародження тріщини практично відсутня і при оцінюванні технічного ресурсу її можна

не розглядати. Розрахунковий ресурс рекомендується визначати тільки на стадії розвитку тріщин. Такий підхід підтверджується численними випробуваннями з'єднань з тріщиноподібними дефектами і відображений у нормативних документах багатьох країн.

У результаті викладеного вище можна констатувати, що аналіз статистичних даних обробки результатів дефектоскопічного контролю зварних швів свідчить про присутність у зварних швах технологічних дефектів зварювання. Виявлені сучасними методами дефектоскопії дефекти зварювання мають розміри, що перевищують допустимі в нормах.

3.6. Висновки до розділу 3

1. Проаналізовано основні закономірності багатоциклової і малоциклової пошкоджуваності металу з урахуванням особливостей напруженого стану елементів від динамічних впливів на висотні споруди.

2. Проведено оцінювання втомної міцності і довговічності металу димових труб на основі кінетичної діаграми втомного руйнування з урахуванням методики, що описує швидкість зростання втомних тріщин і враховує різні коефіцієнти інтенсивності напружень.

3. Проведено аналіз утворення і розвитку пошкоджень від корозійних і температурних впливів.

4. Виконано оцінювання деформаційного старіння металу димових труб після механічних впливів при виготовленні і експлуатації.

5. Проведено аналіз тріщиноподібних пошкоджень та їхнього розвитку у зварних швах димових труб і елементів несучих веж.

3.7. Список використаних джерел у розділу 3

Список використаних джерел у розділі 4 наведено у загальному списку використаних джерел [2, 7, 13, 22, 24, 26, 27, 28, 35, 36, 37, 39, 56, 58, 59, 64, 70, 72, 73, 76, 88, 89, 90, 93, 108, 132, 147, 157, 160, 161, 197].

РОЗДІЛ 4. ВІДМОВИ ВИСОТНИХ СПОРУД

4.1. Загальні дані щодо збирання дефектів і пошкоджень

На основі даних експертиз промислової безпеки та висновків про технічний стан металевих димових труб і несучих веж було проведено статистичну обробку дефектів і пошкоджень. Ці роботи автор виконував спільно з працівниками Харківського національного університету будівництва та архітектури (м. Харків), проектного і науково-дослідного інституту «Харківський Промбудндіпроект» (м. Харків), Центрального науково-дослідного інституту будівельних конструкцій ім. В.О. Кучеренко «ЦНИИСК ім. В.А.Кучеренко» (м. Москва) [45, 46, 47, 48], науково-виробничого консорціуму «НПК Изотермик» (м. Москва) [49, 50, 51, 52, 53, 54, 55]. Було оброблено дані обстежень технічного стану і висновків експертиз промислової безпеки понад ста металевих димових і вентиляційних труб і 25-ти металевих несучих веж. Перелік обстежень металевих димових труб і несучих веж, їх технічні характеристики, терміни і умови експлуатації, дефекти і пошкодження, виявлені під час обстеження, наведені у додатку А.

Обстеження металевих димових труб і несучих веж має на меті визначити дійсний технічний стан труб та їх залишковий ресурс, а також розробити рекомендації щодо ремонту і подальшої нормальної експлуатації. Роботи з обстеження виконують організації, де працюють сертифіковані спеціалісти із цього виду діяльності, які отримали допуск до робіт на висоті (верхолазних робіт) і мають перевірені прилади неруйнівного контролю.

Обстеження металевих димових труб і веж поділяються на планові і позапланові. Терміни проведення планових обстежень металевих труб указані у таблиці 4.1 [96]. Терміни проведення обстежень указані для металевих димових труб, які експлуатуються в умовах неагресивного і

слабкоагресивного середовища, терміни проведення обстежень можуть бути скорочені за висновком спеціалізованої організації.

Таблиця 4.1 – Терміни проведення планових обстежень димових труб

Конструкція труб	Термін проведення першого обстеження після запуску в експлуатацію, років	Термін проведення подальших обстежень труб, років
Металеві димові труби	10	5

За весь час експлуатації металевих димових і вентиляційних труб, несучих веж технічні служби проводять огляди споруд не рідше ніж два рази на рік (зазвичай весною і восени). За результатами огляду можуть призначатися позапланові обстеження труб, якщо під час огляду виявлено таке:

- виникнення і розвиток тріщин в основному металі або у зварних швах стовбура труби;
- руйнування болтових фланцевих з'єднань елементів металевої труби;
- виникнення прогарів у стовбурах металевих труб;
- місцева втрата стійкості стовбура труби;
- відхилення осі стовбура металевої труби від вертикалі, вище за допустиме значення;
- після технологічних аварій, пов'язаних з дією імпульсних навантажень великої потужності (газовий «хлопок», значне підвищення температури відвідних газів тощо);
- у разі прийняття рішення про реконструкцію, консервацію або розконсервацію металевої труби;
- за необхідності переходу на режим роботи, який не відповідає технічній характеристиці труби (інше паливо, інші обсяги або температура газів, що відводяться, тощо);
- за необхідності наявності висновку про стан споруди для отримання підприємством допуску (ліцензії) на експлуатацію виробництв і об'єктів.

Визначення залишкового ресурсу, несучої здатності конструкцій і терміну безпечної експлуатації труб здійснюється на основі аналізу документації (проектної, ремонтної) і умов експлуатації, результатів обстеження технічного стану. За результатами обстеження технічного стану приймається рішення про подовження терміну безпечної експлуатації конструкцій споруд або встановлюється заборона їх подальшого експлуатування. При обстеженні технічного стану металевих димових труб виявлені дефекти і пошкодження вносяться у Відомість дефектів і пошкоджень.

Дефектами труб і веж прийнято називати відхилення фактичних розмірів, форми і якості конструкцій та їх елементів від вимог нормативних документів або робочого проекту, що виникли під час виготовлення, транспортування або монтажу конструкцій [96]. Також дефекти можуть бути закладені у проект у разі відступання від нормативних вимог.

Дефекти поділяються на зовнішні (видимі) і внутрішні (приховані). Дефекти, що виникли під час зведення і монтажу, мають бути усунені до приймання споруди в експлуатацію. На практиці незначні дефекти конструкцій не завжди усуваються до монтажу і до приймання висотних споруд. Металеві конструкції з незначними дефектами можуть експлуатуватися, і дефекти усувають лише під час тривалої експлуатації висотних споруд. Пошкодженнями труб вважають відхилення якості, форми і фактичних розмірів конструкцій від вимог нормативних документів або проекту, що виникли під час експлуатації.

4.2. Аналіз дефектів і пошкоджень металевих димових труб компресорних станцій магістрального газопроводу

Проведемо аналіз дефектів і пошкоджень, виявлених під час обстеження 47 металевих труб компресорних станцій «Задніпровська», «Кіровоградська» і «Південнобузька», встановлених уздовж траси

магістрального газопроводу «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани» [143, 144, 145, 178, 180, 182]. Компресорні станції уведені в експлуатацію у 1988 р. й експлуатуються майже 30 років. Досить цікавими є те, що дефекти і пошкодження, виявлені під час обстеження великої кількості металевих димових труб однакової висоти і перерізу, виготовлених з однієї марки сталі, що працюють практично в однакових умовах корозійних, температурних і динамічних впливів.

Від початку металеві димові труби на всіх компресорних станціях мали однакові геометричні розміри і перерізи, були виготовлені з однакових марок сталей, палеві фундаменти під труби теж були практично однакові. Конструктивне оформлення баз металевих труб на різних компресорних станціях дещо відрізнялося. На двох станціях («Задніпровська» і «Кіровоградська») між опорним листом бази і стовбуром труби встановлені ребра жорсткості, на одній станції («Південнобузька») стовбур труби приварений до опорного листа, і ребра жорсткості відсутні.

Вітрові і зовнішні корозійні впливи на металеві труби на всіх компресорних станціях практично однакові, оскільки вони знаходяться в одному вітровому районі і середньо агресивному навколишньому середовищі. Температура відвідних продуктів згоряння природного газу під час роботи компресорів у металевих трубах однакова, і корозійний вплив газів на внутрішню поверхню є аналогічним в усіх трубах.

Час знаходження в експлуатації компресорів (і, як наслідок, димових труб) зовсім неоднаковий, що призводить до різного корозійного пошкодження внутрішніх поверхонь труб. Також дуже сильно відрізняється експлуатація труб з боку технічного персоналу – механічні пошкодження елементів димових труб, антикорозійного захисту металу, утеплення зовнішніх поверхонь та ін.

Розгляньмо основні дефекти і пошкодження, виявлені під час обстеження металевих димових труб компресорних станцій.

На компресорній станції «Південнобузька» встановлено 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б. Для відведення продуктів згоряння кожен турбоагрегат підключений до двох димових труб (рис. 4.1). Загальна кількість обстежуваних труб на станції склала 15 штук (одна труба демонтована). Кожна труба знаходиться в експлуатації до 250 днів на рік.



Рисунок 4.1 – Металеві димові труби КС «Південнобузька»

Довжина металевих димових труб – 22.00 м, зовнішній діаметр труб – 22,10 мм. Димові труби циліндричного обрису жорстко (консольно) затиснені в монолітних залізобетонних ростверках на палевій основі з 4 паль.

Стовбур металевих димових труб зварений з 16 елементів стиковими швами. Елементи димової труби виготовлені зі сталі ВСт3сп5. Висота елементів від 950 мм до 1500 мм. Товщина стінки труби нижнього елемента – 16 мм, з позн. 1.04 м до позн. 14.85 м товщина стінки – 10 мм, вище позн. 14.85 м – товщина стінки 5 мм. Опорний лист труб виготовлений з листа товщиною 30 мм. Під анкерні болти М36 в опорному листі прорізані 12 отворів діаметром від 40 мм до 45 мм. Ребра жорсткості між опорним листом і стовбуром труби відсутні. На позн. 0.80 м у трубі вварене металеве днище з листа товщиною 5 мм. На позн. 1.04 м у трубу входить газохід розміром 4712×1040 мм.

Турбоагрегати працюють на природному газі. Температура газів на вході в димову трубу $+250^{\circ}\text{C}$.

Вимірювання фактичної товщини стінки стовбура труби проводилось у чотирьох точках перерізу труби (через 90°) з позн. – 0.05 м до позн. 2.00 м через 250-300 мм; з позн. 2.00 м і вище – в чотирьох точках перерізу труби через 500 мм. З позн. 4.00 м і до позн. 14.50 м, де стовбур труби утеплений ззовні, вимірювання товщини проводилося через 1500 мм (рис. 5.2).

а)



б)



в)



Рисунок 4.2 – Визначення товщини стовбурів димових труб:

- а) зачистка точок «болгаркою» для визначення товщини стінки на позн. 0.00 м;
- б) проведення вимірювань товщини стінки стовбура труби на позн. 15.00 м;
- в) проведення вимірювань товщини стінки стовбура труби на позн. 21.00 м

Під час обстеження металевих димових труб були виявлені такі основні дефекти і пошкодження:

- повне руйнування захисного лакофарбового покриття на зовнішній поверхні труб;
- корозійний знос стовбурів труб на позначках від 0.80 м до 2.00 м склав від 2% до 17%, вище позн. 3.00 м – 5-10% (рис. 4.3);
- корозійний знос днищ труб – від 40% до 100% (рис. 4.4);
- корозійний знос опорних плит і ребер жорсткості баз усіх димових труб від 2% до 5%;
- на багатьох анкерних болтах відсутні гайки, затяг усіх болтів ослаблений;
- опорні листи баз розрізані від зовнішньої грані до отворів під анкерні болти.

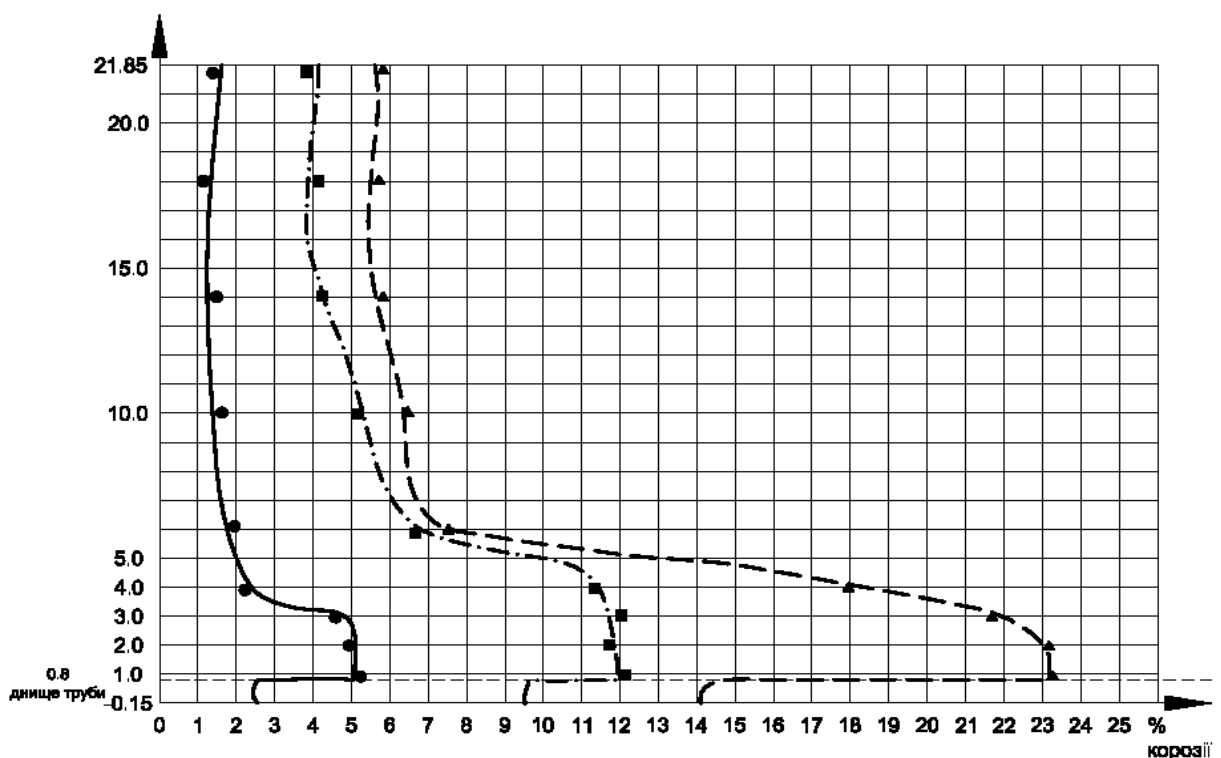


Рисунок 4.3 – Корозійний знос стовбурів димових труб

КС «Південнобузька»:

- — — — — корозійний знос стовбура димової труби №14;
- · — — — корозійний знос стовбура димової труби №10;
- - - - - корозійний знос стовбура димової труби №2

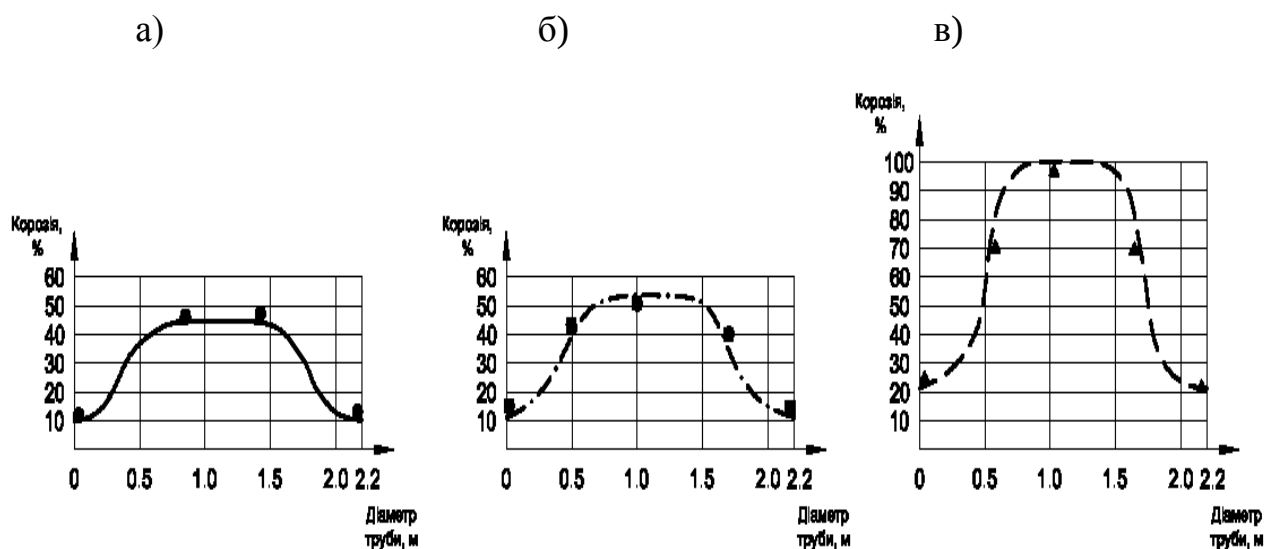


Рисунок 4.4 – Корозійний знос днищ димових труб КС «Південнобузька»:

- а) ——— — корозійний знос днища димової труби №14;
- б) — · — — корозійний знос днища димової труби №10;
- в) - - - - - — корозійний знос днища димової труби №2

На компресорній станції «Кіровоградська» встановлено 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б. Для відведення продуктів згоряння кожен турбоагрегат підключений до двох димових труб. Загальна кількість досліджуваних труб на станції – 16 труб (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Металеві димові труби КС «Кіровоградська»

Геометричні характеристики металевих димових труб, палеві фундаменти, умови експлуатації аналогічні до компресорної станції «Південнобузька». При цьому є й конструктивні особливості. Так, опорний лист труб виготовлений з листа товщиною 30 мм. В опорному листі прорізано 12 отворів діаметром 39 мм під анкерні болти М36. З двох сторін кожного болта встановлені металеві ребра жорсткості товщиною 8 мм.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труб:

- повне руйнування захисного лакофарбового покриття на зовнішній поверхні труб;
- корозійний знос стовбурів труб на позначках від 0.80 м до 3.00 м склав від 4% до 18%, вище позн. 3.00 м – 3-15% (рис. 4.6);
- корозійний знос днищ труб – від 40% до 100% (рис. 4.7);
- на багатьох анкерних болтах відсутні гайки, затяг усіх болтів ослаблений;
- деякі ребра жорсткості баз вирізані, у багатьох ребрах вирізані ділянки під анкерні болти.

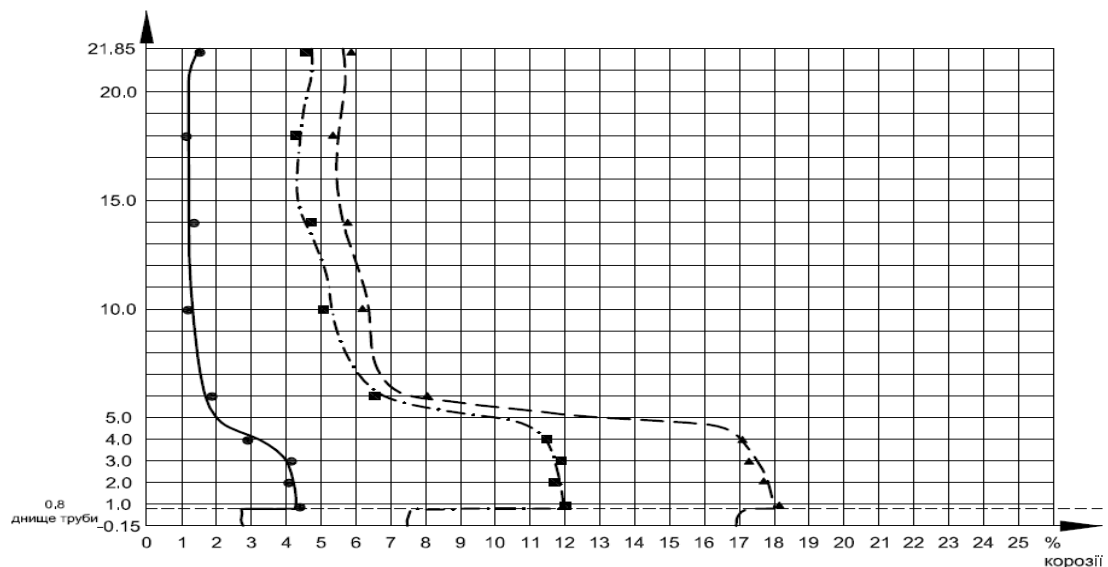


Рисунок 4.6 – Корозійний знос стовбурів димових труб КС «Кіровоградська»:

- — — — — корозійний знос стовбура димової труби №7;
- · — — — корозійний знос стовбура димової труби №10;
- - - - - корозійний знос стовбура димової труби №8

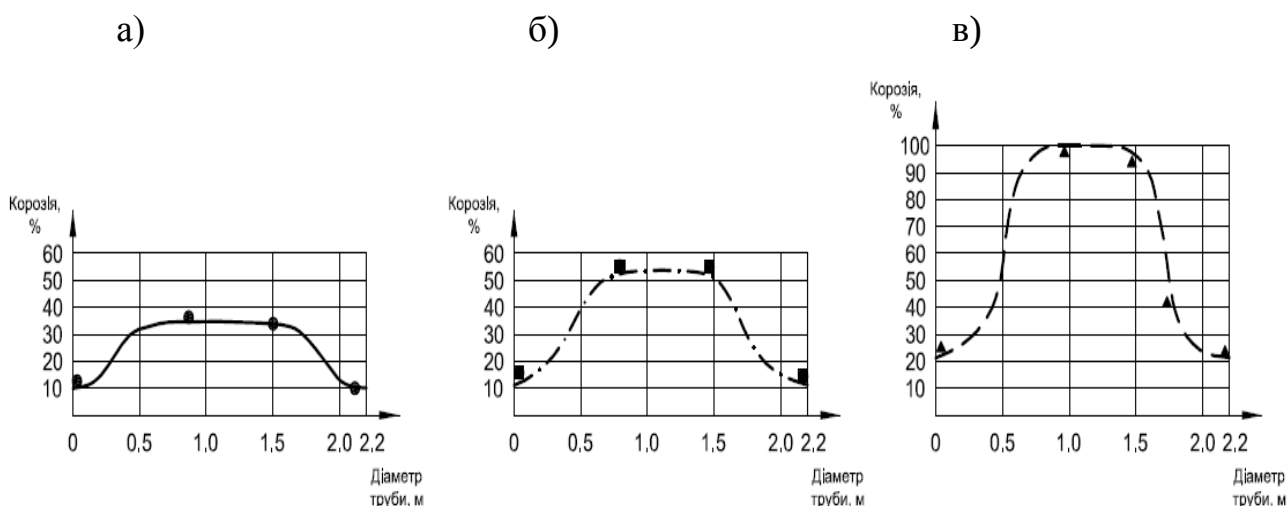


Рисунок 4.7 – Корозійний знос днищ димових труб КС «Кіровоградська»:

- а) ——— – корозійний знос днища димової труби №7;
- б) — · — – корозійний знос днища димової труби №10;
- в) - - - - - корозійний знос днища димової труби №8

На компресорній станції «Задніпровська» встановлено 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б. Для відведення продуктів згоряння кожен турбоагрегат підключений до двох димових труб (рис. 4.8). Загальна кількість обстежуваних труб на станції – 16 труб.



Рисунок 4.8 – Металеві димові труби КС «Задніпровська»

Геометричні характеристики металевих димових труб, палеві фундаменти, умови експлуатації компресорної станції «Задніпровська» аналогічні до попередніх. Відмінністю є те, що опорний лист труб виготовлений з листа товщиною 22 мм, підкріплювальні ребра бази виготовлені з листа товщиною 10 мм під анкерні болти М42.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труб:

- повне руйнування захисного лакофарбового покриття на зовнішній поверхні труб;
- корозійний знос стовбурів труб на позначках від 0.80 м до 3.00 м склав від 5% до 15%, вище позн. 2.00 м – 5-10% (рис. 4.9);
- корозійний знос днищ труб – від 25% до 70% (рис. 4.10);
- на багатьох анкерних болтах відсутні гайки, затяг усіх болтів ослаблений;
- вигини ребер жорсткості від ударів;
- деякі ребра жорсткості баз вирізані, у багатьох ребрах вирізані ділянки під анкерні болти і гайки.

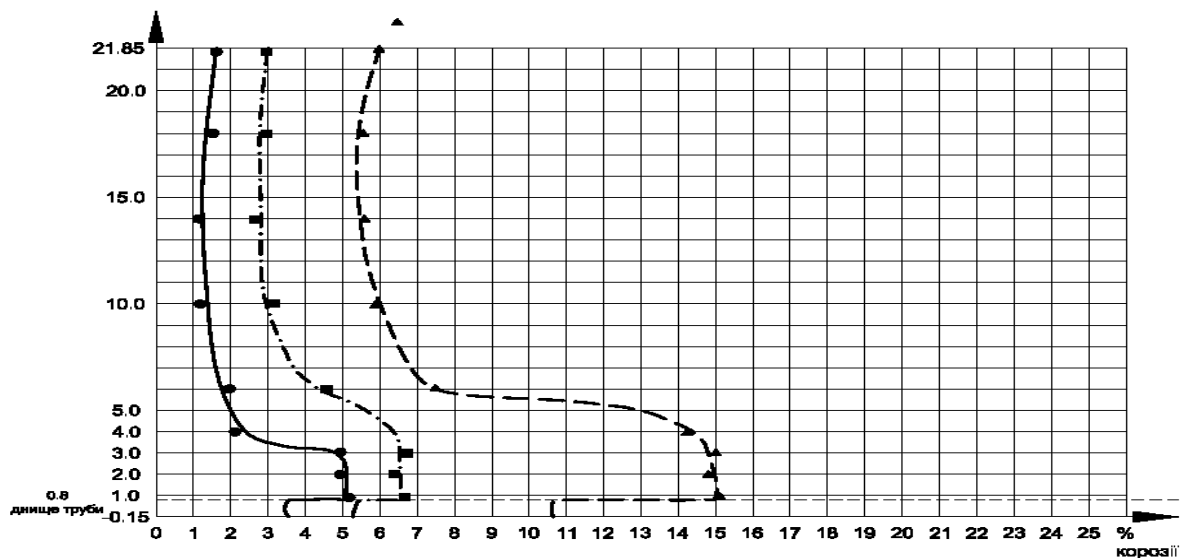


Рисунок 4.9 – Корозійний знос стовбурів димових труб КС «Задніпровська»:

- — — — — корозійний знос стовбура димової труби №2;
- · — — — корозійний знос стовбура димової труби №8;
- - - - - корозійний знос стовбура димової труби №12

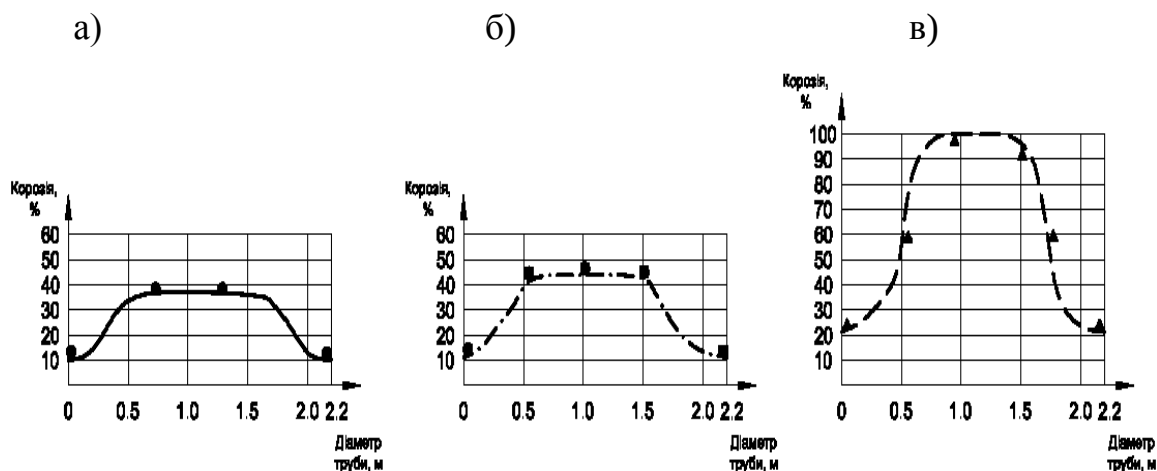


Рисунок 4.10 – Корозійний знос днищ димових труб КС «Задніпровська»:

- а) ——— - корозійний знос днища димової труби №2;
- б) — · — — - корозійний знос днища димової труби №8;
- в) - - - - - корозійний знос днища димової труби №12.

Отримані дані щодо корозійного зносу показують великий діапазон значень. Цей великий діапазон значень корозійного зносу димових труб пов'язаний передусім з фактичним часом роботи компресорів і, як наслідок, димових труб. На кожній компресорній станції розташовано по 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б, до кожного з яких підведено по дві труби. У звичайному режимі на кожній компресорній станції працюють три або чотири турбоагрегати, а інші перебувають у резерві або регламентному ремонті. Турбоагрегати працюють у важкому режимі експлуатації, тиск газу на виході з турбоагрегату складає 70 атмосфер.

Під час прокачування додаткових об'ємів газу вмикають кілька резервних турбоагрегатів, у разі малих об'ємів прокачування газу – працюють один або два турбоагрегати. При цьому одні турбоагрегати працюють значно триваліший час, ніж інші. Про це свідчать журнали роботи турбоагрегатів. Час перебування турбоагрегатів у роботі відрізняється у три рази і більше.

При врахуванні нерівномірного корозійного зносу по довжині труби визначними є максимальні значення величини корозії. Максимальний корозійний знос стовбура знаходиться у рівні днища і входу газоходу

в димову трубу. Ця ділянка труби є розрахунковою, оскільки там згинальний момент і поздовжні сили є максимальними.

Характерними дефектами кріплення димових труб усіх компресорних станцій є непроектне розташування анкерних болтів у фундаментах. Для кріплення баз колон з фундаментами в опорних плитах були вирізані додаткові отвори під анкерні болти. Отвори під анкерні болти вирізались шляхом газового різання з розрізанням опорного листа від краю і до місця розташування анкерного болта, що значно ослабляє опорний лист. Також при потраплянні на ребро жорсткості бази труби анкерного болта, встановленого не за проектом, ребро жорсткості вирізалось (рис. 4.2 а).

Виявлені під час обстеження дефекти і пошкодження 47 металевих димових труб трьох компресорних станцій характерні для димових труб на інших обстежених димових трубах.

4.3. Типологія дефектів і пошкоджень димових та вентиляційних труб і несучих веж

Виявлені під час численних обстежень технічного стану металевих димових труб дефекти і пошкодження можна класифікувати за різними типами і величиною пошкоджень [169, 171, 175, 179, 187, 188]. Основними дефектами і пошкодженнями металевих димових труб є:

- руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж 30% площі поверхні труби (розтріскування, лущення, розшарування і відсутність антикорозійного покриття), поверхнева корозія металу (рис. 4.11);
- підрізи, непровари, шлакові включення і пори у зварних з'єднаннях елементів труб (рис. 4.12 а);
- тріщини в основному металі, швах і навколошовній зоні (рис. 4.12 б);
- корозійний знос стінки стовбура труби (рівномірний) більше 10% товщини (рис. 4.13);

- локальні або виразкові (враховуючи прогари) корозійні пошкодження стінки стовбура труби до 100% товщини (рис. 4.14);
- ослаблення або пошкодження болтових з'єднань (враховуючи анкерні болти) (рис. 4.15);
- пошкодження ребер, траверс і плит опорних вузлів (рис. 4.16);
- пошкодження елементів металевих опор під трубу (рис. 4.17);
- місцева втрата стійкості стовбура труби (рис. 4.18);
- тріщини в бетоні фундаменту під трубою, руйнування захисного шару бетону з оголенням і корозією робочої арматури (рис. 4.19).

а)



б)



в)



Рисунок 4.11 – Руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж 30% поверхні стовбура труби, поверхнева корозія металу труб:

- а) димова труба факельної установки;
- б) димова труба печі трубозварювального цеху;
- в) димова труба компресорної станції «Задніпровська»»

а)



б)

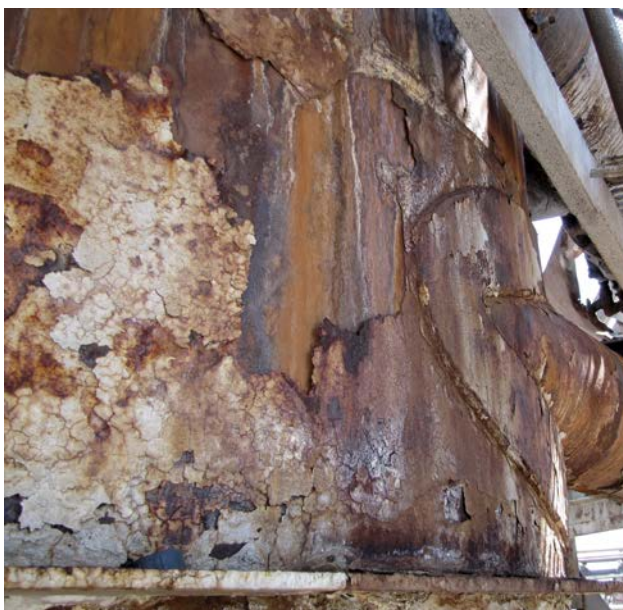


Рисунок 4.12 – Непровари і тріщини у зварних швах металевих димових труб:

- а) непровари у зварному шві кріплення стовбура димової труби і плити бази;
- б) тріщина у стиковому шві елементів димової труби

Непровари і тріщини в зварних швах є технологічними дефектами зварювання, які достатньо часто зустрічаються при обстеженнях. Циклічні навантаження призводять до розвитку наявних тріщин і утворенні нових на місці непроварів, більших 0,3 мм.

а)



б)



Рисунок 4.13 – Корозійний знос стінки стовбура димової труби:

- а) корозійний знос димової труби факельної установки понад 10%;
- б) корозійний знос (зсередини) димової труби понад 10%

а)



б)



в)

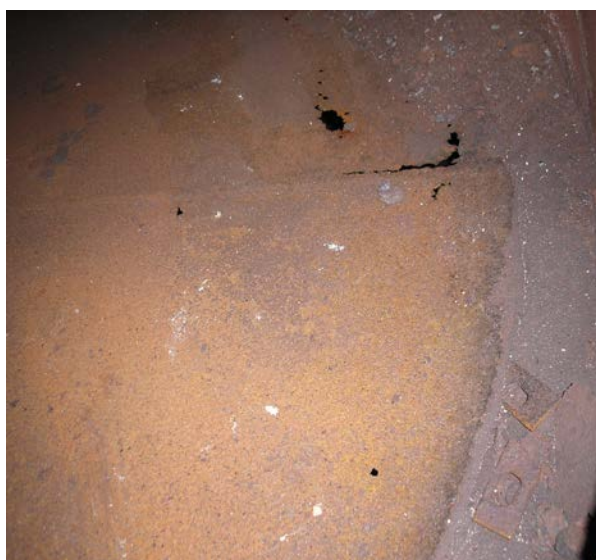


Рисунок 4.14 – Локальні або виразкові (враховуючи прогари) корозійні пошкодження стінки стовбура труби:

- а) прогар у стовбурі димової труби факельної установки;
- б) локальний корозійний знос до 70% труби;
- в) корозійний знос днища труби до 100% КС «Задніпровська»

Корозійний вплив димових і вентиляційних газів на внутрішню поверхню труб на протязі тривалого терміну і неможливість антикорозійного захисту зсередини, призводять до суттєвих пошкоджень (прогарів, ділянок зі 100% корозійним зносом).

а)



б)



Рисунок 4.15 – Ослаблення або пошкодження болтових з'єднань:

- а) ослаблення затягнення болтів фланцевого з'єднання елементів труби;
- б) гайки на анкерних болтах кріплення труби до фундаменту відсутні

а)



б)



Рисунок 4.16 – Пошкодження ребер опорних вузлів труби:

- а) опорне ребро бази димової труби вирізане;
- б) деформація опорного ребра труби механічного характеру.

Ослаблення та відсутність болтів з'єднання обумовлено недостатнім технічним наглядом, пошкодження опорних ребер та опорних плит механічними пошкодженнями при експлуатації (рис. 4.16).



Рисунок 4.17 – Елементи решітки металевої опори під димову трубу вирізані



Рисунок 4.18 – Утрата стійкості стовбура димової труби

Утрата стійкості стовбура труби може бути обумовлена значним корозійним зносом ствола, динамічними та температурними впливами і являє безпосередню для надійної експлуатації (рис. 4.18).



Рисунок 4.19 – Тріщини в бетоні шириною розкриття до 5 мм,
руйнування бетону фундаменту під трубу

Обстеження внутрішньої футеровки димових і вентиляційних труб проводилося зсередини труби – з днища труби (вхід у трубу через спеціальні люки), з оголів'я труби, зі спеціальних люльок-ліфтів, установлених всередині труби і закріплених на оголів'ї.

Під час обстеження футеровки металевих димових труб виявлені такі основні дефекти і пошкодження футеровки металевих димових труб [170, 172]:

- вертикальні і нахилені тріщини шириною розкриття понад 0,3 мм (рис. 4.20 а);
- локальні руйнування футеровки і теплоізоляції (рис. 4.20 б);
- випинання (утрата стійкості) кладки футеровки і обвалення кладки футеровки труби (рис. 4.20 в);
- пошкодження слізникових консолей;
- проміжки між ланками футеровки.

а)



б)



в)



Рисунок 4.20 – Пошкодження кладки футеровки у трубі:

- а) тріщини у кладці футеровки труби шириною розкриття до 5 мм;
- б) руйнування кладки футеровки і теплоізоляції труби;
- в) випинання (утрата стійкості) кладки футеровки димової труби

Тріщини у кладці футеровки, руйнування футеровки на значній площі, утрата стійкості футеровки обумовлені нестационарними температурними впливами димових газів або вибухами в трубі газів (рис. 4. 20).

Під час обстеження конструкцій несучих металевих веж були виявлені численні дефекти і пошкодження [181, 184, 185].

На основі отриманих даних виконано класифікацію дефектів і пошкоджень за основними типами.

Основними дефектами і пошкодженнями обстежених металевих ґратчастих веж є:

- руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж на 30% площі поверхні елементів решітки – розтріскування, лущення, розшарування і відсутність антикорозійного покриття (рис. 4.21, 4.22);
- елементи решітки вирізані під час експлуатації або не встановлені на етапі монтажу;
- місцеві згини елементів решітки вежі (рис. 4.21);
- корозійний знос елементів вежі, що перевищує 10% площі перерізу (рис. 4.23);
- міжщільни́на (міжпакента) корозія елементів вежі (рис. 4.24);
- тріщини у зварних швах, руйнування зварних швів кріплення елементів решітки (рис. 4.25);
- пошкодження упорів кріплення з площини димової труби, великі проміжки між трубою і упорами (рис. 4.26);
- втрата стійкості фасонки опорних розкосів вежі (рис. 4.27);
- деформація несучих і огорожувальних елементів вежі, деформація анкерних болтів (рис. 4.28);
- тріщини в бетоні фундаментів, руйнування бетону фундаменту і замонолічування несучої металевої балки під вежу (рис. 4.29).



Рисунок 4.21 – Руйнування захисного лакофарбового покриття, місцеві згини розпірки і розкосу, поверхнева корозія елементів вежі.

а)



б)



Рисунок 4.22 – Руйнування захисного лакофарбового покриття:

а) фасонки, пояси і розкоси з труб, поверхнева корозія;

б) пояси і розкоси, настилу майданчиків, поверхнева корозія

Площа руйнування захисного лакофарбового покриття та поверхневого корозійного зносу по довжині високих веж різна, що обумовлено зміною агресивності середовища по висоті.

Найбільші величини корозійних пошкоджень елементів металевих конструкцій розташовані в нижній частині вежі (на рівні промислових цехів та установок). На рівні верхніх відміток корозійний знос зменшується так як зменшується агресивність робочого середовища (рис. 4.23).

а)



б)



в)



Рисунок 4.23 – Корозія елементів металевої вежі:

- а) корозійний знос поясу і опорних ребер вежі 20%;
- б) корозійний знос елементів решітки і розпірок понад 10%;
- в) корозійний знос балок і настилу діафрагми понад 10%

Під час роботи конструкцій несучих веж в сильно агресивному середовищі (інтенсивність корозії 1 мм/рік) продукти корозії в міжщилинному просторі можуть руйнувати зварювальні шви (рис.4.24).



Рисунок 4.24 – Міжщилинна корозія між парними кутиками розпірки вежі, зварні шви зруйновані



Рисунок 4.25 – Руйнування захисного лакофарбового покриття, тріщини у зварних швах кріплення розкосів і фасонки

Зазори між ковзним упором і елементами діафрагми труби, які значно перевершують проекти, при вітрових навантаженнях і температурних впливах можуть призвести до виключення їх із роботи і втрати стійкості труби (рис.4.26).



Рисунок 4.26 – Понаднормовий проміжок між елементом діафрагми і ковзним упором труби



Рисунок 4.27 – Утрата стійкості фасонки опорного розкосу вежі

а)



б)



Рисунок 4.28 – Деформація елементів вежі:

- а) деформація анкерних болтів, зварні шви між елементами відсутні;
- б) деформація огорожі робочого майданчика

а)



б)



Рисунок 4.29 – Руйнування бетону фундаменту і бетонування опорної балки:

- а) руйнування бетону фундаменту, оголення і корозія арматури до 5%;
- б) руйнування бетонування опорної металевої балки під вежу, корозійний знос хомутиків до 100%.

Руйнування бетону фундаментів пов'язано з корозією робочої арматури та хомутиків і обумовлено низьким рівнем морозостійкості і водонепроникності бетону.

4.4. Пошкоджуваність металевих димових труб і несучих веж

Металеві димові труби і несучі вежі перебувають під різними впливами, описаними вище, й експлуатуються у важких умовах і складному напруженому стані. Усі ці чинники несприятливо позначаються на експлуатаційній довговічності висотних споруд і призводять до утворення і накопичення дефектів і пошкоджень. Розвиток дефектів і пошкоджень здатний призвести до виходу з ладу як окремих конструктивних елементів, так і всієї споруди в цілому.

У літературі практично відсутні дані про пошкоджуваність металевих димових труб і несучих веж. Також відсутні статистичні дані щодо виявлених дефектів і пошкоджень конструкцій цих висотних споруд.

На основі висновків експертиз промислової безпеки і обстежень технічного стану понад ста металевих димових труб класифіковані основні дефекти і пошкодження і проведено статистичний аналіз пошкоджуваності конструкцій.

На рис. 4.30 наведена статистична діаграма щодо дефектів і пошкоджень стовбурів димових і вентиляційних труб.

Виникнення і розвиток дефектів і пошкоджень зумовлене сумарним корозійним, температурним, вітровим і експлуатаційним впливом. Але для кожного типу пошкоджень є певний домінуючий вплив.

Аналізуючи отримані дані, можна констатувати, що

- руйнування захисного лакофарбового шару, корозійний знос стовбура труби (тип дефектів – 1, 2, 3) викликані корозійними і температурними впливами;
- тріщини в основному металі, швах і навколошовній зоні (тип дефекту – 4), ослаблення затягнення болтів викликані в основному вібраційними і температурними впливами.

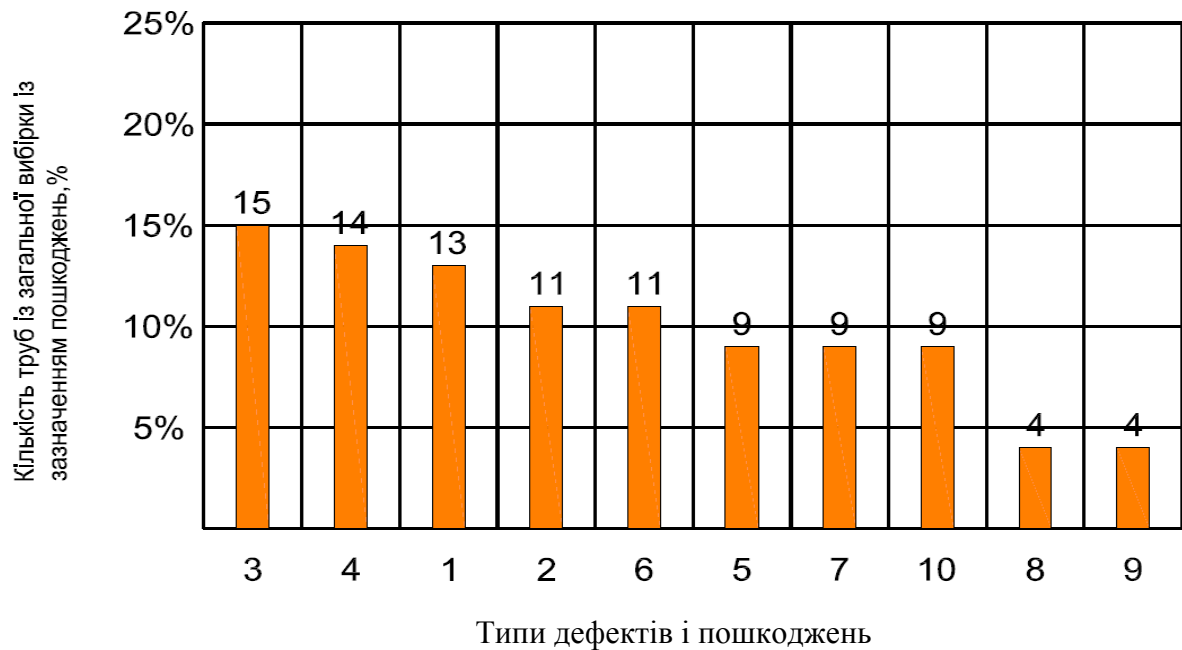


Рисунок 4.30 – Пошкоджуваність металевих стовбурів димових труб:

- 1) руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж на 30% площі усієї поверхні стовбура (розтріскування, лущення, розшарування і відсутність антикорозійного покриття);
- 2) корозійний знос стінки стовбура труби (рівномірний) понад 10% товщини стінки;
- 3) локальні і виразкові (враховуючи прогари) корозійні пошкодження стінки стовбура труби до 100%;
- 4) тріщини в основному металі, швах і навколошовній зоні;
- 5) підрізи, непровари, шлакові включення і пори зварних з'єднань елементів труб;
- 6) ослаблення або пошкодження болтових з'єднань (враховуючи анкерні болти);
- 7) пошкодження ребер, траверс і плит опорних вузлів труби;
- 8) пошкодження елементів металевих опор під трубу;
- 9) утрата стійкості стовбура труби;
- 10) тріщини в бетоні фундаменту під трубою, руйнування захисного шару бетону з оголенням і корозією арматури

Пошкодження анкерних болтів, пошкодження ребер, траверс і плит опорних вузлів труби, пошкодження елементів металевих опор під трубу (типи дефектів – 6, 7, 8) зумовлені незадовільним обслуговуванням технічним персоналом. У відсотках із загальної вибірки дефекти умовлені людським фактором складають 24%.

Утрата стійкості стовбура труби (тип дефекту – 9) найчастіше викликана непрацюванням упорів на робочих майданчиках, що розв'язують трубу з площини і передають на вежу вітрові навантаження з труби. У відсотках із загальної вибірки дефектів перераховані дефекти складають 4%.

Тріщини в бетоні фундаменту під трубою, руйнування захисного шару бетону з оголенням і корозією арматури (тип дефекту – 10) зумовлені недостатньою водонепроникністю і морозостійкістю бетону і корозією арматури. У відсотках із загальної вибірки дефектів перераховані дефекти складають 25%.

Наскрізнi корозійні пошкодження стінки стовбура труби (дефект 5), тріщини в основному металі і швах (дефект 4), утрата стійкості стовбура труби (дефект 9) є дефектами, що становлять безпосередню небезпеку руйнування труби, і мають бути усунені негайно після виявлення. У відсотках із загальної вибірки дефектів перераховані дефекти складають 9%.

Руйнування захисного лакофарбового покриття (дефект 1) має локальний характер і не становить небезпеки для несучої здатності труб, тому воно має бути усуненим під час поточного ремонту. Із загальної вибірки дефектів і пошкоджень, виявлених під час обстеження, руйнування захисного лакофарбового покриття становить 13%.

Дефекти і пошкодження (дефекти 2, 3, 6, 7, 8, 10) при подальшому розвитку можуть перетворитися на дефекти, що становлять безпосередню загрозу руйнування, і мають бути усунені під час планового ремонту. У відсотках із загальної вибірки дефектів перераховані дефекти складають 62%.

Статистичні діаграми пошкоджуваності футеровки металевих димових труб з різними дефектами і пошкодженнями представлені на рис. 4.31.

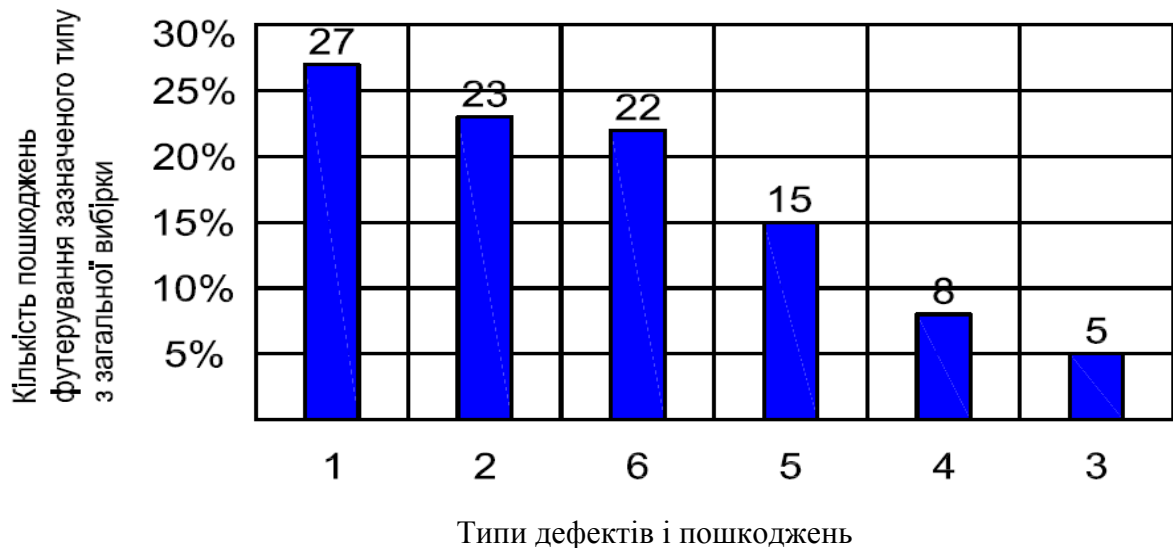


Рисунок 4.31 – Пошкоджуваність футеровки металевих димових труб:

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

Основними впливами на конструкції футеровки, що призводять до утворення вертикальних і похилих тріщин (тип дефекту – 1), локальних пошкоджень футеровки (тип дефекту – 2), випинання кладки футеровки (тип дефекту – 3), 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%. При виявленні таких дефектів необхідно здійснити зупинку виробництва і провести капітальний ремонт. Експлуатація димових труб з такими дефектами не допускається.

Вертикальні або похилі тріщини температурного чи силового характеру у футеровці (дефект 1) металевих димових труб із загальної вибірки дефектів складають 27% і при незначній ширині розкриття (до 0,3 мм) не становлять суттєвої небезпеки для несучої здатності труби.

Далі з розвитком ширини розкриття тріщини може відбутися випадіння ділянок кладки, пошкодження теплоізоляції й утворення прогарів у стовбурі труби.

Вертикальні і нахилені тріщини у футеровці стовбура труби необхідно затирати розчином на основі жаростійкого цементу і меленої шамотної цегли.

Відсутність теплоізоляції (дефект 4), проміжки між ланками футеровки (дефект 6) є дефектами будівельних робіт щодо облаштування футеровки. Такі дефекти призводять до утворення конденсату на внутрішній поверхні труби і сприяють активнішому корозійному зносу. Зазвичай такі дефекти необхідно усувати під час проведення планових ремонтних робіт.

За даними обстежень технічного стану і експертиз промислової безпеки 20-ти металевих несучих веж також проведено статистичний аналіз пошкоджуваності конструкцій і побудовані діаграми дефектів і пошкоджень. Отримані результати наведені на рис. 4.32.

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.

Тріщини у зварних швах, руйнування зварних швів кріплення елементів решітки (тип дефекту – 6) виникають від постійних вітрових динамічних навантажень і становлять безпосередню небезпеку руйнування вежі. Такий дефект має бути усунений негайно після виявлення.

Утрата стійкості фасонки опорних розкосів вежі (тип дефекту – 8) пов'язана з вібраційними впливами і недоліками при конструюванні вузлів. Утрата стійкості фасонки опорного розкосу може призвести до втрати стійкості елемента і вежі в цілому. Підсилення фасонки необхідно здійснити негайно після виявлення цього дефекту.



Рисунок 4.32 – Пошкоджуваність несучих конструкцій витяжних веж:

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

Корозійний знос металевих конструкцій несучих веж за тривалий період експлуатації залежить від конфігурації поперечного перерізу елементів.

На основі даних натурних обстежень витяжних веж проаналізовано пошкоджуваність елементів веж різного перерізу з корозійним зносом понад 10%.

Обстежувані елементи веж мали такі перерізи: елементи круглого (замкненого) перерізу із труб, елементи таврового перерізу з кутиків, елементи хрестового перерізу з кутиків, елементи з прокатних двотаврів і швелерів, елементи зварного двотаврового перерізу.

На рис. 4.33 представлена діаграма пошкоджуваності елементів вежі різного поперечного перерізу з корозійним зносом понад 10%.

Зазначимо, що аналізувати отримані дані складно через те, що кількість веж з різними перерізами поясів не однакова, термін і умови експлуатації веж різні. Однак, навіть виходячи з цих даних, очевидно, що кількість елементів круглого перерізу з корозійним зносом понад 10% мінімальна, а кількість елементів таврового і хрестового перерізу із кутиків – найбільша.

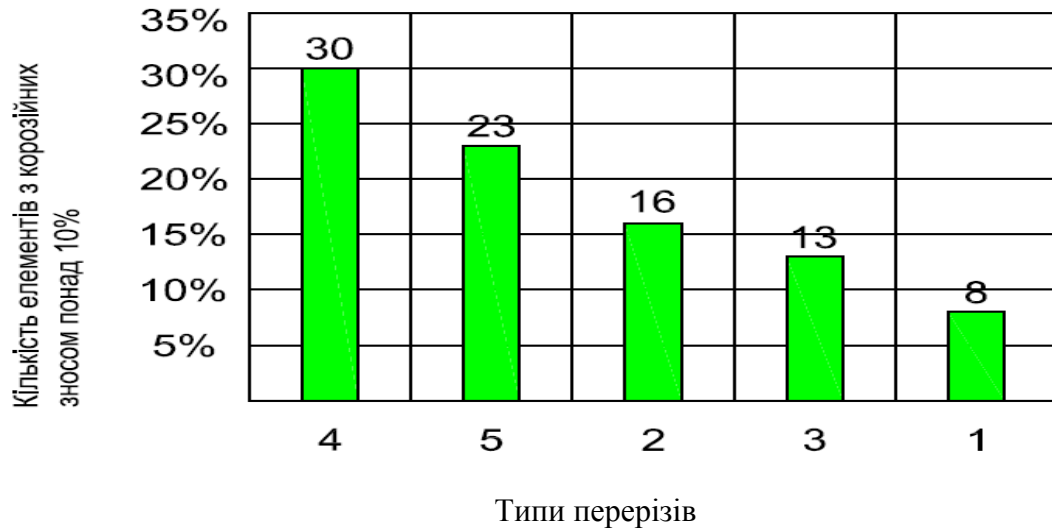


Рисунок 4.33 – Пошкоджуваність елементів вежі різного поперечного перерізу з корозією понад 10%:

- 1) елементи круглого замкненого перерізу;
- 2) елементи таврового перерізу;
- 3) елементи хрестового перерізу з кутиків;
- 4) елементи двотаврового складеного перерізу;
- 5) елементи з прокатних двотаврів і швелерів

Всі ці дані підтверджують доцільність використання круглого замкненого перерізу для несучих елементів поясів вежі як з точки зору рівностійкості, так і з точки зору корозійної стійкості.

4.5. Категорії небезпечності дефектів і пошкоджень елементів металевих висотних споруд

Виявлені під час обстеження дефекти і пошкодження потенційно становлять різну небезпеку для конструкцій металевих висотних споруд [171, 176].

У методичних рекомендаціях [96] різні дефекти і пошкодження металевих димових труб і веж віднесені до трьох категорій небезпечності:

- категорія «А» дефекти і пошкодження основних несучих конструкцій труб, що становлять безпосередню небезпеку їх руйнування;
- категорія «Б» – дефекти і пошкодження труб, що не становлять під час їх виявлення безпосередньої небезпеки руйнування несучих конструкцій, але здатні у подальшому викликати пошкодження інших елементів і вузлів або при розвитку пошкодження перейти в категорію «А»;
- категорія «В» – дефекти і пошкодження локального характеру, які при подальшому розвитку не можуть вплинути на основні несучі конструкції труб.

Дефекти і пошкодження труб категорії «В» і окремі пошкодження з незначним розвитком категорії «Б» допускається усувати за технічною документацією, розробленою проектно-конструкторськими підрозділами організацій, що експлуатують об'єкт. Дефекти і пошкодження категорії «А» і пошкодження категорії «Б», які здатні при швидкому розвитку перейти в категорію «А», мають усуватися тільки відповідно до технічної

документації на капітальний ремонт, розробленої спеціалізованою організацією на основі комплексного обстеження усіх конструктивних елементів.

На основі даних, отриманих при обстеженні металевих димових труб і несучих веж, усі основні дефекти і пошкодження класифіковані залежно від виду і місця розташування, ймовірних причин виникнення і представлені у таблиці 4.2. У цій таблиці визначені методи виявлення або ознаки виникнення дефектів і пошкоджень, описані заходи щодо попередження їх подальшого розвитку. Усі виявлені дефекти і пошкодження віднесені до однієї з трьох категорій небезпеки – «А», «Б» або «В».

До категорії дефектів «А», які становлять безпосередню небезпеку руйнування металевих димових труб та веж, віднесено наступні:

- нахил фундаменту труби більше допустимого значення, злам стовбура труби при відхиленні від вертикалі понад 250 мм;
- корозійний знос металоконструкцій понад 30%, підвищена корозія ділянок стовбура, елементів вежі в опорній частині, у зоні фланцевих з'єднань, у місцях кріплення світлофорних майданчиків і драбин (знос до 100%);
- тріщини в основному металі і швах, наскрізні отвори у стовбурі труби;
- зрізання болтів, що з'єднують елементи труби, порушення щільності з'єднання царг;
- місцева втрата, стійкості випинання стінки стовбура, утворення гофр;
- пошкодження горизонтальних ковзних упорів, що фіксують стовбур труби у металевій вежі;
- деформація і випинання футеровки понад 300мм, локальні руйнування кладки футеровки, обвалення футеровки;
- пошкодження несучих вузлів підвісу або опори в основі, вузлів гасителів коливань.

Таблиця 4.2 – Характеристика основних дефектів і пошкоджень димових і вентиляційних труб і несучих веж

№ п/п	Вид і місце розташування дефекту і пошкодження	Конструкція труби і вежі	Ймовірна причина виникнення дефекту і пошкодження	Метод виявлення або ознака виникнення дефекту чи пошкодження	Заходи щодо попередження подальшого розвитку дефекту і його усунення	Категорія небезпечності
1	2	3	4	5	6	7
1	Нахил фундаменту димової труби більше допустимого значення	Металеві димові труби і вежі	Порушення несучої здатності фундаменту	Вимірювання нахилу геодезичним методом	Укріплення основи. Випрямлення нахилу металевих труб	«А»
2	Злам стовбура труби при відхиленні верху від вертикалі понад 200 мм	Металеві труби	Однобічне руйнування стику царг труби; місцева втрата стійкості або місцеве руйнування стінки стовбура труби	Візуально – місце зламу, вимірювання нахилу стовбура геодезичними методами	Відновлення вузлів	«А»
3	Руйнування захисного лакофарбового покриття більш ніж на 30% поверхні металоконструкцій	Металеві димові труби і несучі вежі	Вплив зовнішнього середовища	Візуальне обстеження	Відновлення антикорозійного захисту	«В»
4	Корозія металоконструкцій (корозійний знос до 30%)	Металеві димові труби і несучі вежі	Вплив зовнішнього середовища при порушенні антикорозійного захисту металоконструкцій	Візуальне й інструментальне обстеження	Відновлення антикорозійного захисту, ремонт або заміна пошкоджених металоконструкцій	«Б», «А»

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
5	Тріщини в основному металі і швах	Металеві димові труби і несучі вежі	Мікротріщини у зварних швах, динамічні впливи вітрового навантаження	Візуальне й інструментальне обстеження	Ремонт основного металу або швів методом заварювання або підсилення накладками	«Б», «А»
6	Підвищена корозія ділянок стовбура, елементів веж в опорній частині, у зоні фланцевих з'єднань, у місцях кріплення світлофорних майданчиків і драбин (знос до 100%)	Металеві труби і несучі вежі	Концентратори утворення корозії. Локальна і виразкова корозія	Контроль корозійного зносу ультразвуковими приладами	Періодичність контролю корозійного зносу з урахуванням швидкості корозії в локальних зонах, ремонт стовбура методом заміни зношених ділянок або їх підсилення	«А», «Б»
7	Наскрізні отвори у стовбурі труби	Металеві труби	Корозійне руйнування металу через відсутність антикорозійного захисту	Візуальне й інструментальне обстеження	Ремонт стовбура щодо закладання локальних пошкоджень на площі менше 0,5 м ² , визначення несучої здатності стовбура з урахуванням ступеня зносу суміжних ділянок стовбура	«А», «Б»
8	Ослаблення затягнення болтів фланцевих стиків, анкерних болтів	Металеві труби і несучі вежі	Зниження затягнення болтів унаслідок релаксації матеріалу, динамічних впливів	Візуальне й інструментальне обстеження, за слідами виходу конденсату димових газів	Перевірка ступеня затягнення болтів, контроль за збереженням ущільнення з'єднань царг і фрагментів труби	«Б»

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
9	Зрізання болтів, що з'єднують елементи труби, порушення щільності з'єднання царг	Металеві труби і вежі	Непроектне з'єднання елементів, корозійний знос болтів	Візуально, за виходом конденсату	Заміна пошкоджених болтів, ремонт швів між елементами	«А», «Б»
10	Місцева втрата стійкості, випинання стінки стовбура, утворення гофр	Металеві димові труби	Корозійний знос стінки стовбура в зоні деформації, підвищення температури експлуатації	Візуально, товщинометрія стовбура труби ультразвуковим приладом	Підсилення металевого стовбура обичайками	«А»
11	Порушення щільності компенсатора на димовій трубі	Підвісні металеві труби	Динамічні впливи на конструкцію компенсатора, довговічність обраного матеріалу	Візуально	Заміна зношеного компенсатора, ущільнення	«Б»
12	Нещільності в місцях введення газоходів	Металеві димові труби	Дефекти будівництва, корозійні та інші види руйнування, ущільнення вузлів сполучення газоходу і стовбура труби	Візуально	Ремонт щодо відновлення щільності введення газоходів	«Б»
13	Пошкодження горизонтальних ковзних упорів, що фіксують стовбур у металевій вежі	Металеві несучі вежі	Нерівномірні вітрові навантаження	Візуально за руйнуванням горизонтальних упорів. Вимірювання проміжків	Заміна і ремонт пошкоджених горизонт. упорів, перевірка корозійного зносу стінки на всьому периметрі стовбура на позначці упорів. Ремонт стовбура в місцях наскрізних отворів і щілин	«А», «Б»

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
14	Руйнування теплоізоляції	Металеві димові труби	Старіння матеріалу, руйнування мінвати, діатомової цегли під дією конденсату димових газів	При відкритті футеровки, при тепловізійному обстеженні труби	Відновлення теплоізоляції при заміні футеровки. Відновлення теплоізоляції матеріалом, що піниться	«Б»
15	Вертикальні тріщини у футеровці розкриттям понад 5 мм	Металеві димові труби	Порушення теплового режиму експлуатації труби, а також несправність теплоізоляції	Візуально при внутрішньому обстеженні, а також при тепловізійному обстеженні без зупинки труби	Заміна футеровки і теплоізоляції при розкритті тріщин понад 20 мм. Ремонт фібробетоном. Установка внутрішнього склопластикового	«Б»
16	Сітка тріщин в окремих ланках футеровки з розкриттям понад 2 мм	Металеві димові труби	Порушення теплового режиму експлуатації труби	Візуально при внутрішньому обстеженні	Ремонт пошкоджених ділянок футеровки шляхом нанесення фібробетону, торкрету, кислотостійкої обмазки	«Б»
17	Деформації і випинання футеровки понад 300 мм, локальні руйнування кладки футеровки	Металеві димові труби	Вибух газу в газовідвідному тракті, сульфатиція розчину цегляної кладки футеровки	Візуально при внутрішньому обстеженні, відбирання проб на хімічний аналіз	Заміна футеровки, локальний ремонт кладки	«А»
18	Обвалення футеровки	Металеві димові труби і газоходи	Вибух газу в газовідвідному тракті	Візуально, фотозйомка	Заміна футеровки	«А»
19	Несправність кріплення драбин, світлофорних майданчиків та їх огорожувальних елем.	Металеві димові труби і несучі вежі	Дефекти монтажу і пошкодження у період експлуатації	Візуально при зовнішньому обстеженні	Ремонт і закладання пошкоджених металоконструкцій і кріплень	«Б»

Завершення таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6	7
20	Накопичення відкладень золи на днищі труби і в газоходах	Металеві димові труби	Мала швидкість димових газів при високозольному паливі, великі аеродинамічні опори у тракті газоходу	Візуально, вимірюванням товщі відкладень золи	Реконструкція газоходів, періодичний контроль, очищення днища від золи, підтримування справного стану перекриття у трубі і газоходах	«В»
21	Руйнування вимощення біля труби або вежі (тріщини, просідання)	Металеві труби і несучі вежі	Неякісне виконання зворотного засипання вимощення, механічні впливи	Візуально, фотореєстрація	Ремонт вимощення	«Б»
22	Руйнування захисного шару бетону фундаменту труби, оголення і корозія арматури	Металеві труби і несучі вежі	Вплив навколишнього середовища, механічні впливи	Візуально, контроль корозійного зносу	Ремонт бетону фундаменту	«Б»
23	Пошкодження несучих вузлів підвісу або опори в основі	Металеві труби	Пошкодження у процесі монтажу й експлуатаційного режиму, часовий знос	Візуально, за характерними звуками (скрип, скрегіт)	Ремонт	«А»
24	Пошкодження несучих вузлів гасителів коливань	Металеві труби і несучі вежі	Пошкодження у процесі монтажу й експлуатаційного режиму, часовий знос	Візуально, технічними засобами	Ремонт	«А», «Б»

4.6. Оцінка технічного стану металевих димових труб і веж, граничні значення дефектів і пошкоджень

На основі аналізу дефектів і пошкоджень, результатів перевірних розрахунків визначається технічний стан конструкцій металевих димових труб і веж. Відповідно до вітчизняних нормативних документів [36, 37, 119], за несучою здатністю й експлуатаційними властивостями металеві конструкції труб і несучих веж відносять до одного з таких станів:

- стан конструкцій I – нормальний;
- стан конструкцій II – задовільний;
- стан конструкцій III – непридатний для нормальної експлуатації;
- стан конструкцій IV – аварійний.

При нормальному стані (I) фактичні зусилля в елементах конструкцій не перевищують допустимих за розрахунком, відсутні дефекти і пошкодження, які перешкоджають нормальній експлуатації або знижують несучу здатність і довговічність.

При задовільному стані (II) за несучою здатністю і умовами експлуатації відповідають нормальному стану (I), але наявні дефекти і пошкодження, здатні знизити довговічність конструкції, і необхідні заходи щодо захисту конструкцій.

При непридатному для нормальної експлуатації стані (III) конструкції перевантажені або мають дефекти і пошкодження, що свідчать про зниження її несучої здатності, але на основі перевірних розрахунків і аналізу пошкоджень можливо забезпечити її цілісність на час підсилення.

При аварійному стані (IV) конструкції перевантажені або мають дефекти і пошкодження, що свідчать про зниження її несучої здатності, як при стані III. Але на основі перевірних розрахунків і аналізу дефектів і пошкоджень неможливо гарантувати цілісність конструкцій на період підсилення (можливе крихке руйнування), необхідно вивести людей із зони

можливого обвалення, виконати негайне розвантаження, ужити інших заходів безпеки.

У документах на обстеження димових і вентиляційних труб інших країн [96] технічний стан конструкцій класифікується як:

а) справний – усі елементи труби задовольняють вимоги нормативних документів і проектної документації;

б) працездатний – задовольняє вимоги забезпечення виробничого процесу і подальшої безпеки експлуатації труби, але має незначні відхилення від чинних нормативних документів і проекту;

в) обмежено працездатний – можлива подальша експлуатація труби з певними обмеженнями і розробкою заходів щодо контролю стану конструкцій, параметрів технологічного процесу, навантажень і впливів, а також розробкою заходів щодо усунення виявлених дефектів і пошкоджень у встановлені терміни;

г) непрацездатний – можлива втрата несучої здатності основних елементів і споруди в цілому, що виключає подальшу експлуатацію без проведення ремонту;

д) граничний – подальша експлуатація труби неприпустима або недоцільна, або відновлення її працездатності неможливе чи недоцільне.

При деяких відмінностях у назвах груп стану конструкцій, класифікації тотожні одна одній.

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 (таблиця 4.3). Аналізуючи дані таблиці можливо констатувати, що при виявленні в конструкції дефектів категорія небезпечності «В» її технічний стан можливо охарактеризувати як нормальний (I) або задовільний (II), наявність дефектів «Б» характеризує технічний стан як непридатний до нормальної експлуатації (III), наявність дефектів небезпечності «А» – характеризує технічний стан як аварійний (IV).

Таблиця 4.3 - Основні дефекти і пошкодження металевих димових труб та їх гранично допустимі значення

№ п/п	Дефекти або пошкодження	Гранично допустимі значення при технічному стані				
		Нормальному (I)		Задовільному (II)	непридатному для нормальної експлуатації(III)	аварійному (IV)
		Категорії небезпечності дефектів				
		«В»		«Б»	«А»	
1	2	3	4	5	6	
1	Фундаменти і основи					
1.1.	Деформації основ для труб при висоті H , м:	Нахил, i	Середня осадка (Δ , мм)	Середня осадка (Δ , мм)	Встановлюються розрахунком	При значеннях, що перевищують розрахункові
	≤ 100	0,005	≤ 400	≤ 400	Встановлюються розрахунком	
	$100 < H \leq 200$	$1/(2\ H)$	≤ 300	≤ 300	Встановлюються розрахунком	
	$200 < H \leq 300$	$1/(2\ H)$	≤ 200	≤ 200	Встановлюються розрахунком	
	> 300	$1/(2\ H)$	≤ 100	≤ 100	Встановлюються розрахунком	
1.2.	Тріщини на зовнішній поверхні залізобетонного фундаменту (горизонтальні)	Не допускаються		Не допускаються	До 1,0 мм	Понад 1,0 мм
1.3.	Те саме, вертикальні з розкриттям a_{crc}	Вище рівня ґрунтових вод (РГВ) $a_{crc} \leq 0,3$ мм	Вище РГВ $a_{crc} \leq 0,5$ мм		Вище РГВ $a_{crc} \leq 1,0$ мм	Вище РГВ $a_{crc} > 1$ мм
		Нижче РГВ $a_{crc} \leq 0,3$ мм	Нижче РГВ $a_{crc} \leq 0,3$ мм		Нижче РГВ $a_{crc} \leq 0,5$ мм	Нижче РГВ $a_{crc} > 0,5$ мм

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
1.4.	Виколі бетону з оголенням арматури	Не допускаються	На площі до 1 м ² і глибиною 30 мм; корозія арматури не більше 5%	На площі до 2 м ² і глибиною до 50 мм; корозія арматури не більше 20%	На площі понад 2 м ² і глибиною більше 50 мм; корозія арматури більше 20%
1.5.	Ділянки крупнопористого бетону з недостатньою кількістю цементного каменю через неякісне ущільнення при бетонуванні	Не допускаються	Сумарними розмірами до 1/8-1/6 довжини кола і товщиною до 30 мм	Сумарними розмірами до 1/6-1/4 довжини кола і товщиною до 50 мм	Сумарними розмірами понад 1/4 довжини кола і товщиною 50 мм
2.	Стовбур металевої труби і елементи несучих веж				
2.1.	Відхилення осі стовбура f від вертикалі	$f \leq (0,006-0,008)H$	$f \leq 0,006-0,008)H$	Встановлюється розрахунком	Значення, що перевищують розрахункові
2.2.	Тріщини в основному металі і зварних швах	Не допускаються			Наявні
2.3	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
2.4	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

Завершення таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6
2.5	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби	Не допускаються	Не допускаються	Наявні	Наскрізні руйнування і прогари стінки труби
2.6	Горизонтальний зсув верху труби від нормативного вітрового навантаження	Не більше (1/75)H	Встановлюється розрахунком		Значення, що перевищують розрахункові
2.7	Прогари опорних кілець під футеровку	Не допускаються			Наявні
2.8	Руйнування антикорозійного покриття	Не допускається	До 40% площі покриття	Понад 40% площі	100% площі покриття
2.9	Пошкодження горизонтальних ковзних упорів (труби у вежі)	Не допускається	Не більше одного	Не більше двох на різних рівнях	Два і більше на одному рівні, більше двох на різних рівнях
2.10	Пошкодження несучих вузлів підвісу до вежі або опори в основі (для підвісних металевих труб)	Не допускається			Наявне
2.11	Пошкодження основних несучих вузлів (для труб з гасителями коливань і трубних комплексів з несучою вежею)	Не допускається		Наявне	

4.7. Висновки до розділу 4

1. На основі даних численних обстежень визначено основні типи дефектів і пошкоджень металевих димових труб, виконано їх класифікацію за характером і величинами пошкоджень.
2. Проведено аналіз утворення і розвитку пошкоджуваності металевих димових труб і футеровки для кожного типу дефектів і пошкоджень.
3. Виконано аналіз пошкоджуваності металевих несучих веж для кожного виду дефектів і пошкоджень, оцінено пошкоджуваність елементів несучих веж залежно від їхнього поперечного перерізу.
4. Усі основні дефекти і пошкодження металевих димових труб і несучих веж класифіковані залежно від категорії небезпечності, від виду і місця розташування, від імовірних причин виникнення. Визначено методи виявлення або ознаки виникнення дефектів і пошкоджень, запропоновано заходи щодо попередження їх подальшого розвитку.
5. У результаті аналізу виявлених дефектів і пошкоджень металевих димових труб і несучих веж визначено їх гранично допустимі значення залежно від категорії небезпечності дефектів і технічного стану конструкцій.

4.8. Список використаних джерел у розділу 4

Список використаних джерел у розділі 4 наведено у загальному списку використаних джерел [36, 37, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 96, 119, 169, 171, 175, 176, 187, 188, 178, 180].

РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ, УПРАВЛІННЯ СТАРІННЯМ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ ТРУБ І НЕСУЧИХ ВЕЖ

5.1. Загальна методологія оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових труб і несучих веж

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

Складовими частинами розробленої методології є:

- загальна методологія управління старінням і продовження терміну експлуатації металевих димових і вентиляційних труб (МДВТіНВ);
- класифікація впливів середовища експлуатації МДВТіНВ і методи оцінки їх впливу на розвиток процесів старіння матеріалів елементів МДВТіНВ;
- процедури моніторингу, діагностики, методи виявлення процесів старіння матеріалів елементів МДВТіНВ, включаючи руйнівний і неруйнівний контроль матеріалів;
- процедура аналізу та оцінки технічного стану МДВТіНВ;
- методики прогнозу кінетики розвитку процесів деградації матеріалів МДВТіНВ, їх впливу на зміну будівельно-технічних властивостей матеріалів і функціональних властивостей МДВТіНВ;
- підходи до розробки додаткових заходів щодо впливу на процеси деградації МДВТіНВ в результаті старіння;
- порядок організації, планування та реалізації додаткових заходів щодо управління старінням МДВТіНВ.

Основні терміни та визначення понять і показників, прийнятих в теорії надійності, а також методи їх розрахунку прийняті відповідно до нормативних документів [132], [133].

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

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

Кількісними показниками безвідмовності є ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов.

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

$$P(t) = P\{T > t\}, \quad (5.1)$$

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

Ймовірність відмови:

$$F(t) = 1 - P(t). \quad (5.2)$$

Щільність розподілу ймовірності відмови:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (5.3)$$

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

$$h(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (5.4)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Показники надійності експлуатованих будівельних конструкцій, що експлуатуються, можливо отримати чотирма основними методами:

- 1) статистичним;
- 2) фізико-статистичним;
- 3) експертних оцінок;
- 4) випробування навантаженням.

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

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

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

Метод випробування та оцінки технічного стану будівельних конструкцій навантаженням полягає в отриманні інформації, що дозволяє виконати оцінку випробувань конструкції шляхом порівняння фактичних результатів з контрольними.

Головним змістом інформації є залежність між величиною деформації і навантаженням на всіх етапах навантаження і екстраполяції результатів до стадії руйнування.

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

5.1.1. Фізико-статистичний метод оцінки надійності елементів металевих димових труб і несучих веж

В основу фізико-статистичного методу оцінки надійності і довговічності конструкцій МДВТіНВ покладено такі передумови:

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

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

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

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

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

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

Основою фізико-статистичного методу визначення, прогнозу і забезпечення надійності конструкцій металевих димових труб і несучих веж є:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$y_j = y_j(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{mj}) \quad (5.5)$$

где y_j - властивість конструкцій МДВТіНВ, x_{ij} - розрахункові параметри конструкцій.

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

$$x_{pj} = x_{pj}(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, t). \quad (5.6)$$

В силу стохастичної природи характеристик матеріалів, впливів середовища, впливу технологічних факторів в процесі виробництва, транспортування і монтажу конструкцій їх параметри є випадковими величинами x_{ij} або випадковими функціями часу $x_{pj} = x_{pj}(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, t)$. В результаті цього і деяка властивість конструкції також буде випадковою функцією часу:

$$Y_j(t) = Y_j[x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{pj}(z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, t), \dots, x_{mj}] \quad (5.7)$$

Умова функціональної придатності конструкцій МДВТіНВ задається у вигляді обмеження:

$$Y_j(t) \geq S_j(t) \quad (5.8)$$

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

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

$$P_j(t) = P[Y_j(t) \geq S_j(t)] = P[Y_j(t) - S_j(t) \geq 0] \quad (5.9)$$

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

$$P_j(t) = \iiint_{Y_j(t) - S_j(t) \geq 0} \dots \int f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, \dots, x_{mj}, t) dx_{1j} dx_{2j} \dots \dots dz_{1j} dz_{2j} \dots dz_{lj} \dots dx_{mj} \quad (5.10)$$

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

Отримати функцію (5.10) в явному вигляді найчастіше не представляється можливим, тому що неможливо виконати зворотне перетворення залежностей властивостей конструкцій щодо часу. Тому досить визначити параметричну надійність конструкцій після закінчення певного часу її експлуатації, тобто визначити $P_j(t)$ для фіксованих моментів часу, або, інакше, дати точкову оцінку надійності. У цьому випадку завдання зводиться до отримання m -мірної функції розподілу випадкових величин

$$f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, \dots, z_{mj}) \quad (5.11)$$

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

$$P_j(t = t_k) = \iint \dots \int_{Y_j(t=t_k) - S_j(t=t_k) \geq 0} f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{ij}, \dots, z_{1j}, z_{2j}, \dots, z_{lj}, \dots, x_{mj}, t) dx_{1j} dx_{2j} \dots dz_{1j} dz_{2j} \dots dz_{lj} \dots dx_{mj} \quad (5.12)$$

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

$$P_j(t = t_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(S_j) \left[\int_S^{\infty} f(Y_j) dy_j \right] dS_j \quad (5.13)$$

При відсутності статистичних даних про зовнішніх силових впливах або детермінованих величинах граничних значень властивостей:

$$P_j(t = t_k) = P\{Y_j \geq S_{j,u}\} = \int_{S_{j,u}}^{+\infty} f(Y_j) dy_j, \quad (5.14)$$

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

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

$$P_j(\gamma_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\gamma_y} e^{-0.5(Y_j)^2} \cdot dy_j; \quad (5.15)$$

або

$$P_j(\gamma_y) = F[\gamma_y], \quad (5.16)$$

де: F - табульоване значення функції нормованого нормального (Гауссово) розподілу;

γ_y - характеристика безпеки [34], індекс надійності [133], дальність відмови [132]:

$$\gamma_y = \frac{\bar{Y} - [Y]}{\sigma_y}, \quad (5.17)$$

$\bar{Y}$ - математичне очікування функції властивості;

$[Y]$ - гранично допустиме значення властивості;

σ_y - середнє квадратичне відхилення функції властивості.

Конструкція задовольняє вимогам надійності по j -й властивості якщо

$$P_j(t) \geq R_{j,u}, \quad (5.18)$$

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

На рис. 5.1 наведена загальна схема формування відмови будівельних конструкцій в умовах впливу зовнішніх середовищ [107, 125]. Відмова виникає при досягненні Y_j -ї властивості конструкції граничного значення S_j , що станеться через деякий випадковий проміжок часу експлуатації.

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

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

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

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

г) нормування: термінів служби або міжремонтних термінів експлуатації конструкцій; параметрів середовища експлуатації конструкцій (корозійного, температурного і динамічного впливів); силового навантаження; граничних значень функціональних властивостей конструкцій; рівня надійності функціональних властивостей конструкцій.

На рис. 5.1 показані основні етапи формування закону розподілу $p(t)$. На початку має місце розсіювання властивості щодо свого математичного очікування, що пов'язано з мінливістю фізико-механічних характеристик матеріалів, геометричних і силових параметрів конструкцій, що залежать від технологічної культури виробництва. Даний розподіл може характеризувати "початкову" надійність конструкцій.

Вплив зовнішнього несприятливого середовища експлуатації призводить до зміни деяких параметрів конструкцій, що визначають властивість. Процес зміни властивості в силу мінливості визначальних параметрів також є випадковим і залежить від швидкості зміни визначальних параметрів. В результаті відбувається формування закону розподілу $p(t)$,

який визначає ймовірність виходу параметра Y_j за границю $S_{j,u}$, тобто ймовірність відмови $F(t) = 1 - P(t)$ або безвідмовної роботи $P(t)$.

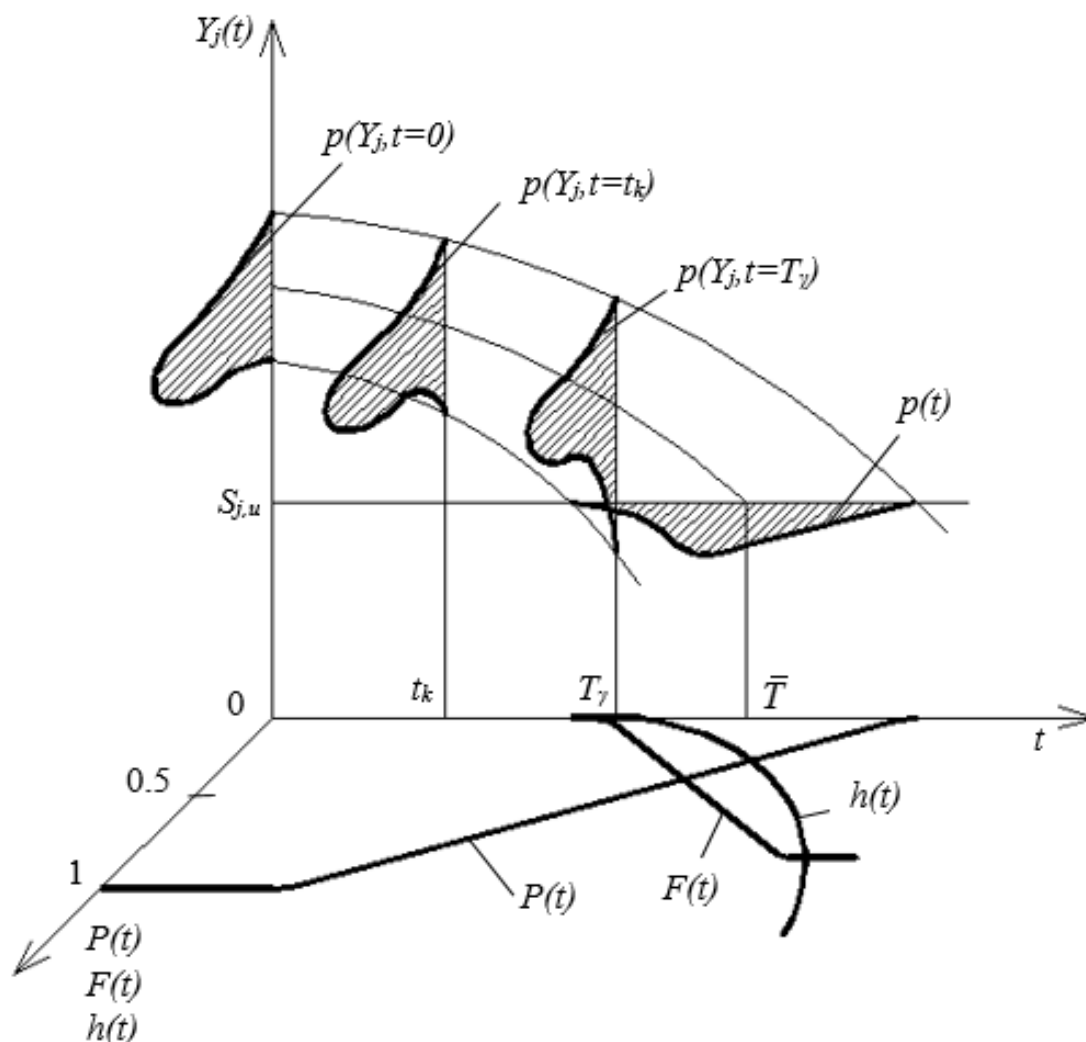


Рисунок 5.1. Загальна схема формування відмови конструкцій в умовах впливу зовнішніх несприятливих середовищ:

$P(t)$ – функція надійності; $F(t)$ – функція ймовірності відмови; $h(t)$ – інтенсивність відмов; $Y_j(t)$ – функція j -ї властивості; $S_{j,u}$ – граничне значення функції властивості; $p(Y_j, t)$ – щільність розподілу властивості конструкцій; $p(t)$ – щільність розподілу ймовірності безвідмовної роботи; T_γ – гамма - процентний термін служби (ресурс); $\bar{T}$ – середній термін служби.

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

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

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.19)$$

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

$$y = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_m (x_i - \bar{x}_i), \quad (5.20)$$

де $y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ – значення функції при середніх значеннях аргументів;

$\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)_m$ – часткові похідні в області середнього значення аргументів.

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

$$y = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n) \quad (5.21)$$

$$\sigma(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 + \sigma(x_1)}, \quad (5.22)$$

$$\mu_3(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^3 \mu_3(x_i), \quad (5.23)$$

$$\mu_4(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^4 \mu_4(x_i) + 6 \sum_i \sum_{j \succ i} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right)^2 \sigma^2(x_i) \sigma^2(x_j) \quad (5.24)$$

У виразах (5.21)...(5.24): $\bar{y}$, $\sigma(y)$, $\mu_3(y)$, $\mu_4(y)$ – відповідно, математичне очікування, середньоквадратичне відхилення, третій і четвертий центральний момент функції y ;

$\bar{x}_i$, $\sigma(x_i)$, $\mu_3(x_i)$, $\mu_4(x_i)$ – математичне очікування, середньоквадратичне відхилення, третій і четвертий центральний момент випадкової величини x_i .

Функції, що описують функціональні властивості конструкцій, в загальному випадку не виражаються в явному вигляді, тому отримати в аналітичному вигляді розкладання функції в ряд Тейлора не представляється можливим. Тому в роботі [125] було запропоновано замінити часткові похідні функції властивості її кінцево-різницевою формою, що еквівалентно використанню апроксимації функції інтерполяційними поліномами. Центральні-різничеві апроксимації часткових похідних першого і другого порядку записуються у вигляді:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i + h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n) - y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i - h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n)}{2h(x_i)} \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2} = \frac{y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i + h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n) - 2y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n) + y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_{i-1}, \bar{x}_i - h(x_i), \bar{x}_{i+1}, \dots, \bar{x}_n)}{h^2(x_i)} \quad (5.26)$$

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

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

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

Регламентований рівень надійності конструкцій згідно Європейських норм [133] залежить від класу наслідків. Металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі відносяться до класу наслідків СС2 (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 - Класів наслідків, клас надійності, індекс надійності та ймовірність 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

5.1.2. Управління старінням конструкцій металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.

Управління старінням з урахуванням деградації матеріалів металевих димових і вентиляційних труб та їх 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, яке оцінюється певним рівнем надійності.

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

Конструкції металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж поділяються на неремонтопридатні і придатні до ремонту.

Для неремонтопридатних конструкцій повинен встановлюватися ресурс, який вичерпується до кінця розрахункового терміну служби. Управління старінням для неремонтопридатних конструкцій може полягати в ослабленні або нейтралізації впливу середовища, яка викликає деградацію матеріалів конструкцій.

У загальному випадку, якщо конструкції проектуються на заданий термін служби і відома закономірність зміни властивостей конструкцій з певною забезпеченістю, то для раціонально запроектованої конструкції її ресурс повинен вичерпатися до кінця регламентованого терміну служби (рис. 5.2, а)).

Якщо в результаті моніторингу технічного стану конструкцій в часі і виконанні прогнозу зміни властивостей конструкцій з певною забезпеченістю буде встановлено, що термін служби (гамма-процентний ресурс) конструкцій менше регламентованого терміну служби, то необхідно виконати заходи, що впливають на швидкість зміни функціональних властивостей конструкцій (рис. 5.2, б) - д)).

На рис. 5.2, б) наведено випадок, коли для забезпечення безвідмовної роботи в певний момент часу повністю усувається вплив негативного

середовища експлуатації конструкцій. Цей випадок, наприклад, може бути реалізований шляхом влаштування вторинного захисту (фарбування, обмазка і ін.) при впливі агресивного середовища або технологічними заходами, що усувають вплив середовища.

На рис. 5.2, в) наведено випадок, коли для забезпечення безвідмовної роботи в певний момент часу виконуються заходи, що уповільнюють процес деградації матеріалів і старіння конструкцій в результаті впливу негативного середовища експлуатації конструкцій.

На рис. 5.2, г) наведено випадок, коли для забезпечення безвідмовної роботи в певні моменти часу виконуються заходи по відновленню функціональних властивостей конструкцій в результаті ремонту, підсилення, заміни елементів конструкцій.

На рис. 5.2, д) наведено випадок заходи по ремонту, підсиленню, заміни елементів конструкцій проводяться періодично.

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.

5.2. Основне кінетичне рівняння довговічності елементів металевих димових труб і несучих веж

Елементи металевих димових труб і несучих веж працюють в умовах одночасної дії механічних напружень, корозійних, динамічних і високотемпературних впливів.

У більшості опублікованих робіт, присвячених швидкості розвитку пошкоджень у димових трубах, дія корозійного і температурного впливу розглядається окремо [40, 143]. На практиці найчастіше такі впливи діють одночасно.

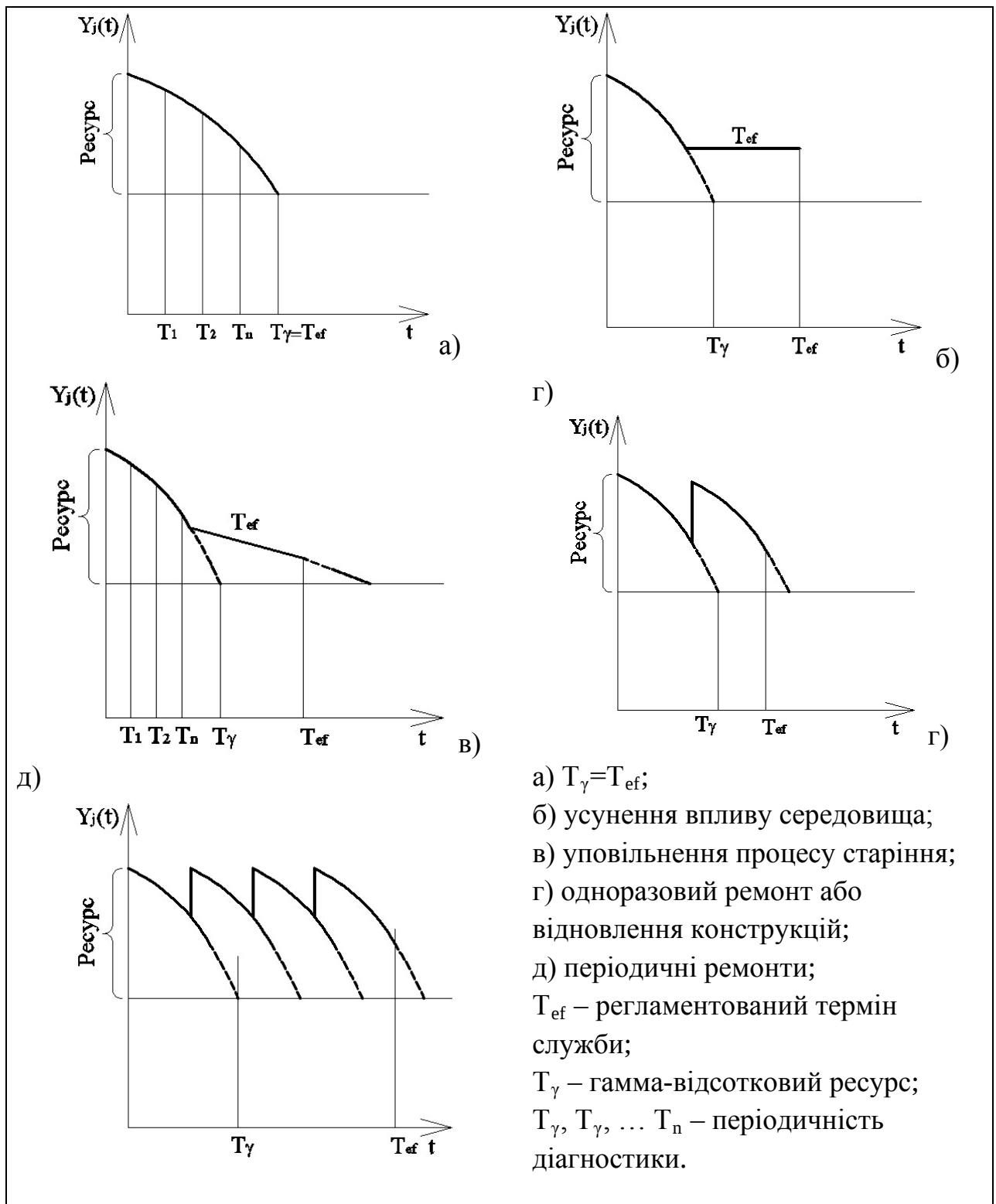


Рисунок 5.2. Управління старінням конструкцій МДВТіНВ

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 оцінюємо глибиною H . На основі принципу лінійного підсумування швидкість росту пошкоджень можна записати як:

$$\frac{dH}{dt} = \left(\frac{dH}{dt} \right)_c + \left(\frac{dH}{dt} \right)_n + \left(\frac{dH}{dt} \right)_k, \quad (5.27)$$

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

$(dH/dt)_n$ – швидкість зміни поперечного перерізу, зумовленої деформацією повзучості;

$(dH/dt)_k$ – швидкість росту пошкоджень через механохімічну корозію.

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

$$\left(\frac{dH}{dt} \right)_\varepsilon = 0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m, \quad (5.28)$$

де δ_0 – початкова товщина стінок труб;

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

ε_i – інтенсивність деформацій.

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

$$\left(\frac{dH}{dt} \right)_k = v_0 [(1 + k_\sigma \cdot \sigma_i)(1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i)], \quad (5.29)$$

де v_0 – швидкість корозії ненапруженого металу;

k_ε і k_σ – механохімічні параметри.

Враховуючи, що $\sigma_i = C \varepsilon_i^n$ (C і n – константи деформаційного зміцнення сталі), рівняння (5.29) можна записати:

$$\left(\frac{dH}{dt} \right)_k = v_0 \left[(1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right]. \quad (5.30)$$

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

$$\frac{dH}{dt} = 0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m + v_0 \left[(1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right] \quad (5.31)$$

Інтегруючи рівняння (5.31), отримаємо основне рівняння довговічності елементів металевих димових труб і несучих веж товщиною t :

$$\tau = \int_{H_0}^{H_{np}} \frac{dH}{0,5 \cdot \delta_0 \cdot \exp(0,5 \cdot \varepsilon_i) \cdot A \cdot \varepsilon_i^m + v_0 \left[(1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\sigma \cdot C \cdot \varepsilon_i^n) (1 + k_\varepsilon \cdot \varepsilon_i) \right]} \quad (5.32)$$

Геометричні і механічні характеристики для рівняння (5.32) визначаємо за фактичним станом димових труб і несучих веж з урахуванням наскрізних і не наскрізних пошкоджень, деформаційного старіння металу.

5.3. Оцінювання довговічності металевих димових труб і веж з урахуванням корозійного і температурного впливу

Спочатку необхідно розглянути визначення довговічності димових труб та веж в умовах корозійного зносу і температурного впливу окремо, і

від їх спільної дії на елементи металевих димових труб та веж. Під час експлуатації, як правило, відбувається спільний корозійний і температурний вплив, однак трапляються випадки, коли один із цих впливів є домінуючим [41, 145, 150].

Для визначення довговічності металевої димової труби в умовах корозійного зносу візьмімо ділянку труби і розглянемо його роботу під дією стискаючої сили і корозії. Розглядається випадок, коли димова труба перебуває в одновісному напруженому стані, і корозійний знос відбувається на внутрішній поверхні труби (рис. 5.3).

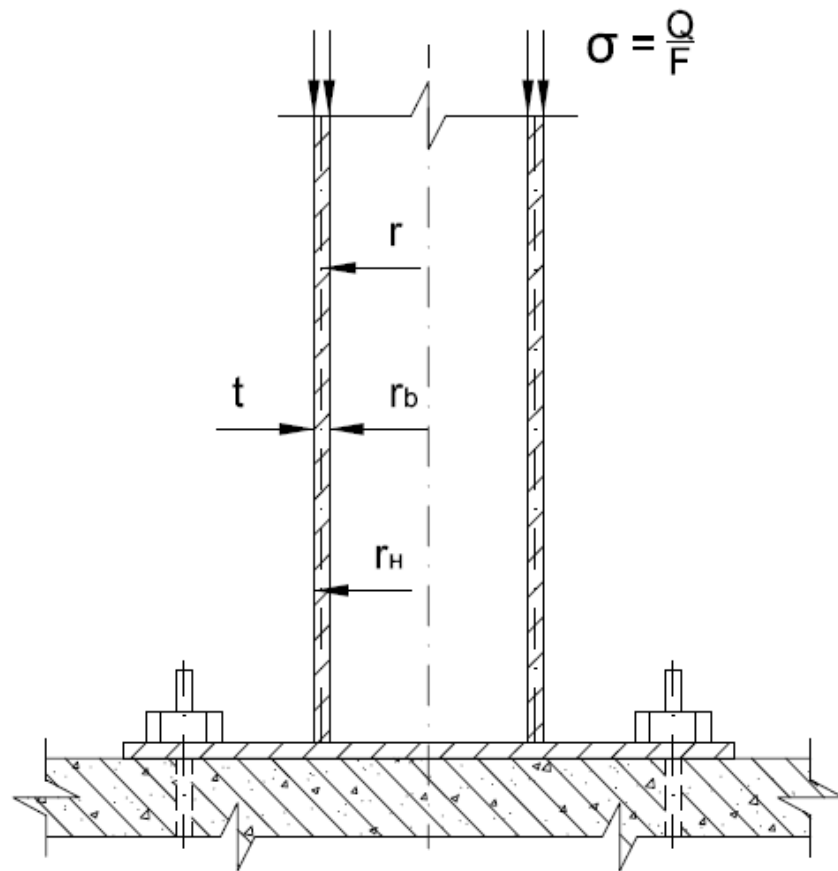


Рисунок 5.3 – Поперечний розріз димової труби під дією стискаючої сили Q

У процесі корозійного зносу труби нормальні напруження змінюватимуться за формулою

$$\sigma_{(\tau)} = \frac{Q}{\pi [r_n^2 - (r_{\theta} + S_{\theta} \cdot (\tau))^2]}, \quad (5.33)$$

де $S_{\theta}(\tau)$ – прирощення внутрішнього радіуса труби через корозію поверхні.

З формули (5.33) випливає

$$r_{\theta} + S_{\theta}(\tau) = \sqrt{r_H^2 - \frac{\sigma_0 \cdot (r_H^2 - r_{\theta}^2)}{\sigma(\tau)}}, \quad (5.34)$$

Диференціюючи рівняння (5.8) за часом, отримаємо

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{2 \cdot \sigma^2 \cdot (r_{\theta} - t(\tau) d/d\tau [r_{\theta} + S_{\theta}(\tau)])}{(r_H^2 - r_{\theta}^2) \cdot \sigma_0}. \quad (5.35)$$

Швидкість змінювання внутрішнього радіуса $\frac{d[r_b + S_{\theta}(\tau)]}{d\tau}$ має дорівнювати швидкості корозії v_0 , яка визначається відповідно до формули (6.9) при пружних деформаціях:

$$\frac{d[r_b + S_{\theta}(\tau)]}{d\tau} = v_0 (1 + k_{\sigma} \sigma_i), \quad (5.36)$$

де v_0 – швидкість корозії ненапруженого металу;

k_{σ} – механохімічний параметр;

σ_i – інтенсивність напружень.

Розглядаючи спільно вирази (5.2), (5.8) і (5.10), отримаємо

$$\frac{d\sigma}{d\tau} = \frac{2 \cdot v_0 \cdot \sigma_i^2 \sqrt{r_H^2 - \frac{\sigma_0 (r_H^2 - r_{\theta}^2)}{\sigma(\tau)} \cdot (1 + k_{\sigma} \cdot \sigma_i)}}{(r_H^2 - r_{\theta}^2) \cdot \sigma_0}, \quad (5.37)$$

де $\sigma_0 = \frac{Q}{\pi(r_H^2 - r_{\theta}^2)} \sigma_0$ – напруження у димовій трубі до початку корозійного процесу. Тут прийнято, що $\sigma_i = \sigma$.

Рівняння (5.37) є основним і визначає динаміку змінювання інтенсивності напружень $\sigma_i(t)$ у процесі експлуатації труби.

Як граничний стан труби візьмемо умову плинності Мізеса – $\sigma_i = \sigma_T$, (тут σ_T – границя плинності сталі).

Довговічність τ_T (час до настання плинності металу димової труби) отримуємо інтегруванням рівняння (5.37) у межах від 0 до τ_T і від σ_0 до σ_T :

$$\tau_T = \frac{\sigma_0 \cdot (r_H^2 - r_g^2)}{2V_0} \int_{\sigma_0}^{\sigma_T} \frac{d\sigma_i}{\sigma_i^2 (1 + k_\sigma \cdot \sigma_i) \cdot \sqrt{r^2 - \frac{\sigma_0 (r_H^2 - r_g^2)}{\sigma_i}}} \cdot \quad (5.38)$$

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

На основі рівняння (5.38) і аналізу чисельних розрахунків τ_T встановлено, що довговічність труб можна розраховувати за формулою (похибка не перевищує 5%):

$$\tau_T = \frac{t_0}{V_0} (1 - K_{HT}) \cdot \left(1 + \frac{V \cdot \sigma}{3 \cdot R \cdot T} \sqrt{K_{HT} \cdot T} \right), \quad (5.39)$$

де t_0 – початкова товщина труби;

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

Величина, обернена до коефіцієнта K_{HT} , являє собою коефіцієнт запасу міцності за границею плинності n_T , який дорівнює $n_T = \sigma_T / \sigma_0$.

Аналізуючи цю формулу, можна констатувати, що підвищення рівня напруженості металу призводить до зниження ресурсу димових труб. Тобто при виборі марок сталей для димових труб необхідно враховувати, що підвищення вихідних міцнісних властивостей не завжди приводить до бажаних результатів. Очевидно, що зниження K_{HT} збільшує довговічність τ_T .

При пошкодженні футеровки металевий стовбур димової труби може опинитися під впливом високих температур, тому необхідно розглянути вплив високих температур на довговічність стовбура димової труби [169].

Оцінка впливу високих температур на міцність металу димових труб визначається температурним коефіцієнтом зниження міцності $\varphi_{\sigma_{\epsilon}}^T$, який дорівнює:

$$\varphi_{\sigma}^T = \frac{\sigma_{\epsilon}^{(T)}}{\sigma_B^{20}}, \quad (5.40)$$

де $\sigma_B^{(T)}$ і σ_B^{20} – границя міцності сталі за температури $T^{\circ}\text{C} + 20^{\circ}\text{C}$.

Температурний коефіцієнт зниження міцності оцінюємо на основі зміни допустимих напружень від температури для маловуглецевих і низьколегованих сталей і визначаємо за формулою:

$$\varphi_{\sigma}^T = 1 - 0,75 \left(\frac{T}{500^{\circ}\text{C}} \right)^{2/3}. \quad (5.41)$$

Аналізуючи формулу, можна зробити висновок, що підвищення температури до 500°C призводить до зниження тимчасового опору σ_B на 75%. При цьому найбільш інтенсивне зниження міцності відбувається за температур $T > 250^{\circ}\text{C}$.

При великому температурному градієнті за товщиною стінки труби ΔT ($\Delta T = T_B - T_H$, де T_B і T_H – температура внутрішньої і зовнішньої поверхні) у металі виникають окружні напруження σ_t :

$$\sigma_t = \pm \frac{\alpha \cdot E \Delta T}{2(1 - \mu)} \approx \pm 0,715 \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (5.42)$$

де μ – коефіцієнт Пуасона;

α – коефіцієнт лінійного розширення;

E – модуль пружності.

На практиці можливі два варіанти розподілу температурних напружень у трубі, і вони показані на рис. 5.4.

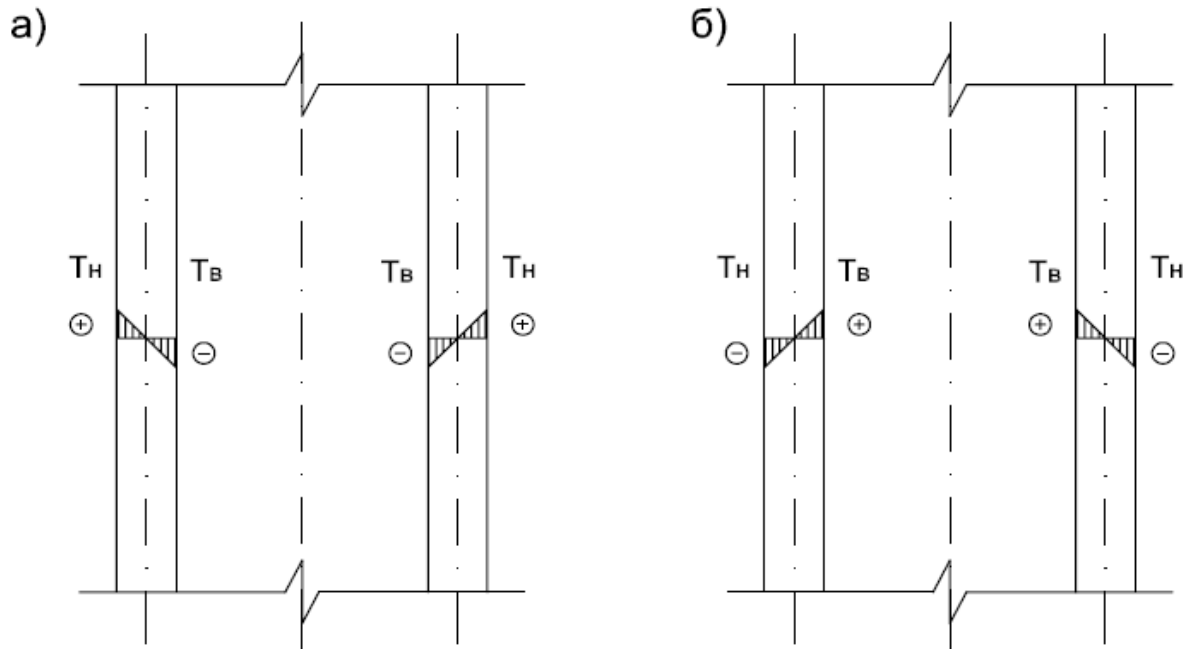


Рисунок 5.4 – Розподіл окружних температурних напружень у трубі:

а) при $\Delta T > 0$; б) при $\Delta T < 0$.

Нерівномірне нагрівання стінок димової труби призводить до утворення плоского напруженого стану з рівними компонентами напружень.

Нагрівання внутрішньої поверхні металеві димової труби $\Delta T > 0$ створює у внутрішніх волокнах стиск, зовнішньої поверхні $\Delta T < 0$ – розтяг.

Далі при температурному нагріванні і відсутності зовнішніх навантажень у стінках труб розвиваються значні напруження, з порогом механохімічної корозії і зниженням ресурсу димових труб.

Довговічність стовбура димової труби з урахуванням лише температурного градієнту можна визначити за формулою:

$$\tau_{\sigma} = \frac{t_0}{v_0} / (1 + 0,715 \cdot k_{\sigma} \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T), \quad (5.43)$$

де τ_{σ} – час до повного руйнування труби.

Для визначення спільного високотемпературного і корозійного впливу на довговічність металевих димових труб проведемо чисельне інтегрування рівняння (5.43) з урахуванням температурного коефіцієнта зниження міцності $\varphi_{\sigma_{\sigma}}^T$.

Результати досить добре апроксимуються таким рівнянням:

$$\tau_T = \frac{t_0}{v_0} (1 - K_{HT}) \cdot \left(1 + k_{\sigma} \cdot \varphi_{\sigma_T}^T \cdot \sigma \sqrt{K_H \cdot T} \right), \quad (5.44)$$

де $K_H = \sigma_0 / \sigma_T \cdot \varphi_{\sigma_T}^T$;

$\varphi_{\sigma_T}^T$ – температурний коефіцієнт зниження міцності, що визначається за формулою (5.41);

τ – час до настання плинності;

K_{HT} – коефіцієнт використання несучої здатності за σ_T при заданій температурі T .

5.4. Довговічність металевих висотних споруд з урахуванням динамічного і корозійного впливів при загальній втраті стійкості труби

На димову трубу протягом усього життєвого циклу постійно діють різні навантаження, у тому числі від власної ваги, пульсаційні вітрові навантаження і температурні. При їх спільній довготривалій дії в умовах агресивних середовищ у конструкціях висотних споруд відбувається досягнення границі витривалості і виникає корозійна втома металу, що призводить до зниження несучої здатності.

Вільно встановлені металеві димові труби у процесі експлуатації безпосередньо сприймають нестационарні вітрові навантаження. У розділі 2 докладно описане вітрове навантаження і його пульсаційна складова на металеві димові труби і несучі вежі.

Металеві висотні споруди після тривалого терміну експлуатації перевіряють на витривалість з урахуванням корозійного чинника [43]. Розрахунок на витривалість елементів висотних споруд виконується за формулою

$$\sigma_{max} \leq \alpha R_v v_v, \quad (5.45)$$

де R_v – розрахунковий опір втомі металу;

α – коефіцієнт, що враховує кількість циклів навантажень n і визначається за формулою

$$\alpha = 0,7 \left(\frac{n}{10^6} \right)^2 - 0,64 \left(\frac{n}{10^6} \right) + 2,2, \quad (5.46)$$

v_v – коефіцієнт, що залежить від виду напруженого стану і коефіцієнта асиметрії напруження і визначається за таблицею 5.2.

Коефіцієнт асиметрії дорівнює $\rho = \sigma_{min} / \sigma_{max}$, де σ_{min} і σ_{max} – найбільше і найменше за абсолютним значенням напруження у розрахованому елементі без урахування коефіцієнта динамічності.

Таблиця 5.2 – Значення коефіцієнта v_v

σ_{max}	Коефіцієнт асиметрії напруження ρ	Формула для обчислення v_v
Розтяг	$-1 \leq \rho \leq 0$	$v_v = 2,5/(1,5 - \rho)$
	$0 < \rho \leq 0,8$	$v_v = 2/(1,2 - \rho)$
	$0,8 < \rho < 1$	$v_v = 1/(1 - \rho)$
Стискання	$-1 \leq \rho < 1$	$v_v = 2/(1 - \rho)$

Елементи димових труб і несучих веж задовольняють вимоги розрахунку на витривалість, якщо добуток $\alpha R_v v_v$ не перевищує тимчасовий розрахунковий опір сталі на розтяг R_u , розділений на коефіцієнт надійності за тимчасовим опором v_u .

Корозійний вплив при розрахунку на витривалість необхідно враховувати шляхом уведення у формулу (5.45) коефіцієнта зниження розрахункового опору втомі $k_{кор}$ ($k_{кор} \leq 1,0$), і тоді ця умова міцності матиме вигляд

$$\sigma_{max} \leq \alpha k_{кор} R_v v_v . \quad (5.47)$$

Довговічність металевих димових труб з урахуванням динамічного і корозійного впливів можна визначити за формулою

$$\tau_T = \frac{t_0}{v_0} (1 - K_{HRv}) \cdot \left(1 + k_\sigma \frac{V \cdot R_v}{3 \cdot R \cdot T} \cdot \sqrt{K_{HRv}} \right) , \quad (5.48)$$

де K_{HRv} – коефіцієнт використання несучої здатності за розрахунковим опором втомі R_v .

Багато металевих труб працюють у режимі пульсуючого циклу зміни напружень, і процеси малоциклової пошкоджуваності зумовлені більш складними процесами взаємодії внутрішніх і зовнішніх напружень, тому процес руйнування елементів контролюється максимальними заданими напруженнями, а не деформаціями. У цьому випадку зазвичай використовують ступеневі функції, які добре описують дослідні криві довговічності в координатах «число циклів навантаження до руйнування – прикладене циклічне напруження». Для цього випадку рівняння циклічної довговічності матиме вигляд:

$$N_p = A n_\epsilon^m , \quad (5.49)$$

де A і m – константи, визначені дослідним шляхом;

n_ϵ – коефіцієнт запасу міцності за номінальними робочими напруженнями.

Коефіцієнт $n_\epsilon = \sigma_u / \sigma_p$, де σ_p – робоче номінальне напруження. При $n_\epsilon = 1,0$ рівняння циклічної довговічності $N_p = A$.

Криві довговічності зручно представляти в логарифмічних координатах у вигляді кількох прямих, що перетинаються між собою. Криві довговічності, визначені експериментально за критеріями малоциклової пошкоджуваності, і визначені за формулою (5.49), за характером збігаються, тобто відповідають тому самому закону. Розрахункові дані, отримані на основі формули (5.49), дещо менші за результати малоциклових випробувань із тріщиноподібними дефектами. На практиці на стовбур димової труби одночасно діють напруження від власної ваги σ_v , від вітрового моменту σ_{vm} і температурного впливу σ_{AT} , і сумарне напруження складатиме:

$$\sigma_{\text{сум}} = \sigma_v + \sigma_{vm} + \sigma_{AT}.$$

У цьому випадку довговічність стовбура димової труби можна розрахувати (враховуючи, що $F_H = \sigma_{\text{сум}} / \sigma_m$) за формулою:

$$\tau_T = (1 - F_H) \cdot \left(1 + k_\sigma \cdot \sigma_{\text{сум}} \cdot \sqrt{F_H}\right), \quad (5.50)$$

Втрата загальної стійкості стовбура димової труби спочатку може відбутися внаслідок порушення стійкості круглої форми.

Особливістю загальної втрати стійкості (перший граничний стан) є той факт, що фактичне напруження виявляється нижчою за границю плинності металу – $\sigma_{cT} < \sigma_T$.

Оцінювання довговічності димової труби в умовах втрати загальної стійкості можна здійснити, проінтегрувавши рівняння (5.48) у межах від 0 до t_y і від σ_0 до σ_{cT} . При цьому рівняння (5.48) матиме такий вигляд:

$$\tau_T = \frac{S_0}{v_0} (1 - K_{ny}) \cdot \left(1 + \frac{V \cdot \sigma}{3 \cdot R \cdot T} \sqrt{K_{ny}}\right), \quad (5.51)$$

де K_{ny} – коефіцієнт використання несучої здатності за критичними напруженнями стійкості.

5.5. Довговічність і зниження несучої здатності металевих димових труб з прогарами у стінці

У процесі експлуатації у стовбурі металевих димових труб внаслідок високотемпературних впливів димових газів можуть виникати наскрізні пошкодження – тріщини або прогари (рис. 5.5).



Рисунок 5.5 – Тимчасова заглушка на місці прогару у стовбурі димової труби

Наскрізні отвори (прогари і тріщини) у стовбурі димової труби є концентраторами напружень і призводять до зменшення робочого перерізу і зниженню її несучої здатності [160]. При експлуатації прогари у стовбурі не допускаються і мають бути негайно усунені після їх виявлення.

У якості розрахункової моделі димової труби з пошкодженням можна взяти розгортку димової труби, зображеної на рис. 5.6.

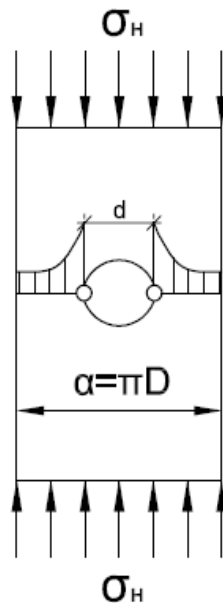
Для таких випадків теоретичний коефіцієнт концентрації напружень α_σ визначається за відомою формулою [9, 16]:

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H} = 1 + 2 \frac{b}{c}, \quad (5.52)$$

де σ_{max} і σ_H – максимальні номінальні напруження;

b і c – параметри еліптичного наскрізного пошкодження.

а)



б)

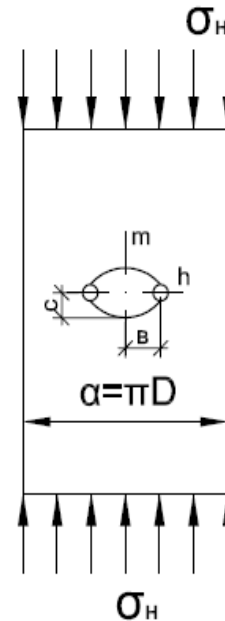


Рисунок 5.6 – Розгортки димових труб з пошкодженнями:

а) з круглим отвором; б) овальне пошкодження із засвердленими краями

Для круглого наскрізного пошкодження ($b = c$) коефіцієнт концентрації напруження $\alpha_{\sigma} = 3$. Звуження наскрізного отвору (зменшення c і збільшення b/c) призводить до значного зростання α_{σ} . Виходячи з цього, можна припустити, що максимальні напруження не перевищують границю пружності.

Розподіл напружень за границею пружності залежить від пластичності матеріалу. Пластичну сталь можна піддавати значному розтягу за границею плинності без великого зростання напружень. Виходячи з цього, розподіл напружень за границею плинності зі збільшенням напружень стає все більш рівномірним. Це пояснюється тим, що для пластичних матеріалів овальні і

круглі отвори не зменшують міцності на розрив при статичному навантаженні.

Для крихких металів (киплячі сталі) висока концентрація напружень не зменшується до самого розриву, що призводить до різкого зменшення міцності на розрив стрижня з крихкої сталі за наявності в ньому отворів.

Сталі, що застосовують для виготовлення димових труб, належать до категорії достатньо пластичних. Міцність пластини з отвором можна порахувати за граничними напруженнями у нетто-перерізі моделі. Граничні напруження в цьому перерізі можуть доходити до тимчасового опору металу σ_u . Входячи з цього, несуча здатність металевої труби буде визначатися ступенем зниження площі робочого перерізу труби, що оцінюється безрозмірним параметром $m_d = d/\pi \cdot D$, де D – діаметр труби.

Коефіцієнт зниження несучої здатності труби $\bar{P}$ з наскрізними пошкодженнями визначаємо за формулою:

$$\bar{P} = \frac{P}{P_0} = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} = 1 - m_d. \quad (5.53)$$

Виходячи з дослідних даних, коригуємо формулу (5.53):

$$\bar{P} = 1 - m_d^q, \quad (5.54)$$

де q – константа ($q = 0,25$).

Наскрізні пошкодження є концентраторами напружень і можуть знижувати граничне напруження в нетто-перерізі. Для оцінювання такого явища уведімо емпіричний коефіцієнт чутливості металу до концентрації напружень при статичному навантаженні – K_σ .

З урахуванням K_σ формула для визначення коефіцієнта зниження несучої здатності труби (5.54) матиме вигляд:

$$\bar{P} = K_D(1 - m_d^q) \quad (5.55)$$

Для маловуглецевих (ВСт3пс, ВСт3сп) і низьколегованих сталей (16ГС, 09Г2С, 10Г2С1), з яких виготовляють димові труби, $K_D = 1,0$.

При оцінюванні довговічності труб з отворами коефіцієнт запасу міцності необхідно підставляти замість коефіцієнта n_σ : $n_{np} = \frac{\sigma_{np}}{\sigma_p}$,

де σ_{np} – граничне напруження для труби з отвором.

У такому випадку рівняння циклічної довговічності труб з прогарами (отворами) матиме вигляд:

$$N_p = An_{gh}^m = A \left(\frac{\sigma_{np}}{\sigma_p} \right)^m \quad (5.56)$$

Для оцінювання коефіцієнта зниження малоциклової довговічності φ_N труб з наскрізними пошкодженнями отримана така формула:

$$\varphi_N = \frac{N_p}{N_{p\sigma}} = \varphi_p^m, \quad (5.57)$$

де m – константа ($m \approx 1,25$);

N_p – довговічність труби з даним пошкодженням;

$N_{p\sigma}$ – довговічність труби при $\varphi_N = 1,0$.

Особливістю цієї функції є різке зниження φ_N при незначному зменшенні φ_p у порівняно вузькому діапазоні $0,8 < \varphi_p < 1,0$.

Таким чином, отримано формули для розрахунків коефіцієнта зниження несучої здатності і довговічності димової труби з отворами (прогарами).

5.6. Визначення довговічності димових труб за критеріями механіки руйнування

Температурні впливи і циклічні навантаження можуть призводити до появи тріщин у металевих стовбурах димових труб. Корозійний вплив атмосфери і димових газів значно прискорюють швидкість розвитку тріщин. Розгляньмо розвиток тріщин при оцінці характеристик статичної і циклічної довговічності металу димових труб [144].

При статичному навантаженні як кількісна міра опору розвитку тріщин приймається границя тріщиностійкості I_c за ГОСТ 25 506-85 і її відносне значення $\alpha_{тр}$. Для визначення характеристик статичної тріщиностійкості випробовуються плоскі зразки, вирізані з труб, з відношенням поперечного перерізу $b/t > 1,0$. Поздовжня вісь зразка має бути перпендикулярній осі труб. За допомогою холодного згинання зразки випрямляються, і на них фрезою наносять надрізи. Втомні тріщини у зразках створюються циклічним навантаженням. Дійсна довжина тріщини встановлюється за зломом зразка.

Механічні властивості металу визначаються за ГОСТ 1497-84 шляхом випробувань до руйнування гладких зразків, вирізаних з того самого металу, що і зразки з тріщинами. За результатами випробувань визначаємо тимчасовий опір $\sigma_u^{(t)}$, границю плинності $\sigma_y^{(t)}$, відносне повне звуження $\psi_k^{(t)}$, рівномірне звуження $\psi_\epsilon^{(t)}$ та ін. Криві деформаційного зміцнення при заданій температурі t для сталей, з яких виготовляються труби, можна апроксимувати функцією $\sigma_i = E \bar{\epsilon}_i^{-m^t}$. Коефіцієнт деформаційного зміцнення m визначаємо за значенням рівномірного звуження $\psi_\epsilon^{(t)}$:

$$m^t = \ln[1/(1 - \psi_\epsilon)] . \quad (5.58)$$

Номинальне руйнівне напруження визначається за значенням максимального руйнівного навантаження P_c :

$$\sigma_c^{(t)} = \frac{P_c^{(t)}}{bt}. \quad (5.59)$$

Границя тріщиностійкості I_c при відносній глибині тріщини $\eta = 0,5$ і знайденому значенні σ_c дорівнюватиме:

$$I_c^{(0,5)} = 0,5\sigma_c\sqrt{h}. \quad (5.60)$$

Якщо відносна глибина тріщини η ($\eta = h/t$) значно відрізняється від величини 0,5, границя тріщиностійкості I_c коригується з використанням формули

$$I_c^{(t)} = 0,5\sigma_c\sqrt{h}\cdot\varphi(\eta), \quad (5.61)$$

де $\varphi(\eta) = 1,99 - 0,4\eta + 18,7\eta^2 - 38,48\eta^3 + 53,85\eta^4$.

Середнє руйнівне напруження в нетто-перерізі зразка при $\eta = 0,5$ дорівнює $\sigma_{co} = 2\sigma_c$. Якщо відносна глибина тріщини η відрізняється від 0,5, то величина σ_{co} коригується за формулою

$$\sigma_{co}^{(t)} = \frac{\sigma_c^{(t)}}{1-\eta}. \quad (5.62)$$

Чутливість сталі до гострого концентратора напружень, тобто ступінь зниження руйнівних напружень через тріщину у зразку, визначається за формулою:

$$\alpha_{mp}^{(t)} = \frac{I_c}{I_{CH}} = \frac{\sigma_{co}}{\sigma_B}. \quad (5.63)$$

Тоді формула значення границі тріщиностійкості матиме вигляд:

$$I_{c*}^{(0,5)} = \sigma_c(1-\eta)\sqrt{h}\varphi(\eta)\varphi_{\sigma_B}^T. \quad (5.64)$$

При цьому напруження в нетто-перерізі досягають тимчасового опору металу $(\sigma_{CO}^{(t)} = \sigma_B^{(t)})$ і $\alpha_{TP}^{(t)} = 1,0$. Зі зменшенням значення α_{TP} чутливість металу до тріщиноподібних дефектів зростає і знижується опір розвитку тріщини.

Чутливість сталі до гострого концентратора α_{TP} і границя тріщинистійкості $I_C^{(t)}$ пов'язані залежністю:

$$I_C^{(t)} = \alpha_{TP}^{(t)} \sigma_B^{(t)} (1 - \eta) \sqrt{h} \varphi(\eta) \varphi_\sigma^T. \quad (5.65)$$

Криві статичної $I_c(\eta)$ і $\alpha_{TP}(\eta)$ визначаються за знайденими значеннями $I_c^{(0,5)}$ і $\alpha_{TP}^{(0,5)}$ за формулами:

$$I_c^{(t)} = 0,4 \cdot I_c^{(0,5)} = \frac{\alpha_{TP}}{\sigma_{TP}^{(0,5)}} (1 - \eta) \varphi(\eta); \quad (5.66)$$

$$\alpha_{TP}^{(t)} = 1 - 4\eta(1 - \eta) \left(1 - \alpha_{TP}^{(0,5)}\right). \quad (5.67)$$

За знайденими значеннями I_c визначаємо критичні коефіцієнти інтенсивності пружно-пластичних напружень і деформацій за такими формулами:

$$K_{c\sigma}^* = \left(\frac{I_C^{(t)}}{\sigma_T^{(t)}} \right)^{\frac{2m^{(t)}}{1+m^{(t)}}}, \quad K_{c\varepsilon}^* = \left(\frac{I_C^{(t)}}{\sigma_T} \right)^{\frac{2m}{1+m}}, \quad (5.68)$$

при $\sigma_{co} > \sigma_m$;

$$K_{c\sigma}^* = \left(\frac{I_C^{(t)}}{\sigma_T^{(t)}} \right)^{\frac{2m^{(t)}}{1+m^{(t)}}} (\sigma_{CO} / \sigma_T)^{\frac{1-m^{(t)}}{1+m^{(t)}}}, \quad (5.69)$$

$$K_{c\varepsilon}^* = \left(\frac{I_C}{\sigma_T} \right)^{\frac{2m}{1+m}} \cdot (\sigma_{CO} / \sigma_T)^{\frac{1-m^{(t)}}{m^{(t)}(1+m^{(t)})}}. \quad (5.70)$$

Таким чином, за характеристиками тріщиностійкості можливо здійснювати оцінювання залишкового ресурсу труб з виявленими під час діагностики пошкодженнями.

Наведімо розрахунок залишкового ресурсу труби з виявленою тріщиною глибиною h_0 (рис. 5.5). Установлена швидкість атмосферної корозії складає $v_0 = 0,1 \text{ мм/рік}$. Тріщина знаходиться в полі температурних напружень $\Delta T > 1$. У вершині тріщини $\alpha_\sigma \rightarrow \infty$, тоді $\sigma_i = \sigma_u^{(T)} = \psi_{\sigma_u}^T$. На основі рівняння (5.28) і (5.29) отримаємо формулу для розрахунку часу до утворення наскрізної тріщини:

$$\tau_p = \frac{(t_0 - h_0)}{v_0} / (1 + k_\sigma \cdot \psi_{\sigma_\varepsilon}^T \cdot \sigma_u) (1 + k_\varepsilon \cdot \psi_\varepsilon^T), \quad (5.71)$$

де ψ_ε^T – рівномірне звуження зразка на розтяг.

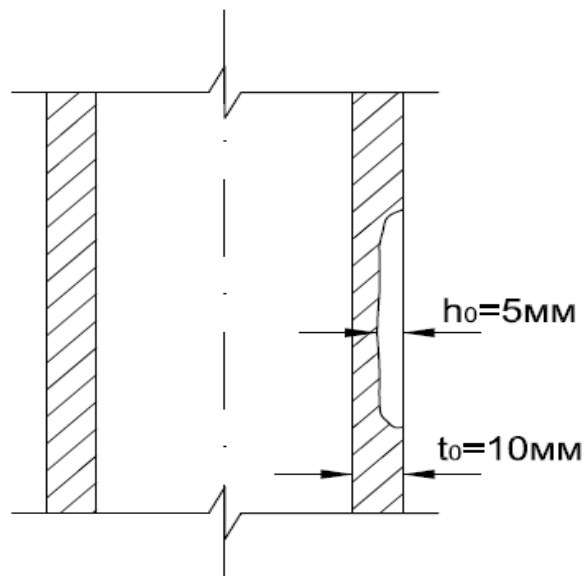


Рисунок 5.5 – Переріз стовбура металеві димові труби з тріщиною

Під час випробування металу встановлено, що $\sigma_\varepsilon^T = 500 \text{ МПа}$, а $\psi_{\sigma_\varepsilon}^T = 0,2$. Підставляючи ці значення у формулу (6.45), отримуємо $\tau_p = 12,5$ років. Відповідно до інших навантажень довговічність τ_p може виявитися значно нижче. Але урахування механічного ефекту завищує значення τ_p у чотири рази.

Запропонуймо метод оцінювання швидкості корозійного руйнування і залишкового ресурсу елементів конструкцій на основі підходів фізики і механохімії металів.

Теоретична міцність металів приблизно дорівнює: $\sigma_{теор}=0,1E$. Між тим, міцність у полікристалічному металі складає від $0,001E$ до $0,01E$, що нижче $\sigma_{теор}$ на один – два порядки. Відмінність пояснюється наявністю в полікристалічному металі дефектів – дислокацій, пор та ін. Ці дефекти виникають через різні особливості його кристалізації і фізичної природи. Полікристал металу являє собою з'єднані по-різному орієнтовані зерна фериту і перліту з різними розмірами і фізико-механічними властивостями. Границі зерен (цементит) мають особливі властивості, що відрізняються від властивостей зерен. Границі зерен і є джерелом утворення мікропластичних дефектів. Механічні характеристики металу σ_y , σ_u , ψ і δ відображають відповідні усереднені показники міцності і пластичності зразка, за якими судять про якість усього металу. При цьому необхідність вивчення складних процесів взаємодії різних зерен відпадає. Хімічна реакція на межі дотику металу і навколишнього середовища визначається станом поверхні, тобто напруженим станом в області мікропластичних дефектів. Наявність мікроскопічних дефектів і стан поверхні металу визначають структурну чутливість корозійно-механічних характеристик сталей.

При навантаженні металу необхідно розрізняти номінальні (середні по перерізу) і локальні (орієнтовані по-різному) напруження. Номінальні напруження визначають міцність зразка в цілому, локальні напруження – визначають інтенсивність корозійних процесів.

У локальних зонах на поверхні металу номінальні напруження σ_n і локальні напруження σ_l підсумовуються: $\sigma_{нл} = \sigma_n + \sigma_l$. В цілому по робочому перерізу елемента середні сумарні напруження дорівнюють номінальному напруженню: $(\sigma_{нл})_{ср} = \sigma_n$.

Значення номінальних напружень σ_n і локальних напружень σ_l взаємопов'язані внаслідок того, що зі зростанням навантаження ступінь

спотворення кристалічної решітки збільшується зі збільшенням щільності дислокацій. Дослідження мікроструктури сталі показали, що гранична щільність дислокацій деформованої сталі на 5-6 порядків більше, ніж щільність дислокацій відпаленої сталі.

При оцінюванні залишкового ресурсу металеві димові труби в умовах розтріскування, пов'язаного з пластичною деформацією, за рівняннями (5.28) і (5.29) другою складовою механохімічного процесу можна знехтувати. І тоді час до реалізації наскрізного отвору у трубі через корозійне розтріскування визначаємо за формулою:

$$\tau_p \approx \frac{t_0}{v_0} (1 + 0,1 \cdot E \cdot k_\sigma). \quad (5.72)$$

Як біло відзначено раніше, у низці випадків металеві димові труби працюють в умовах малоциклового навантаження.

Коефіцієнтами і параметрами, що характеризують малоциклову тріщиностійкість, є [42]:

- K_{th} – пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень (напружень циклу), при якому дефект у вигляді тріщини не розвивається протягом заданого числа циклів N_δ ($N_\delta = 1 \div 5 \cdot 10^4$);

- K_{fc} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень (значення, при якому відбувається доламування зразка);

- C_σ і n_σ – параметри кривої малоциклової тріщиностійкості М.А. Махутова [91]:

$$v = \frac{dH}{dN} = C_\omega (\Delta K_{1\varepsilon})^{n\sigma}. \quad (5.73)$$

Для зразків з тріщинами коефіцієнт інтенсивності пружно-пластичних деформацій $K_{1\varepsilon}$ визначається за формулою:

- при $\sigma_i < \sigma_T$

$$K_{1\varepsilon} = (K_I / \sigma_T)^{2/(1+m)}; \quad (5.74)$$

при $\sigma_i > \sigma_T$

$$K_{1\varepsilon} = (K_1 / \sigma_T)^{2/(1+m)} (\sigma_{co} / \sigma_T)^{(1-m)/(1+m)m} . \quad (5.75)$$

Характеристики малоциклової тріщиностійкості відповідно до нормативних документів [136] визначаються за результатами випробувань зразків з крайовою тріщиною в умовах м'якого циклічного розтягу по віднульовому пульсуючому циклу. Для труб з малим діаметром допускається визначення параметрів діаграми малоциклової тріщиностійкості за результатами випробувань напівкільцевих зразків з крайовими тріщинами. При цьому коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) визначається за формулою для визначення КІН при згині плоских зразків:

$$K_1 = \frac{\sigma M_H}{t \sqrt{6^3}} \sqrt{\eta} (1,93 - 3,07\eta + 14,53\eta^2 - 25,11\eta^3 + 25,8\eta^4) , \quad (5.76)$$

де $M_H = P R$ (R – серединний радіус трубчастого перерізу).

Обробляючи результати малоциклових випробувань зразків, отримуємо основні відомості про властивості металу, про умови і характеристики випробувань, розміри тріщин, розміри пластичної зони до і в процесі випробувань. За результатами випробувань зразків будується діаграма циклічної тріщиностійкості в координатах $lg v - lg \Delta K_{1\varepsilon}$, і значення швидкості поширення тріщини і відповідні їм найбільші значення K_{lmax} . Діаграми циклічної тріщиностійкості апроксимуються і встановлюються параметри $C_\sigma^{(t)}$ і $n_\sigma^{(t)}$.

За формулами, наведеними нижче, визначаємо оцінку малоциклової довговічності:

$$n_\sigma^{(t)} = 1 + m^{(t)} , \quad (5.77)$$

$$C_{\sigma}^{(t)} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\varepsilon_{np}}{n_m} \right)^{n_{\sigma}}, \quad (5.78)$$

$$K_{\varepsilon np} = \ln \left[\frac{1}{(1 - \psi_k)} \right] / \varepsilon_0, \quad (5.79)$$

де $n_m = \sigma_m / \sigma_0$, а $\varepsilon_{np} = \sigma_0 / E$.

Довговічність труб при циклічному навантаженні визначається інтегруванням кінетичного рівняння малоциклової пошкоджуваності (5.72):

$$N_{mp} = \int_{h_0}^{h_{kp}} \frac{dh}{f(K_{1\varepsilon})}. \quad (5.80)$$

Значення $f(K_{1\varepsilon})$ для кожної конкретної моделі встановлюється методом механіки розвитку тріщин.

Рівняння (5.80) можна представити в такому вигляді:

$$N_{mp} = N_o \cdot K_n. \quad (5.81)$$

Значення τ_o при $K_{1\varepsilon} = K_{1\varepsilon}^o = const$ визначається за рівнянням

$$N_o = \frac{h_{kp} - h_o}{C_{\sigma} [K_{1\varepsilon}^o]^{n_{\sigma}}}. \quad (5.82)$$

Параметр K_n враховує динаміку змінювання $K_{1\varepsilon}$ у процесі випробувань і залежить (для конкретного зразка) від коефіцієнта n_{σ} і відношення $\frac{h_o}{h_{kp}}$.

Значення коефіцієнта K_n для зразків, у яких КІН описується виразом типу $K_{1\varepsilon} = \sigma_o \sqrt{Mh}$ (де M – постійна), визначається за формулами:

- при $n \neq 2$

$$K_n = \frac{2 \left[\left(\frac{h_{кр}}{h_o} \right)^{(n+2)} - 1 \right]}{(n+2) \left(\frac{h_{кр}}{h_o} - 1 \right)} ; \quad (5.83)$$

- при $n = 2$

$$K_n = \frac{1}{\left(\frac{h_{кр}}{h_o} - 1 \right) \ln \left(\frac{h_{кр}}{h_o} \right)} ; \quad (5.84)$$

- при $n=4$

$$K_n = h_o / h_{кр} . \quad (5.85)$$

Оцінка довговічності труби може бути визначена із формули

$$N = \frac{h_o}{h_{кр}} \cdot \tau_c \quad (5.86)$$

Наведімо розрахунок залишкового ресурсу металевої димової труби №12 компресорної станції «Задніпровська» магістрального газопроводу «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани», який введений в експлуатацію в 1988 р.

Довжина металевих димових труб – 22.00 м, зовнішній діаметр труб – 2210 мм, товщина стінки труби $t_0 = 10$ мм. Димова труба виготовлені зі сталі ВСтЗсп5 ($R_y = 235$ МПа). В стовбурі труби виявлено тріщиною глибиною $h_0 = 5$ мм.

Для розрахунку часу до утворення наскрізної тріщини використаємо формулу (5.71)

$$\tau_p = \frac{(t_0 - h_0)}{v_0} / \left(1 + k_\sigma \cdot \psi_{\sigma\epsilon}^T \cdot \sigma_u \right) \left(1 + k_\epsilon \cdot \psi_\epsilon^T \right),$$

де ψ_ϵ^T – рівномірне звуження зразка на розтяг.

Швидкість атмосферної корозії для середньо агресивного середовища складає $v_0 = 0,1 \text{ мм/рік}$. Тріщина знаходиться в полі температурних напружень $\Delta T > 1$. У вершині тріщини $\alpha_\sigma \rightarrow \infty$, тоді $\sigma_i = \sigma_u^{(T)} = \psi_{\sigma_u}^T$.

Для визначення фактичного тимчасового опору металу з тіла труби були вирізані зразки металу. Під час випробування металу встановлено, що $\sigma_\sigma^T = 350 \text{ МПа}$, а $\psi_{\sigma_\sigma}^T = 0,2$.

Підставляючи ці значення у формулу отримуємо $\tau_p = 6,5$ років.

На практиці же, якщо при обстеженні димової труби виявлена тріщини (категорія небезпеки дефекта «А») в стовбурі труби, трубу негайно потрібно підсилити.

5.7. Залишковий ресурс металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж

Нині проводиться багато досліджень в області визначення залишкового ресурсу металевих димових труб і елементів несучих веж. Існує декілька методик визначення залишкового ресурсу, які істотно відрізняються як за критеріями при визначенні залишкового ресурсу, так і за формулами визначення залишкового ресурсу [44, 81, 87, 99, 126, 145].

Так, Сатьянов В.Г., Осоловський В.П. і ін.[125] у якості критерію безпечної експлуатації при визначенні залишкового ресурсу за корозійним зносом пропонують використовувати ресурс ($R_{рес}$), що визначає допустимий термін безпечної експлуатації оболонок вільно встановлених труб, який розраховується за формулою:

$$R_{рес} = m \frac{1 - \frac{t_\partial}{t_{эф}}}{\frac{t_{пр}}{t_{эф}} - 1}, \quad (5.87)$$

де m – час експлуатації димової труби від уведення в експлуатацію до моменту обстеження;

t_{np} – проектна товщина оболонки труби;

t_{∂} – допустима товщина оболонки;

$t_{\text{эф}}$ – ефективна товщина оболонки.

Розрахунок проводиться з використанням наступних формул:

$$t_{\text{эф}} = \sqrt{t_{\min} t_{\text{cp}}} , \quad (5.88)$$

$$t_{\min} = t_{\text{cp}} - z D_s , \quad (5.89)$$

$$t_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i , \quad (5.90)$$

$$t_{\partial} = 1,05 K_{\partial} \cdot Z_k^n (1 - \bar{Z}) (\varphi_y \cdot K_f)^{-0,5} , \quad (5.91)$$

де z – коефіцієнт, що враховує об'єм вибірки $n > 20$;

D_s – середньоквадратичне відхилення замірів t_i і t ;

φ_y – коефіцієнт стійкості;

K_f – коефіцієнт, що враховує вплив початкових недосконалостей оболонки труби.

При вичерпанні ресурсу труби за рахунок корозійного зносу здійснюється підсилення оболонки труби і повторний розрахунок.

Ми пропонуємо розрахунок залишкового ресурсу проводити на основі даних про технічний стан конструкцій, отриманих при проведенні обстеження і виконанні перевірних розрахунків, з урахуванням наявних дефектів і пошкоджень, фактичних характеристик матеріалів [96]. На основі інформації про зміну параметрів технічного стану димових труб і несучих веж за період експлуатації здійснюється визначення залишкового ресурсу і екстраполяція значень цих параметрів до досягнення граничного стану.

Залишковий ресурс визначаємо розрахунком за першим і другим граничним станом і за конструктивними вимогами.

У якості параметрів при розрахунку залишкового ресурсу, що визначають технічний стан димових труб і несучих веж, пропонується визначати різні коефіцієнти запасу: по першому граничному стану k^1 , по другому граничному k^2 і коефіцієнт запасу за конструктивними вимогами k^k , порушення яких є пошкодженням категорії «А» (тріщини, прогари, втрата стійкості тощо). Розрахунок залишкового ресурсу передбачає відстеження зміни сукупності цих коефіцієнтів запасу за час експлуатації димової труби і елементів вежі, коли хоча б один із них досягає значення одиниці (граничного стану).

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

$$f_i^1(x_m) \leq R_y, \quad (5.92)$$

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

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

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

$$f_j^2(y_n) \leq S_j, \quad (5.93)$$

де j – індекс, що позначає вид розрахунку переміщень або прогину (та ін.) за другим граничним станом;

y_n – параметри, які визначають значення функції f_j^2 .

При конструктивних вимогах на різних ділянках

$$(G^k)^p \leq (G_{lim}^k)^p, \quad (5.94)$$

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 (5.68), причому показник $p = 1$, якщо за нормами потрібно, щоб G^k не перевищував G_{lim}^k і при $p = -1$, якщо потрібно, щоб G^k був більше G_{lim}^k .

Відношення правих і лівих частин цих нерівностей (5.92, 5.93, 5.94) являє собою коефіцієнти запасу $k_{i,n}$, $k_{j,n}$, $k_{k,n}$ при розрахунку за першим і другим граничними станами, за конструктивними вимогами.

Справний стан передбачає, що всі коефіцієнти запасу не менші за одиницю.

Міцність і стійкість конструкції, відсутність втомного чи крихкого руйнування будуть забезпечені при $k^1 \geq 1$. Коефіцієнтом запасу за першим граничним станом k_f^1 є мінімальне значення k^1 в будь-якій ділянці або перетині

$$k_f^1 = \min k^1. \quad (5.95)$$

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

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

$$k_G^2 = \min k^2. \quad (5.96)$$

При значеннях $k_G^2 < 1$ нормальна експлуатація утруднюється і знижується довговічність конструкцій. Тобто, порушення вимог другого

граничного стану не означає вичерпання ресурсу споруди, але утруднює нормальну експлуатацію конструкцій.

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

$$k_0 - k = at^2 + k'_0 t, \quad (5.97)$$

де

$$a = \frac{(k_0 - k_e - k'_0 t_e)}{t_e^2}. \quad (5.98)$$

Параметри, які використовуються, означають:

k – поточне значення коефіцієнта запасу, що відповідає часу t ;

k_0 і k_e – коефіцієнти запасу, що розраховуються для моментів часу t_0 і t_e ;

t_0 – час, що відповідає початку розглядуваного періоду експлуатації;

t_e – час, що відповідає кінцю розглядуваного періоду експлуатації (час проведення останнього обстеження);

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

При задаванні параметра k'_0 має виконуватись умова:

$$0 \leq k'_0 \leq \frac{(k_0 - k_e)}{t_e}. \quad (5.99)$$

За умови рівності $k'_0 = (k_0 - k_e)/t_e$ залежність (5.97) стає лінійною функцією, при $k'_0 = 0$ вона перетворюється на квадратичну параболу з вершиною, розташованою на осі ординат.

На рис. 5.8 залежність (5.97) представлена графічно.

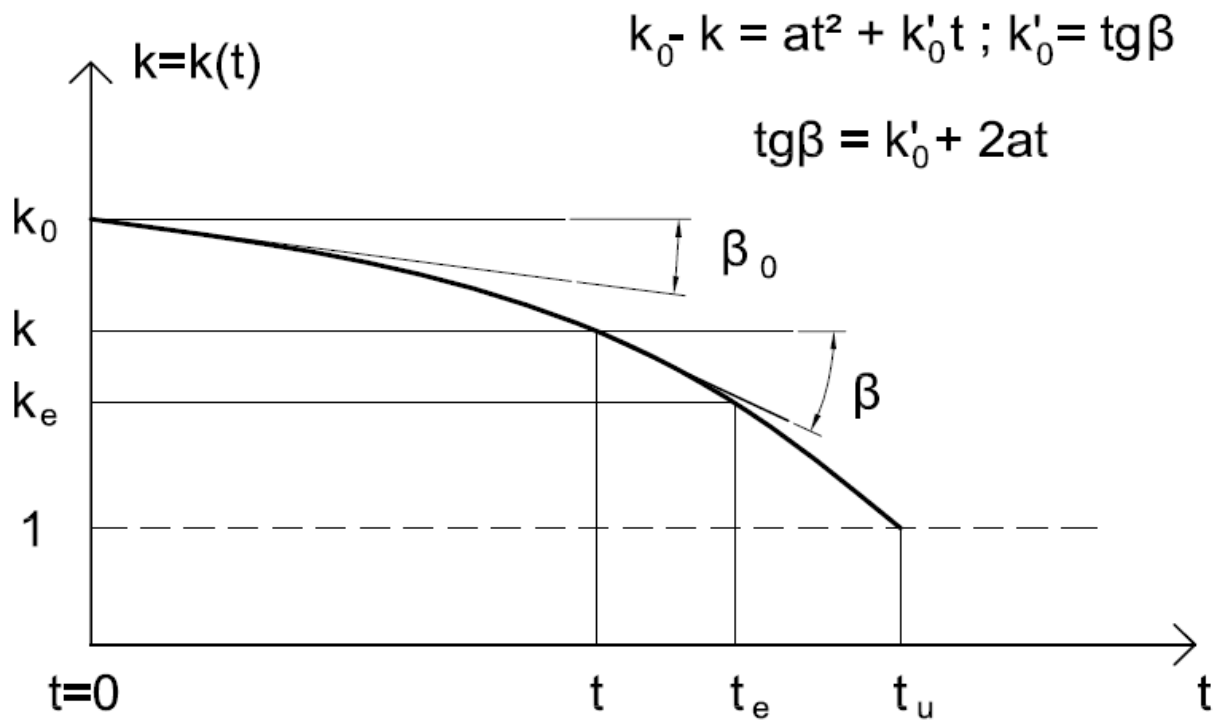


Рисунок 5.8 – Зміна коефіцієнтів запасу протягом життєвого циклу димової труби

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

$$t_u = -b + \sqrt{b^2 + (k_0 - 1)/a} ; \quad (5.100)$$

де $b = 0,5k_0/a$.

При $k'_0 = 0$ залежність (5.100) спрощується:

$$t_u = t_e \sqrt{(k_0 - 1)/(k_0 - k_e)} . \quad (5.101)$$

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:

$$T = \min[(t_u - t_e)_n \beta_n] , \quad (5.102)$$

де β_n – поправний коефіцієнт, що враховує вплив додаткових чинників на ділянці (в перерізі), що приймається за таблицею 5.3.

Таблиця 5.3 - Значення поправного коефіцієнта β_n

№ з/п	Фактор, що впливає	β_n
1	До моменту часу t_c перевищено нормативний термін експлуатації: менше 1,5 разів більше 1,5 разів	0,85 0,70
2	При розрахунку на витривалість і експлуатовані в умовах: середньоагресивного середовища сильноагресивного середовища	0,90 0,85

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

Розрахунок залишкового ресурсу визначався за першим граничним станом і конструктивними вимогами, з урахуванням року введення в експлуатацію, термінів перебування в експлуатації. і дані представлені в таблиці 5.4.

Зазвичай проектний термін експлуатації димових і вентиляційних труб – 50 років.

Аналізуючи отримані дані, можна констатувати, що навіть після тривалих термінів експлуатації (30-50 років і більше) металеві димові і вентиляційні труби мають значний залишковий ресурс. Так, залишковий ресурс металевої димової труби №1 печі №4 трубопрокатного цеху №2 (введена в експлуатацію в 1964 р., обстеження проведено в 2012р.) після 48 років експлуатації складає 29 років; залишковий ресурс металевої димової вогнетривів мартенівського цеху (експлуатація - з 1961 р., обстеження - в 2012р.) після 51 року експлуатації складає 24 роки; залишковий ресурс вентиляційної металевої труби заввишки 90,00м, що введена в експлуатацію 1958р. після 51 року експлуатації складає 21 рік.

Залишковий ресурс обстежених димових і вентиляційних труб, що експлуатуються понад 50 років – не менше 20 років.

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

Таблиця 5.4 - Залишковий ресурс димових і вентиляційних труб

№ п/п	Назва підприємства, найменування димових і вентиляційних труб	Рік введення в експлуат., р.	Термін експлуатації на момент обстеж., років	Залишковий ресурс, T, 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 «Тагмет», димова труба кристал. ділянки ТСП-3	1973	41	37
5	ВАТ «Металлург. завод «Електросталь» димова труба дугової печі №2 СПЦ-4	1980	30	43
6	УМГ «Черкаситрансгаз», КС «Південнобузька», димова труба №10	1986	27	37
7	УМГ «Черкаситрансгаз», КС «Кіровоградська», димова труба №8	1986	27	25
8	УМГ «Черкаситрансгаз», КС «Задніпровська», димова труба №2	1986	27	28
9	ВАТ «Азот», м. Кемерово вентиляційна труба корпусу 706	1958	63	21
10	ВАТ «Азот», м. Кемерово факельна труба корпусу 679	1974	49	29
11	ВАТ «Міндобрива», м. Воскресенськ витяжна труба цеху сірчаної кислоти	1974	48	29
12	ВАТ «Міндобрива», м. Розсош витяжна труба цеху азотної кислоти	1978	43	27

5.8. Висновки по розділу 5

1. На основі фізико-статистичного підходу запропонована загальна методологія оцінки надійності і управління старінням елементів металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж.
2. Запропоновано кінетичне рівняння пошкоджуваності металевих димових труб і несучих веж з урахуванням механічних напружень, корозійних і температурних впливів.
3. Отримано аналітичні залежності для визначення довговічності металевих димових труб з урахуванням різних впливів, які дозволяють описувати кінетику зміни напруженого стану і визначати час до настання граничного стану елементів висотних споруд.
4. Запропоновано методи оцінювання залишкового ресурсу несучих елементів металевих димових труб і веж з урахуванням різних дефектів і пошкоджень, встановлених під час діагностики.
5. Застосовано до висотних споруд методи визначення довговічності і залишкового ресурсу за критеріями механіки руйнування.
6. Запропоновано формулу визначення залишкового ресурсу металевих димових і вентиляційних труб, визначено фактичні резерви залишкового ресурсу після тривалих термінів експлуатації.

5.9. Список використаних джерел у розділі 5

Список використаних джерел у розділі 5 наведено у загальному списку використаних джерел [43, 44, 45, 81, 87, 96, 99, 125, 126, 136, 143, 144, 145, 150, 160, 169].

РОЗДІЛ 6. ПІДСИЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ ВИСОТНИХ СПОРУД

6.1. Підсилення елементів металевих димових труб і веж з тріщинами в основному металі і зварних швах

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.

До утворення тріщини напруження у перерізі труби розподілялися рівномірно і траєкторії головних напружень були прямолінійні [8, 16]. Після утворення тріщини в металі або зварному шві стовбура труби лінії головних напружень викривлюються і згущуються, що характеризує підвищення напружень у місці утворення тріщини і призводить до появи двох головних напружень σ_1 і σ_2 , тобто виникнення плоского напруженого стану. У місцях утворення тріщин характер викривлення ліній головних напружень аналогічний, як і при утворенні отворів. Але згущення траєкторій головних напружень більш яскраво виражене, що призводить до утворення великих значень напружень на краях тріщин (рис. 6.1).

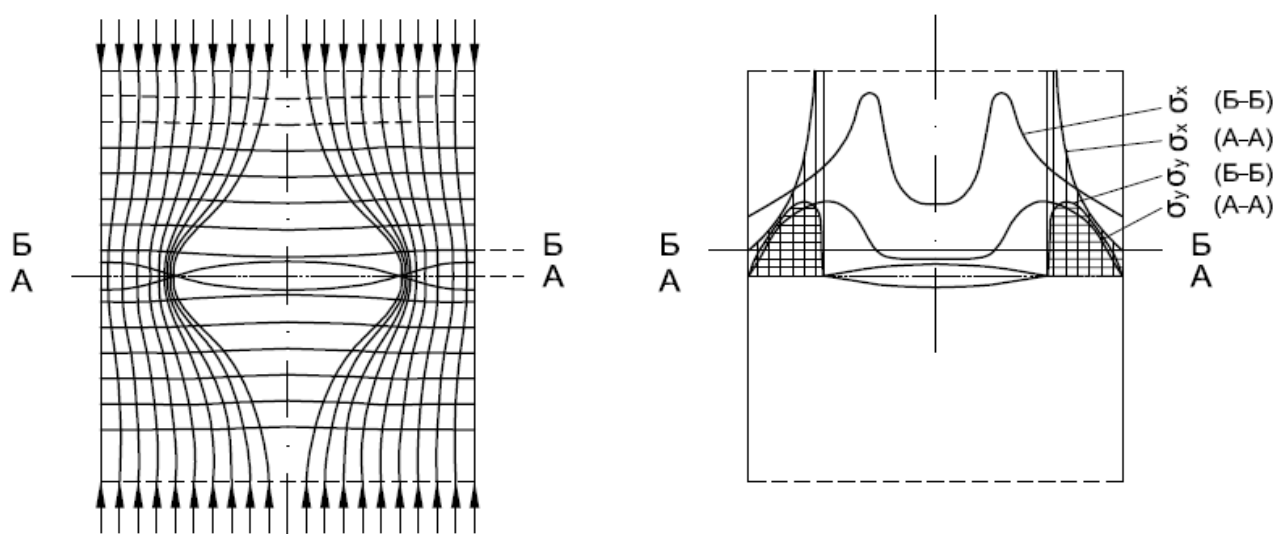


Рисунок 6.1 – Концентрація напружень у місці утворення тріщини

Радіус кривини r на краю тріщини дуже малий. Коефіцієнт концентрації напружень α_σ залежить від радіуса кривини r – чим менше радіус кривини, тим вище коефіцієнт концентрації. На краю тріщини коефіцієнт концентрації напружень досягає значення 6-9 [144].

Теоретично радіус кривини краю тріщини r прагне до нескінченності, і, як наслідок, до нескінченності прагне і коефіцієнт концентрації напружень. Чим вища концентрація напружень, тим менші пластичні деформації. Різкий перепад напружень і однозначне поле розтяжних напружень утруднює розвиток пластичних деформацій. Менш напружені сусідні ділянки стримують їх розвиток. Руйнування має крихкий характер і відбувається шляхом відриву.

На практиці рентгенографічні знімки показують, що навіть при гострому концентраторі напружень у зоні відриву наявні ділянки з яскраво вираженим пластичним протіканням [36, 62, 70, 78].

При обстеженні металеві витяжної труби висотою 100 м, розташованої всередині несучої вежі, цеху виробництва азотної кислоти хімкомбінату «Міндобрива» у м. Розсош в горизонтальному зварному шві була виявлена тріщина довжиною 1500 мм, шириною розкриття 5 мм.

За допомогою програмно-обчислювального комплексу Selena-Results побудована скінченноелементна модель основи труби з тріщиною у зварному шві (рис. 6.2).

Витяжна труба розраховувалася з урахуванням власної ваги і дії вітру, а також того, що вона розташована всередині несучої вежі.

У результаті розрахунку визначені головні напруження σ_1 і σ_2 навколо тріщини (рис. 6.3). Рисками на цьому рисунку показані майданчики головних напружень.

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 наявні ділянки з яскраво вираженим пластичним протіканням (рис. 6.4).

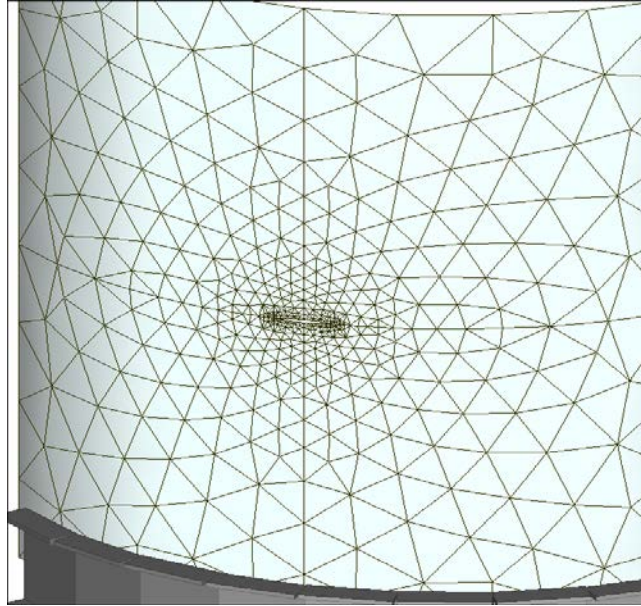


Рисунок 6.2 – Модель тріщин в горизонтальному шві труби

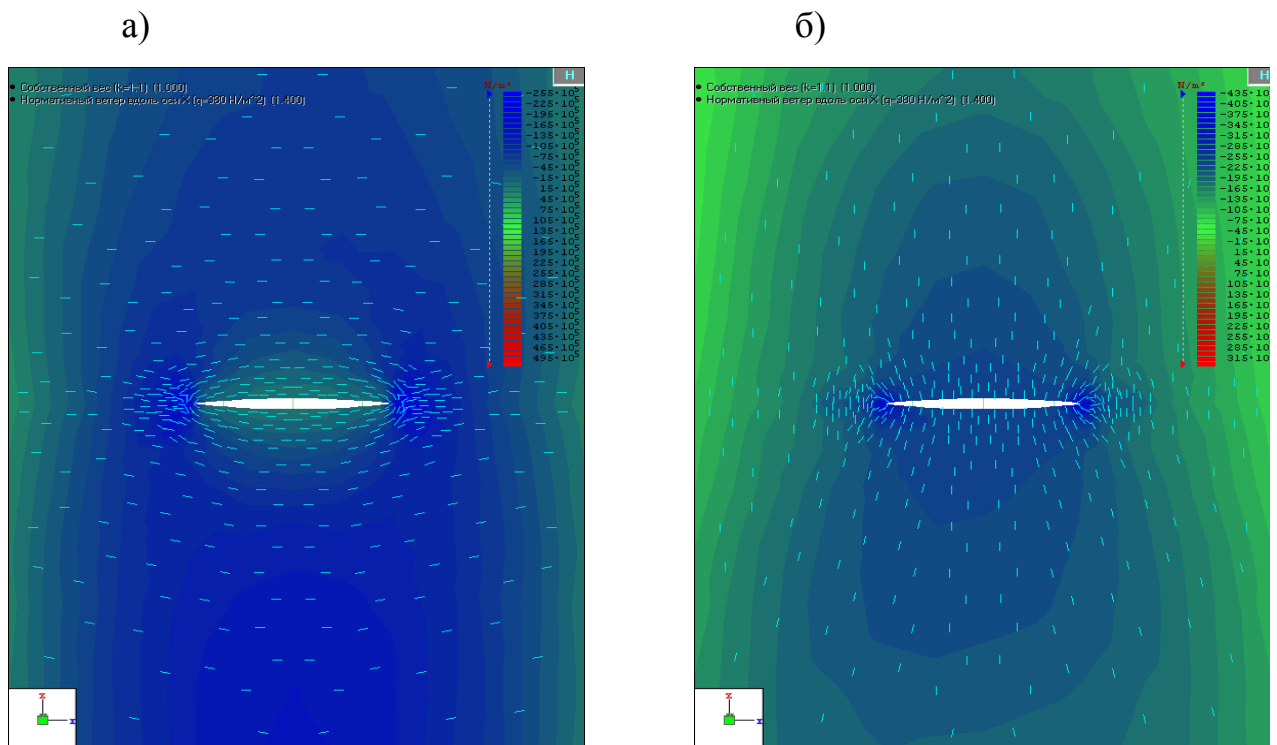


Рисунок 6.3 – Головні напруження навколо тріщини:

Інтенсивність напружень навколо тріщини показана на рис. 6.4.

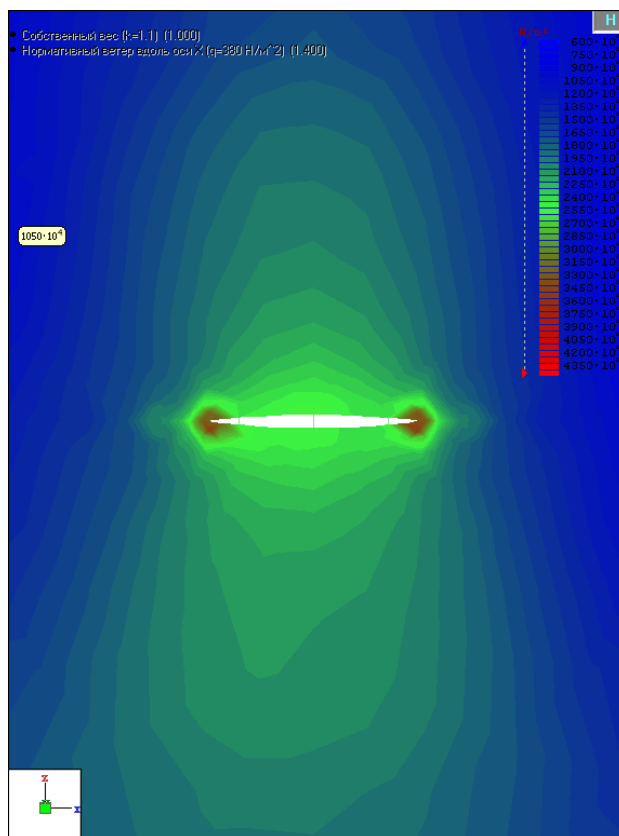


Рисунок 6.4 – Інтенсивність напружень навколо тріщини

Напруження на краях тріщини в місцях найбільшої концентрації досягають $\sigma_{\max} = 39 \text{ кН/см}^2$ (при номінальному напруженні $\sigma_n = 9,2 \text{ кН/см}^2$), що свідчить про розвиток значних пластичних деформацій в металі. Коефіцієнт концентрації напружень $\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_n = 4,2$.

За наявності концентраторів напружень у вигляді тріщин динамічні (вітрові) впливи і різке зниження температури (температурні удари) у край негативно впливають на міцність металевих витяжних труб і елементів несучих витяжних веж.

При підсиленні металевих конструкцій труб і несучих веж з тріщинами передусім треба просвердлити отвори по краях тріщини, тим самим збільшуючи радіус кривини r на краю тріщини і зменшуючи коефіцієнт концентрації напружень (рис. 6.5 а). Діаметр отворів залежно від ширини розкриття тріщини приймають $d_{\text{отв}} = 8\text{-}20 \text{ мм}$. Ці отвори призупиняють подальший розвиток тріщини. Металеву трубу в місці утвореної

тріщини необхідно підсилити за допомогою накладки, як і при наскрізному отворі в трубі.

Товщина накладки підсилення t_{yc} у місці утвореної тріщини зазвичай відповідає товщині стінки труби t_{mp} . Мінімальна відстань від зовнішнього краю отвору до краю накладки беруть не менше 40 мм. Накладку необхідно приварювати до стовбура труби по периметру кутовими швами (рис. 6.5 б).

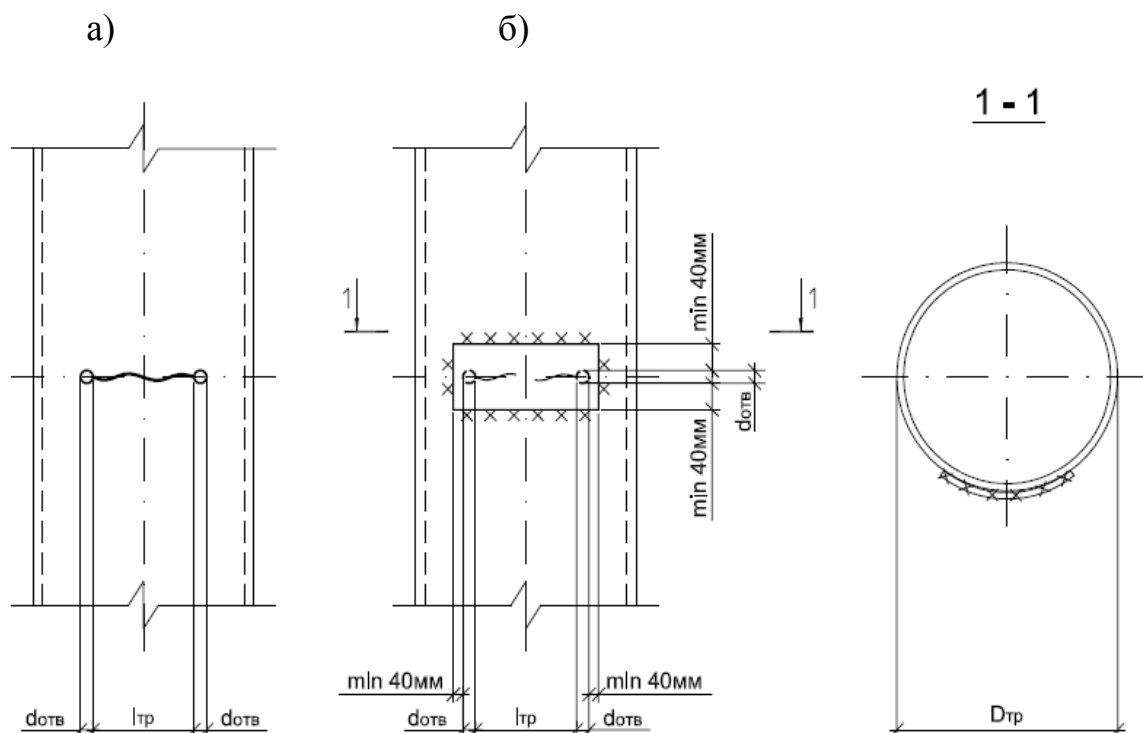


Рисунок 6.5 – Підсилення димової труби з тріщиною:

- а) отвори по краях тріщини;
- б) приварювання накладки до труби

При утворенні тріщини у зварному стиковому чи кутовому шві, який з'єднує між собою елементи металевих димових труб, підсилення аналогічне до підсилення труби з тріщиною в основному металі.

Спочатку необхідно просвердлити отвори по краях тріщини. Діаметр отворів залежно від ширини розкриття тріщини приймають $d_{отв}=8-20$ мм. Потім необхідно вирубати зварний шов з тріщиною. Виконавши оброблення крайок шва, відновити його. Якщо тріщина розташовується у стиковому шві

між елементами труби, необхідно підсилити це місце накладкою за аналогією з рис. 6.5.

6.2. Підсилення елементів металевих димових труб і веж із наскрізними отворами

Наскрізні отвори, що утворилися в результаті корозійного або температурного впливу, як і тріщини, є одним з найбільш небезпечних дефектів і пошкоджень елементів металевих димових труб і веж. Ці дефекти становлять безпосередню небезпеку руйнування конструкцій і повинні бути усунені негайно після виявлення.

До утворення тріщини напруження у перерізі труби розподілялися рівномірно і траєкторії головних напружень були прямолінійні [8, 16, 76, 144, 161]. Так само, як і при утворенні тріщини, після утворення отвору лінії головних напружень викривлюються і згущуються, що характеризує підвищення напружень у місці утворення отвору і виникнення плоского напруженого стану. Коефіцієнт концентрації напружень менше, ніж при утворенні тріщини, і, отже, величини двох головних напружень σ_1 і σ_2 істотно менші (рис. 6.6).

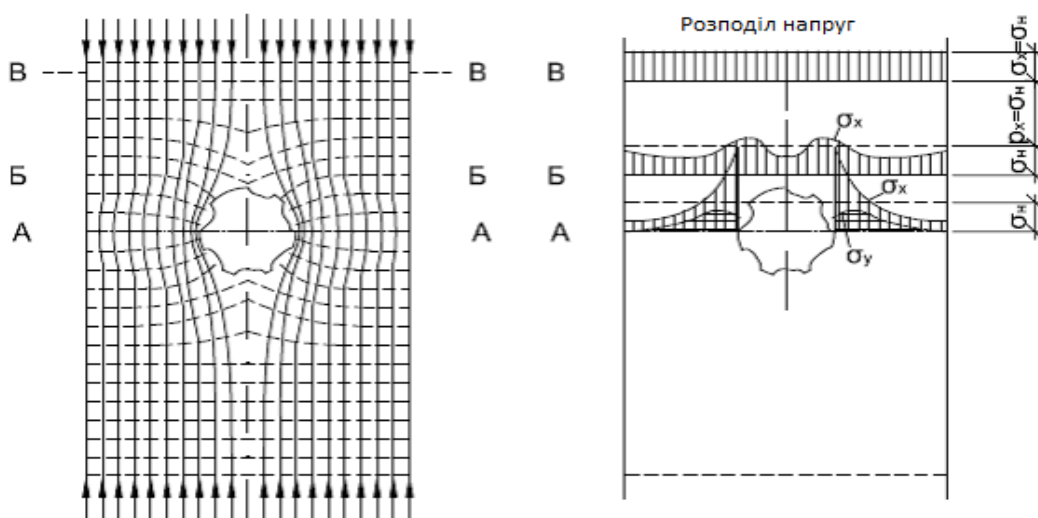


Рисунок 6.6 – Концентрація напружень у місці утворення отвору

Нерівномірність розподілу напружень характеризується коефіцієнтом концентрації напружень α_σ

$$\alpha_\sigma = \sigma_{\max} / \sigma_n, \quad (6.1)$$

де $\sigma_{\max}$ – максимальне напруження в місці концентрації; σ_n – номінальне напруження в ослабленому перерізі, що дорівнює $\sigma_n = N/A_{\text{осл}}$; $A_{\text{осл}}$ – площа ослабленого перерізу.

При утворенні отворів (корозійного характеру або прогарів) коефіцієнт концентрації напружень $\alpha_\sigma = 1,5-3,0$.

Існує закономірність зниження коефіцієнта концентрації напружень α_σ від коефіцієнта підсилення отвору K_{yc} . Коефіцієнт підсилення отвору K_{yc} визначається за формулою:

$$K_{yc} = \frac{A_{yc}}{A_{\text{осл}}}, \quad (6.2)$$

де A_{yc} і $A_{\text{осл}}$ – площі підсилення і ослаблення отвору.

Залежність коефіцієнта концентрації напружень α_σ від коефіцієнта підсилення отвору K_{yc} показана на рис. 6.7.

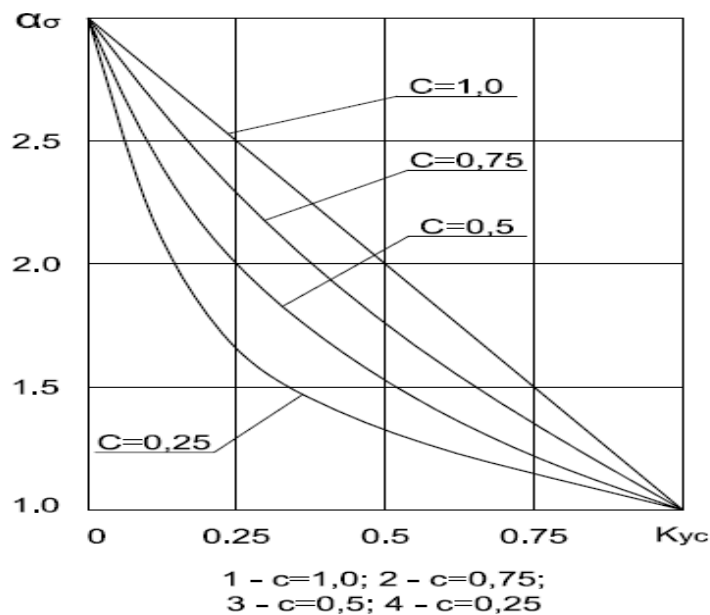


Рисунок 6.7 – Залежність концентрації напружень α_σ від коефіцієнта підсилення отвору K_{yc}

Представлена залежність добре описується такою формулою:

$$\alpha_{\sigma} = 3 - \frac{2}{K_{yc}^c}, \quad (6.3)$$

де c – константа ($c \approx 0,5$).

При однаковій товщині стовбура труби і накладки $K_{yc} = 1,0$, $\alpha_{\sigma} = 1,0$.
Схема підсилення труби з отвором накладкою показана на рис. 6.8.

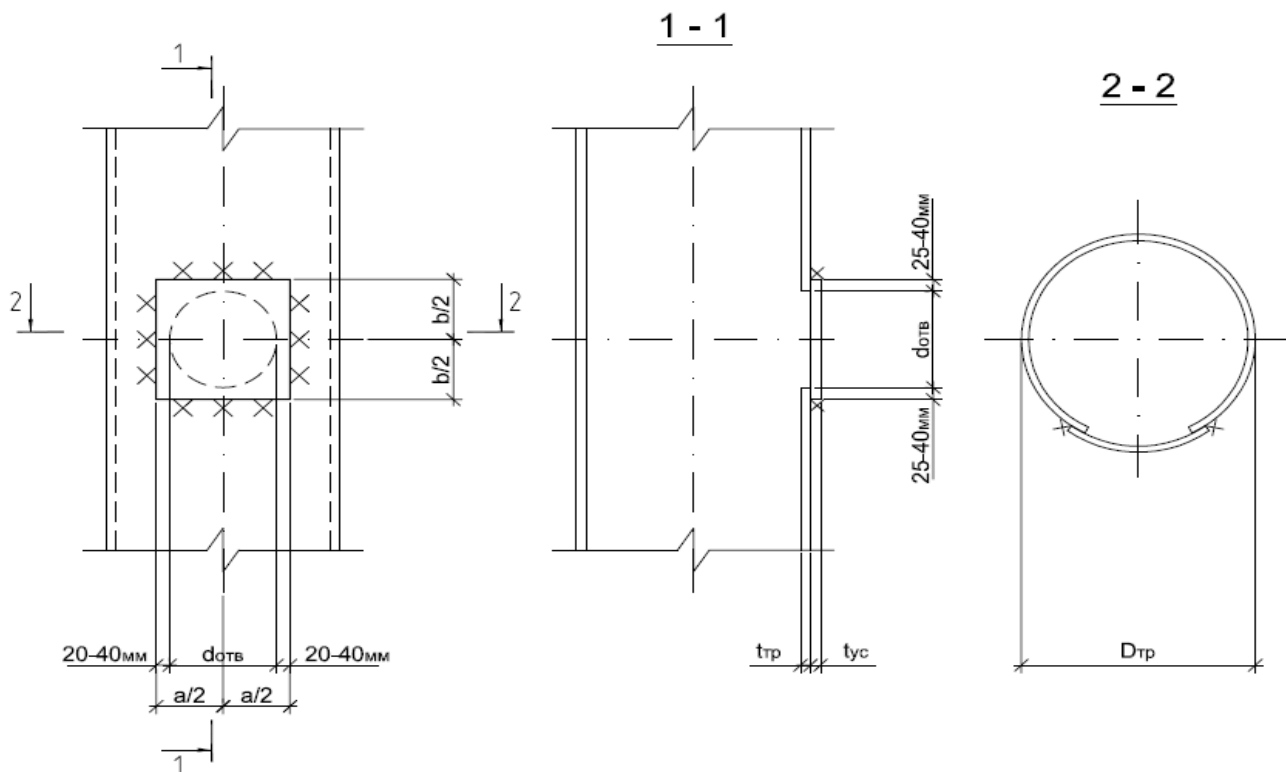


Рисунок 6.8 – Підсилення димової труби з наскрізним отвором

6.3. Урахування залишкових зварних напружень при підсиленні труб з пошкодженими накладками

При визначенні несучої здатності металевих димових труб з накладками велику роль відіграють зварні кутові шви, працездатність яких можна підвищувати раціональним вибором їх властивостей і розмірів. Підвищення працездатності зварних швів досягається підвищенням значення коефіцієнта тріщиностійкості K_c і оптимальним вибором параметрів накладок. Тріщиностійкість K_c покращується вибором зварних електродів,

оптимальним режимом зварювання, термічною обробкою у процесі або після зварювання.

Як відомо, працездатність зварних елементів визначається залишковими зварними напруженнями, викликаними особливістю термодформаційного циклу зварювання і за величиною близькими до границі плинності [8, 106, 147].

Процес формування і системи зварних напружень при підсиленні стовбура димової труби шляхом приварювання накладки представлений на рис. 6.9.

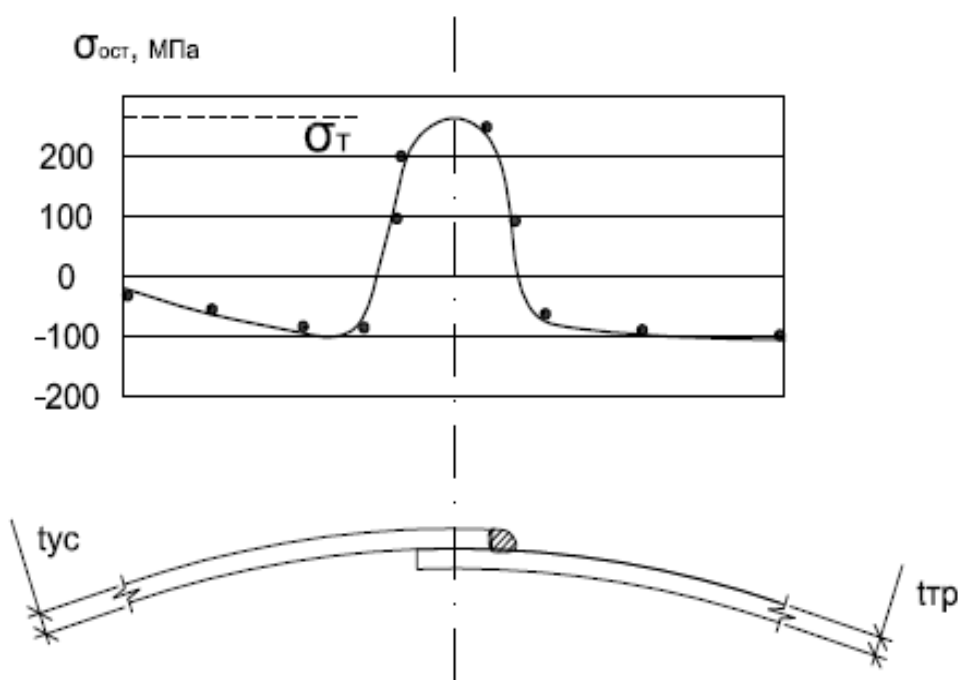


Рисунок 6.9 – Розподіл напружень при зварюванні накладних елементів

Товщина накладки підсилення $t_{ус}$ у місці наскрізного отвору зазвичай відповідає товщині стінки труби $t_{тр}$.

Зварні напруження під час приварювання у місці підсилення накладки до димової труби виникають внаслідок локалізованих процесів нагрівання і охолодження – структурних перетворень металу. При цьому найважливішою умовою є виникнення в окремих зонах елементів конструкцій пружно-пластичних деформацій. При зварюванні елементів градієнти температурних

полів такі, що в них утворюються зварні залишкові напруження. При цьому максимальні залишкові напруження розтягу $\sigma_{ост}^{max}$ для маловуглецевих і низьколегованих сталей, які добре зварюються, реалізуються в центрі шва.

Максимальні залишкові напруження $\sigma_{ост}^{max}$ приблизно дорівнюють границі плинності металу шва σ_m^u . У загальному випадку $\sigma_{ост} = \gamma \sigma_m^u$. Область поширення залишкових напружень обмежується шириною «активної зони», у якій відбуваються термопластичні деформації. Така закономірність розподілу зварних напружень відбувається тоді, коли зварюваний елемент перебуває в ненапруженому стані.

При усуненні наскрізних пошкоджень у діючих димових трубах за допомогою зварювання роботи виконуються в конструкціях під навантаженням [64]. 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 –

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_T},$$

де σ_T – 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 напружень. Розподіл зварних напружень, як правило, самоврівноважений, де площі епюри розтяжних і стискаючих напружень мають бути однаковими незалежно від початкових напружень.

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

$$\sigma_{ост} = \sigma_{ост}^{max} \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4}, \quad (6.4)$$

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

Експериментальні дані адекватно відповідають даним, отриманим за формулою (6.4), і представлені на рис. 6.10.

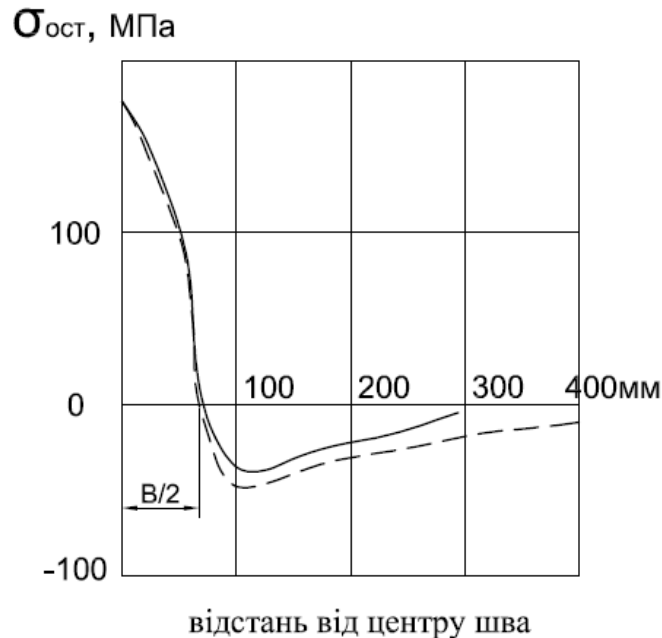


Рисунок 6.10. – Розподіл залишкових напружень до випробувань ($\sigma_n = 0$):

----- – за експериментальними даними;
 ————— – за формулою (6.4).

У випадку, коли границя плинності зварних швів (σ_T^u) відрізняється від границі плинності σ_T , до формули (6.4) доцільно ввести коефіцієнт механічної неоднорідності $K_\epsilon = \sigma_T^u / \sigma_T$. Отже, при звичайному зварюванні (ненапружених елементів конструкцій) у зоні кільцевих швів труб значення залишкових напружень описуються таким рівнянням:

$$\sigma_{ост} = K_B \cdot \gamma \cdot \sigma_T \frac{1 - \xi^2}{1 - \xi^4} . \quad (6.5)$$

На основі даних дослідження у роботі [76] встановлено, що 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 була прикладене зовнішнє напруження. Для оцінки залишкових напружень при приварюванні накладних елементів на основі виконаного аналізу підсумування внутрішніх і зовнішніх (активних) напружень отримано таку формулу:

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot K_{\epsilon} \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}_0^g \right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)}, \quad (6.6)$$

де g і γ – константи.

За відсутності концентраторів напружень залишкові напруження визначаються за формулою:

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot K_{\epsilon} \cdot \sigma_T \left(1 - \bar{\sigma}_0^g \right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)}. \quad (6.7)$$

Для однорідного з'єднання за механічними властивостями ($K_{\epsilon} = 1,0$):

$$\sigma_{ост} = \gamma \cdot \sigma_T \left(1 - \bar{\sigma}_0^g \right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)}. \quad (6.8)$$

У багатьох випадках [106] допускається, що максимальні залишкові напруження в центрі шва досягають границі плинності зварного з'єднання σ_T . Тоді при $\gamma = 1,0$ формула (6.6) матиме вигляд:

$$\sigma_{ост} = K_{\epsilon} \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}_0^g \right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)}. \quad (6.9)$$

При $g = 1$ з формули (6.9) отримуємо:

$$\sigma_{ост} = K_{\epsilon} \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}_0 \right) \frac{(1 - \xi^2)}{(1 - \xi^4)}. \quad (6.10)$$

Підставивши у формулу (6.10) $\xi = 1$, отримаємо відому формулу М.О. Окерблома [112]:

$$\sigma_{ост} = K_{\sigma} \cdot \sigma_T \left(1 - \alpha_{\sigma} \cdot \overline{\sigma_0} \right)$$

Аналіз значень залишкових напружень після зварювання $\sigma_{ост}$ з подальшим збільшенням зовнішнього навантаження показує, що зниження залишкових напружень від величини $\overline{\sigma_0}$ відбувається не прямо пропорційно, як це впливає з формули (6.10). Встановлено, що більш точно експериментальним даним відповідає формула (6.9) при $g = 2$.

Отже, встановлено закономірність ступеня зниження залишкових напружень $k = \sigma_{ост} / \sigma_{ост}^{max}$ від відносного напруження $\overline{\sigma_0}$ при приварюванні накладних елементів на димові труби

$$k = 1 - \overline{\sigma_0}^2. \quad (6.11)$$

Залежність ступеня зниження залишкових напружень $\sigma_{ост}$ від величини відносного напруження $\overline{\sigma_0}$ показана на рис.6.7:

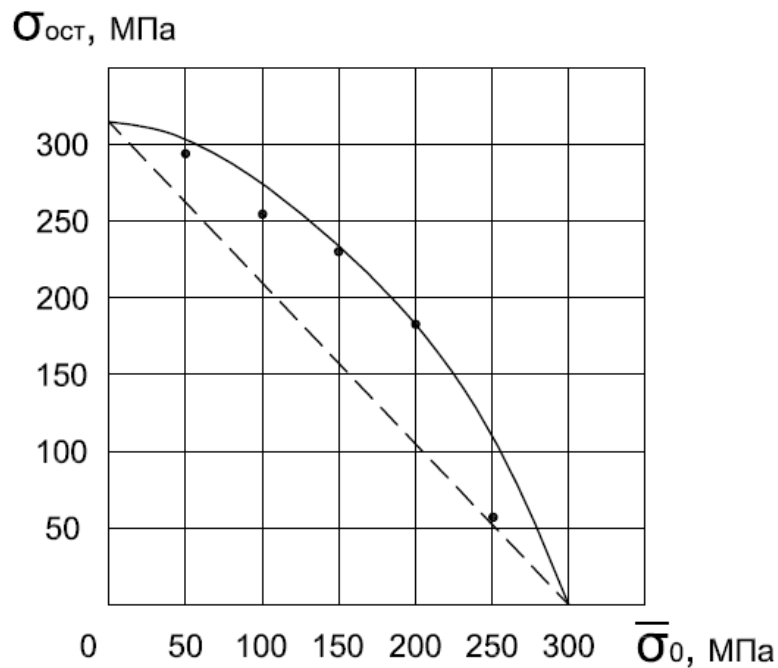


Рисунок 6.11 – Взаємозв'язок зниження залишкових напружень $\sigma_{ост}$ і величини відносного напруження $\overline{\sigma_0}$

----- – [108];

• • • – [112];

————— – за формулою (6.11)

6.4. Підсилення металеві димові труби, що втратила стійкість

При обстеженні металевих димових труб досить часто зустрічається втрата стійкості стовбура металевих димових і вентиляційних труб (рис. 4.18). Із загальної вибірки дефектів, виявлених при обстеженні димових труб, утрата стійкості стовбурів труб складає 4% (рис. 4.30).

При втраті стійкості стовбура невисокої металеві димові труби (до 25 м) доцільно демонтувати трубу або верхні елементи (при фланцевому сполученні) і здійснювати підсилення в горизонтальному положенні на землі.

Утрата стійкості стовбура труби призводить до значного її викривлення, і виставити трубу в вертикальне положення після підсилення без рихтування на землі практично неможливо.

Перед підсиленням металеві димові труби необхідно в'яснити причину, через яку труба втратила стійкість. Утрата стійкості стовбура труби може відбуватися через помилку при розрахунку труби, корозійного і температурного характеру, механічних пошкоджень. Підсилення стовбура труби залежить від встановленої причини втрати стійкості.

Якщо втрата стійкості має локальний характер, можливо вирізати цю ділянку і вварити нову обичайку стиковими швами з обробленням крайок.

При значній ділянці утрати стійкості стовбура труби (утворення гофр тощо) ця ділянка вирізається повністю. Підготовлюється ділянка труби для підсилення – оброблюються крайки існуючої труби і ділянки труби підсилення. Ділянки труби вирівнюються по осі і зварюються стиковими швами.

З практики обстежень високих металевих димових труб, розташованих усередині металеві 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. 6.12). 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.

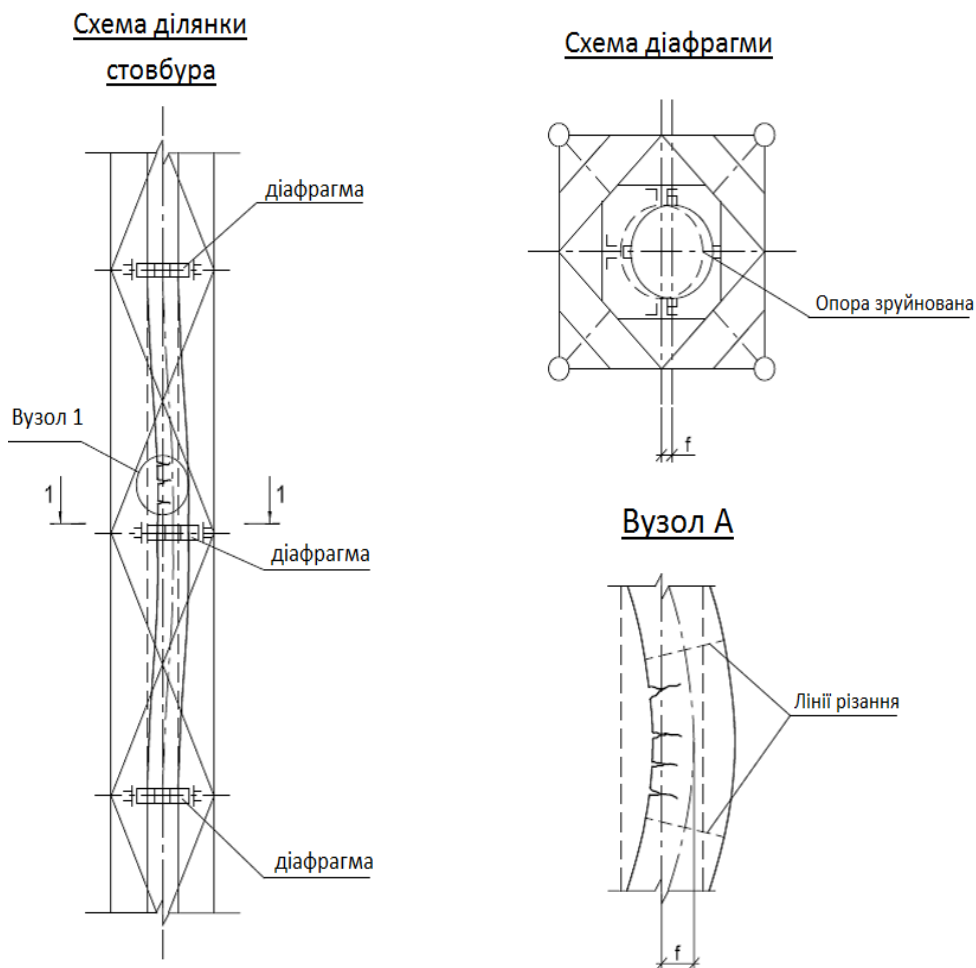


Рисунок 6.12 – Схема втрати стійкості стовбура труби

Як правило, при цьому стовбур труби втрачає прямолінійність і в місці опори, що не працює, упирається в балки робочого майданчика. Вигин труби досягає великих значень, стовбур труби втрачає стійкість і з одного боку зминається «гармошкою», де виникають великі ділянки з пластичною деформацією.

Як відомо, існують три варіанти передавання навантаження від власної ваги димових і вентиляційних металевих труб – на власний фундамент, на ґратчасту опору і на майданчики-діафрагми несучої вежі.

На час монтажу або ремонту також передбачено можливість передавання вертикального навантаження на верхній майданчик несучої вежі.

Перед початком робіт щодо ремонту труби з утратою стійкості стовбура трубу необхідно закріпити на верхньому майданчику в передбачене місце. Ділянку труби, що втратила стійкість, необхідно вирізати. Підготувати нову ділянку труби з обробленням крайок торцевих поверхонь для зварювання. Також здійснити оброблення крайок торців двох існуючих ділянок труби. Існуючі і нову ділянку труби встановлюють по осі і зварюють стиковими швами. Після цього необхідно відновити зруйновані або непрацездатні ковзні упори і звільнити стовбур труби від закріплення її на верхньому майданчику.

6.5. Забезпечення надійності металевих димових та вентиляційних труб та їх несучих веж.

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

Це пов'язано з тим, що багато металеві димових і вентиляційних труб та їх несучих веж випрацювала свій проектних ресурс, під час експлуатації утворилось багато дефектів та пошкоджень. Все це потребує проведення діагностики і визначення дійсного технічного стану конструкцій, визначення надійності споруд.

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

веж, знати час до відмови в роботі, завчасно підготуватись до реконструкції, зменшити до мінімуму перериви в роботі.

В залежності від технічного стану, категорії небезпеки виявлених дефектів, довговічності, залишкового ресурсу, необхідності виконання ремонтних робіт для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж запропоновано ввести три класи надійності – гарантований, граничний і не забезпечений.

Показники та вимоги для кожного класу надійності наведені в таблиця 6.1.

Таблиця 6.1. Категорії надійності роботи металевих димових труб та веж.

№ п/п	Показники	Металеві димові труби та їх несучі вежі			
		нормальний (I)	задовільний (II)	непридатний до нормальної експлуатації (III)	аварійний (VI)
1	Технічний стан				
2	Категорія небезпеки дефектів	(B)		(Б)	(А)
3	Довговічність τ, років	< 50 років		визначається розрахунком по результатам технічних обстежень	вичерпана
4	Підсилення	не потрібне		потрібне	не доцільне
5	Клас надійності	гарантований		граничний	не забезпечений

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

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

До не забезпеченого класу надійності віднесені металеві димові і вентиляційні труби та їх несучих вежі, які знаходяться аварійному технічному стані (VI), в яких виявлені під час обстеження дефекти категорії (A), довговічність і залишковий ресурс вичерпані, підсилення котрих недоцільне.

6.6. Висновки по розділу 6

1. Виконано аналіз значень залишкових напружень після зварювання з подальшим збільшенням зовнішнього навантаження в зоні кільцевих зварних з'єднань труб і в зоні наскрізних отворів, підсилених накладкою.

2. Запропоновано формули розрахунку, що враховують підсумування внутрішніх термомеханічних і зовнішніх напружень у зоні концентраторів напружень і без концентраторів.

3. Розглянуто особливості напружено-деформованого стану і підсилення металевої димової труби й елементів веж з тріщинами в основному металі і зварних швах.

4. Проведено аналіз підсилення димової труби при руйнуванні упорів вежі, що сприймають вітрове навантаження, і як наслідок утраті загальної стійкості.

5. Розроблені рекомендації по підвищенню надійності роботи металевих димових труб та їх несучих веж.

6. В залежності від технічного стану, категорії небезпеки виявлених дефектів, довговічності, залишкового ресурсу, необхідності виконання ремонтних робіт для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж запропоновано ввести три класи надійності – гарантований, граничний і не забезпечений

6.7. Список використаних джерел у розділу 6

Список використаних джерел у розділі 6 наведено у загальному списку використаних джерел [8, 16, 36, 62, 64, 70, 76, 78, 106, 144, 147, 161].

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 короткочасних 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, ЛІРА САПР, Selenia-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 прогарами 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 г.), 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».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алюминий. Металловедение, обработка и применение алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1972. – 145 с.
2. Атаманчук А.В. Определение аэродинамических коэффициентов для пакета из трех труб / А.В. Атаманчук, И.С. Холопов // Научный вестник. – Макеевка: ДонНАСА, 2003. – Вып. 39. – С. 25-30.
3. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / Под редакцией С.И. Мочана. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
4. Баженова Г.В. Нестационарные воздействия ударных и детонационных волн в газах / Г.В. Баженова, Л.Г. Гвоздева, Ю.П. Лагутов, В.Н. Ляхов. – М.: Наука, 1986. – 100 с.
5. Барабаш М. С. Численное моделирование НДС конструкций с учетом стадий жизненного цикла зданий и сооружений / М. С. Барабаш // Международный научный журнал: International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (Международный журнал по расчету гражданских и промышленных конструкций). – 2015.–Vol. 11, Issue 1. – P. 80–90.
6. Барштейн М.Ф. Расчет высотных сооружений на динамические воздействия // В кн.: Исследования по динамике сооружений. – М.: Госстройиздат, 1957. – С. 6-43.
7. Бахрачева Ю.С. Оперативная оценка склонности материалов к хрупкому разрушению при статическом и циклическом нагружении / Дис. .канд. тех наук. – Великий Новгород, 2004. – 126 с.
8. Бессонов А.А., Мороз А.В. Надежность систем автоматического регулирования. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 208 с.
9. Бліхарський З. Експериментально-теоретичні дослідження міцності залізобетонних балок, пошкоджених дією агресивного середовища / З.Бліхарський, Р.Хміль, Р. Струк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спецвипуск. Проблема корозії та антикорозійного захисту металів. 2014. - №10, т.1. – С.133-138.

10. Блюмина Л.Х. Колебание цилиндрических тел в воздушном потоке / Л.Х. Блюмина, Ю.Г. Захаров // Сб. «Исследование по динамике сооружений». – М.: Стройиздат., 1967. – С. 65-72.
11. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Д. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 586 с.
12. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
13. Брок Д. Основы механики разрушения. Пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
14. Бучинский В.Е. Атлас обледенения проводов. – Гидрометеиздат, 1966. – 116 с.
15. Бычков Н.М. Взаимодействие поперечного обтекания цилиндра с близко расположенным экраном / Н.В. Бычков, М.Д. Диковская, В.В. Ларичкин // Изм. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1990, вып.1. – С. 57-63.
16. Ватуля Г.Л. Моделирование работы трубобетонных элементов при кратковременном и длительном нагружении / Г.Л.Ватуля, А.В.Лобяк, В.В. Черногиль // Збірка наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту – 2017. Вип. 170. – С. 32-41.
17. Ведеников Г.С. Металлические конструкции / Ведеников Г.С., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. и др. – М.: Стройиздат, 1998. – 756 с.
18. Верзаков Г.Ф. Введение в техническую диагностику / Г.Ф. Верзаков, Н.В. Киршт, В.И. Рабинович, Л.С. Тимонен. – М.: Энергия, 1968. – 213 с.
19. Воскобойник О.П. Методологія нормування технічних станів сталезалізобетонних конструкцій. Дис.. д-ра техн. наук/ ПНТУ ім.. Ю. Кондратюка. – Полтава, 2014. – 405 с..
20. Гольденблат Н.Н. Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсных сил / Н.Н. Гольденблат, Н.А. Николаенко. – М.: Госстройиздат, 1961. – 165 с.

21. Гольденблат Н.Н. Длительная прочность в машиностроении / Н.Н. Гольденблат, В.П. Бажанов, В.А. Копнов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 213 с.
22. Гиренко В.С. Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения конструкционных сталей и их сварных соединений / Л.И. Гиренко, Э.В. Костенко // Автоматическая сварка. – Киев: 1985. – №9. – С. 13-20.
23. Гололедно-изморозевые явления и обледенение проводов. Справочник по климату СССР. – К.: Гидрометеиздат, 1969. – 116 с.
24. Гололобов Б.В. Статистические принципы определения требований на допустимые размеры технологических дефектов сварки / Б.В. Гололобов, А.Я. Артемьев // В кн.: Выбор и обеспечение методов и норм контроля качества сварных соединений. – Л.: ЛДНТП, 1976. – С. 15-20.
25. Гордеев В.Н. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В.Н. Гордеев, А.И. Лантух-Лященко, В.А. Пашинский, А.В. Перельмутер, С.Ф. Пичугин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 482 с.
26. Горицкий В.М. Диагностика металлов. – М.: Metallurgizdat, 2004. – 408 с.
27. Горицкий В.М. Физико-химическая диагностика металлов / В.М. Горицкий, Т.Н. Ульянова, Х.М. Ханухов, Ю.И. Юрченко // Физико-химическая механика металлов. – М.: 1988. – №2. – С.18-22.
28. Горицкий В.М. Склонность к тепловой хрупкости сварных соединений стали 09Г2С / В.М. Горицкий, Г.Р. Шнейдеров, Е.М. Баско // Металловедение и термическая обработка металлов. – М.:1986. – №4. – С. 24-27.
29. Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. М.: Высшая школа, 1970. – 423 с.
30. Гохфрейд Д.А. Несущая способность конструкций в условиях теплосмен. – М.: Машиностроение, 1970. – 314 с.

31. Гусенков А.П. Методика получения характеристик сопротивления малоциклового деформированию и разрушению при измерении поперечных деформаций / А.П. Гусенков, В.В. Зацаринный, Р.М. Шнейдерович // Заводская лаборатория. – М.: 1971. – №4. – С. 464-468.
32. Гусенков А.П. Прочность при изотермическом и неизотермическом нагружении. – М.: Наука, 1979. – 119 с.
33. Гутман Н.Н. Металлохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Госстройиздат, 1961. – 241 с.
34. ДБН В.3.1-218-174-2002. Мости та труби. Оцінка технічного стану автодорожніх мостів, що експлуатуються. К.: Мінрегіонбуд України, 2002. – 67 с.
35. Добровольский В.И. Оценка вязкости разрушения модельных элементов с учетом размера трещин / В.И. Добровольский, С.В. Добровольский // Заводская лаборатория, Диагностика материалов. – М.: 2004. - №10. – С.47-52.
36. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2018. Настанова щодо обстеження будівель та споруд для визначення та оцінки технічного стану. К.: ДП «УкрДНЦ», 2017. – 44с.
37. ДСТУ Б В.2.6 -2010: 2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. К.: Мінрегіон України, 2017. – 80 с.
38. Дужих Ф.П. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: Справочное пособие / Ф.М.Дужих, В.П. Осоловский, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплотехник, 2004. – 464 с.
39. Заварина М.В. Строительная климатология. – М.: Гидрометеиздат, 1976. – 312 с.
40. Зайнулин Р.С. Кинетика механохимического разрушения конструктивных элементов при стационарных и нестационарных нагрузках // Малоцикловая усталость – критерии разрушения и структуры материалов. Тез. докл.V Всесоюзного симпозиума. – Волгоград, 1987. – С. 176-178.

41. Зайнулин Р.С. Обеспечение работоспособности оборудования в условиях механохимической повреждаемости. – Уфа: МТЦ «БЭСТС», 1997. – 426 с.
42. Зайнулин Р.С. Оценка технического состояния и ресурса нефтегазохимического оборудования и трубопроводов / Р.С. Зайнулин, А.Г. Гумеров, А.Г. Халипов и др. – М. : Недра, 2004. – 286 с.
43. Зайнулин Р.С. Определение безопасного срока эксплуатации действующих трубопроводов в условиях коррозионного износа // Прикладная механика механохимического разрушения. – 2004. – №1. – С. 10-15.
44. Зайнулин Р.С. Расчеты ресурса оборудования трубопроводов с учетом фактора времени / Р.С. Зайнулин, А.Г. Вахитов, О.И. Тарабарин и др. - М. : Недра, 2003. – 50 с.
45. Заключение экспертизы промышленной безопасности технического состояния строительных конструкций металлической дымовой трубы №2 для секционной печи №5 трубопрокатного цеха (участок 1) ОАО «Таганрогский металлургический завод». №67-11-03. – М.: ЦНИСК им. В.А. Кучеренко, 2011. – 57 с.
46. Заключение экспертизы промышленной безопасности технического состояния строительных конструкций металлической дымовой трубы №1 для секционной печи №4 трубопрокатного цеха (участок 2) ОАО «Таганрогский металлургический завод». №63-11-03. – М.: ЦНИСК им. В.А. Кучеренко, 2011. – 53 с.
47. Заключение экспертизы промышленной безопасности технического состояния строительных конструкций металлической дымовой трубы №3 высотой 25.72 м термических печей термического отделения для механического цеха ОАО «Таганрогский металлургический завод». №71-11-03. – М.: ЦНИСК им. В.А. Кучеренко, 2011. – 61 с.
48. Заключение экспертизы промышленной безопасности технического состояния строительных конструкций металлической дымовой трубы №4 высотой 25.72 м термических печей термического отделения для

механического цеха ОАО «Таганрогский металлургический завод». №71-11-03. – М.: ЦНИСК им. В.А. Кучеренко, 2011. – 54 с.

49. Заключение о техническом состоянии строительных конструкций металлической дымовой трубы №21 (высотой $H = 30.00$ м) дуговой печи 32 СПЦ-4 ОАО «Металлургический завод «Электросталь» в г. Электросталь, Московской обл. № ТО-ЗС-045/2009. – М.: НПК «Изотермик», 2009. – 55 с.

50. Заключение о техническом состоянии строительных конструкций металлической дымовой трубы №29 (высотой $H = 18.00$ м) печи обжига стружки копрового цеха ОАО «Металлургический завод «Электросталь» в г. Электросталь, Московской обл. № ТО-ЗС-047/2009. – М.: НПК «Изотермик», 2009. – 53 с.

51. Заключение экспертизы промышленной безопасности на техническое состояние строительных конструкций выхлопной башни-трубы $H = 180.00$ м цеха серной кислоты отделения СК-48 и газоотводящей эстакады ОАО «Минудобрение» г. Воскресенск, Московской обл. № ЭПБ-ЗС-04/2013. – М.: НПК «Изотермик», 2013. – 67.

52. Заключение экспертизы промышленной безопасности на техническое состояние вытяжной башни-трубы $H = 120.00$ м цеха 53 установки ЭП-300 НХЗ ОАО «Сибурнефтехим» г. Кстово, Нижегородской обл. № ЭПБ-ЗС-39/2009. – М.: НПК «Изотермик», 2009. – 56.

53. Заключение экспертизы промышленной безопасности на техническое состояние вытяжной башни-трубы $H = 100.00$ м производства азотной кислоты АК-72 ОАО «Минудобрения» г. Россошь, Воронежской обл. № ЭПБ-ЗС-12/2009. – М.: НПК «Изотермик», 2009. – 71 с.

54. Заключение экспертизы промышленной безопасности на техническое состояние строительных конструкций выхлопной башни-трубы $H = 90.00$ м корпуса №706 ОАО «Азот» г. Кемерово. № ЭПБ-ЗС-37/2010. – М.: НПК «Изотермик», 2010. – 69 с.

55. Заключение экспертизы промышленной безопасности на техническое состояние строительных конструкций выхлопной башни-трубы

H = 180.00 м с газоотводящей эстакадой ЭФК-4 ОАО «Минудобрение» г. Воскресенск, Московской обл. № ЭПБ-ЗС-11/2005. – М.: НПК «Изотермик», 2009. – 74 с.

56. Елсуков Е.В. Разработка метода нормирования дефектов сплошности сварных соединений вертикальных цилиндрических резервуаров / Дис. канд. тех наук. – Челябинск, 2002. – 230 с.

57. Ельшин А.М. Дымовые трубы / А.М. Ельшин, М.Н. Ижорин, В.С. Жогудов, Е.Г. Овчаренко. – М.: Стройиздат, 2001. – 296 с.

58. Еремин К.И. Остаточный ресурс нагруженных металлоконструкций с трещиноподобными дефектами / Дис. д-ра. тех наук. – М., 1996. – 418 с.

59. Иванов Г.П. Влияние усталостной коррозии на долговечность сварных соединений / Г.П. Иванов, А.А. Худошин, В.А. Зимина // Безопасность труда в промышленности. М.: 2002. – №10. – С. 23-35.

60. Иванов В.И. Динамика разрушения деформируемого тела / В.И. Иванов, В.В. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.

61. Ионов В.Н. Прочность пространственных элементов конструкций / В.Н. Ионов, П.М. Огибалов. – М.: Высшая школа, 1972. – 752 с.

62. Исследование трещиностойкости в листовых металлоконструкциях, подверженных неравномерному нагреву // Отчет по НИР. М.: ЦНИСК им. В.А. Кучеренко, 1983. – 135 с.

63. Казакевич Ф.П. Аэродинамическое сопротивление участков труб при косом омывании их газовыми потоками. // Тр. Днепропетров. ин-т инж. ж.-д. транспорта. – Днепропетровск, 1958. – С. 114-142.

64. Карзов. Г.П. Новый подход к оценке качества сварных соединений / Г.П. Карзов, В.П. Леонов, Б.Т. Тимофеев. – Л.: ЛДНТП, 1978. – 26 с.

65. Карсункин В.В. Дефекты дымовых труб / В.В. Карсункин, Г.Я. Морозов. – М.: Науч. техн. Калейдоскоп, 2000. – №4. – С. 43-46.

66. Кильчевский Н.А. Элементы тензорного исчисления и его приложения к механике. М.: ГИТТЛ, 1954. – 254 с.

67. Кинаш Р.И. Аэродинамические исследования четырех круглых цилиндров / Р.И. Кинаш, А.Е. Копылов // Вестник НУ «Львовская политехника». «Теория и практика строительства». – 2004. – №95. – С. 88-92.
68. Коллакот Р. Диагностика повреждений. – М.: Наука, 1989. – 519 с.
69. Колмогоров В.А. Напряжение, деформация, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 230с.
70. Кольцун Ю.И. Методика расчета периода роста усталостной трещины и ее графическое обобщение / Ю.И. Кольцун, Т.А. Хибник // Вестн. Самар. гос. аэро-косм. ун-та. – Самара: СГАКУ, 2009. – №3. – С. 70-79.
71. Кнотт Дж. Микромеханика разрушения и трещиностойкость / Механика разрушения // Разрушение материалов. Под редакцией Д. Теплина. – М.: Мир, 1979. – С. 27-29.
72. Ковальчук Б.И. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций / Б.И. Ковальчук, А.А. Лебедев, С.Э. Усманский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 280 с.
73. Когаев В.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: Справочник / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
74. Колесников Ю.В. Механика контактного разрушения / Ю.В. Колесников, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1989. – 219 с.
75. Костенко Н.А. и др. Сопротивление материалов. Уч. Изд. – М.: ГУП Изд-во «Высшая школа», 2000. – 430 с.
76. Контроль качества сварки. Под. ред. В.Н. Волченко. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.
77. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1993. – 364 с.
78. Кудрявцев П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

79. Кузнецов В.В. Анализ термонапряженного состояния оболочек произвольной формы / В.В. Кузнецов, Ю.В. Сойников // Проблемы прочности. – М.: 2005. – №10 – С. 69-74.
80. Лессиг Е.Н. Листовые металлические конструкции / Е.Н. Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов – М.: Стройиздат, 1970. – 487 с.
81. Лифшиц В.И. Основные положения определения остаточного ресурса сосудов и аппаратов / В.И. Лившиц, В.Г. Татаринцов // Химическое и нефтехимическое машиностроение. – 2000. – №8. – С. 8-10.
82. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
83. Локшин В.А. Обобщение материалов по аэродинамическим сопротивлениям / В.А. Ложкин, С.И. Мочан, В.Н. Фомина. – Теплоэнергетика, 1971. – №10. – С. 67-70.
84. Лучко Й.Й. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування / Й.Й. Лучко, В.М. Чубніков, В.Ф. Лазар. – Львів: Каменяр, 1999. – 348 с.
85. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др. – М.: Машиностроение, 1981. – 640 с.
86. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
87. Матюхин Г.В. Диагностика и оценка остаточного ресурса элементов конструкций из низколегированных сталей / Г.В. Матюхин, А.В. Матюхин. А.В. Гридасов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – №3. – С. 28-35.
88. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
89. Махутов Н.А. Исследование нелинейных эффектов деформации и критериев разрушения / Н.М. Махутов, М.М. Гаделин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М.: 2005. – №8. – С. 57-67.

90. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. – М.: Машиностроение, 1973. – 2003 с.
91. Махутов Н.А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов / Н.М. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М.: 2004. – №4. – С.37-41.
92. Махутов Н.А. Усталостное разрушение металлов при многоцикловой нагрузке / Н.М. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – М.: 2005. – №7. – С. 51-56.
93. Мельников Н.П. Инженерный метод расчета строительных металлических конструкций на хрупкую прочность / Н.П. Мельников, Е.М. Баско, Б.Ф. Беляев // В кн.: Исследование хрупкой прочности строительных металлических конструкций. – М.: ЦНИСК им. В.А. Кучеренко, 1982. – С. 3-9.
94. Мэррис А. Обзор исследований по вихревым дорожкам, периодическим следам и индуцированным явлениям вибраций. – журнал. Теоретические основы инженерных расчетов. – Серия Д, т. 86. – 1984. – С. 214.
95. Митрофанов А.В. Расчет остаточного ресурса сосудов, работающих под давлением / А.В. Митрофанов, С.Б. Киченко // Безопасность труда в промышленности. – 1999. – №312. – С. 26-28.
96. Методика обследования технического состояния промышленных дымовых и вентиляционных труб / Х.М. Ханухов, И.И. Симонов, С.Н. Яровой и др. // Стандарт саморегулирующей организации. СТО СРО ЭТМП 03-16. – М.: 2016. – 68 с.
97. Мирошниченко Е.Р. Задачи о сжатии цилиндра между жесткими плитами без скольжения. – М.: Моск. лесотехн. ин-т., 1957. – 98 с.
98. Михайлов-Михеев П.Б. Тепловая хрупкость стали. М.: Машгиз, 1956. – 115 с.

99. Михайлов Г.Г. Некоторые аспекты стратегии определения остаточного ресурса / Михайлов Г.Г., Конаков О.А., Колмаков А.Я. // Безопасность труда и промышленности. – М.: – 2007. – №1. – С. 44-45.
100. Мэнсон С.С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. М.: Машиностроение, 1974. – 129 с.
101. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. ДБН В.1.2-2: 2006. – К.: Минрегионстрой Украины, 2006. – 59 с.
102. Нагрузки и воздействия. СНиП 2.01.07-85. – М.: Стройиздат, 1985. – 43 с.
103. Нагрузки и воздействия, Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. СП 20.13330.2016. – М.: Минстрой. 2016. – 104 с.
104. Наймарк О.Б. К описанию деформационных процессов при мартенситных превращениях / О.Б. Наймарк, В.В. Зильбершмидт, Л.В. Филимонова // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных материалов и конструкций. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – С. 116-123.
105. Наймарк О.Б. Кинетические переходы в средах с дефектами, деформационные свойства и разрушения твердых тел // Проблемы нелинейной механики деформируемого тела. – Свердловск: УрО АН СССР, 1989. – С. 116-123.
106. Нахалов В.А. Надежность швов труб теплоэнергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
107. Никифорова Т.Д. Научные основы и методы расчета конструкций заглубленных зданий с учетом внешних воздействий: дис.. д-ра техн. наук / ПДАБА. – Днепропетровск, 2016. – 390 с.
108. Николаев Г.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций / Г.В. Николаев, С.А. Куркин, В.А. Винокуров. – М.: Высш. Шк., 1982. – 272 с.

109. Нот Дж.Ф. Основы механики разрушения. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
110. Одесский П.Д. Предотвращение хрупких разрушений металлических строительных конструкций / П.Д. Одесский, И.И. Ведяков, В.М. Горпинченко. – М.: «СП Интермет инжиниринг», 1998. – 219 с.
111. Ортанский А.П. Сопротивление пучка труб в зависимости от угла атаки газового потока. – Котлотурбостроение, 1947. – №2. – С. 13-15.
112. Оскерблом Н.О. Проектирование и технология изготовления стальных конструкций / Н.О. Оскерблом, В.П. Демянцевич, И.П. Байкова – Л.: Стройиздат, 1963. – 602 с.
113. Пашинський В.А. Методологія нормування навантажень на будівельні конструкції . Автореф. Дис.. доктора техн.. наук / ПДТУ. – Полтава, 1998. – 33 с.
114. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – Київ.: Наукова думка, 1991. – 416 с.
115. Петров Л.Н. Коррозионно-механические разрушения металлов и сплавов / Л.В. Петров, Н.Г. Сопрунюк. – Киев: Наукова думка, 1991. – 216 с.
116. Петров К.П. Аэродинамика тел простейшей формы. – М.: Факториал, 1998. – 432 с.
117. Попов В.Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В.Н. Попов, В.В. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
118. Попов С.А. Алюминиевые строительные конструкции. – М.: Высшая школа, 1969. – 211 с.
119. Правила обследования, оценки технического состояния и паспортизации производственных зданий и сооружений. Государственный комитет строительства, архитектуры и жилищной политики Украины. Приказ №32/288 от 27.11.1997.
120. Расчет прочности элементов конструкций при малоцикловом нагружении: Методические указания / Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова АН СССР. – М.: 1987. – 41 с.

121. Реттер Э.И. Архитектурно-строительная аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.
122. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир, 1980. – 217 с.
123. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1978. – 216 с.
124. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. – М.: Стройиздат, 1972. – 110 с.
125. Савицкий Н. В. Основы расчета надежности железобетонных конструкций в агрессивных средах: дис.. д-ра техн. наук / ПДАБА. – Днепропетровск, 1994. – 410 с.
126. Сатьянов В.Г. Способ определения остаточного ресурса / В.Г. Сатьянов, П.Б. Питлипенко, В.А. Французов, С.В. Сатьянов, В.С. Котельников // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – №12. – С. 34-39.
127. Семко В.О. Оцінка надійності сталевих балок з дефектами / Полтава. – ПолНТУ, 2007. – 20с.
128. Семко О.В. Експериментальні дослідження з'єднання тонкостінних оцинкованих конструкцій / О.В. Семко, В.О. Сіробаба, Є.О. Загорулько // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – ОДАБА : Одеса, 2017. – Вип. 69. – С. 58–63.
129. Симиу Э. Воздействия ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Скандал. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.
130. Современное состояние гидроаэромеханики вязкой жидкости. Под ред. С. Гольдштейн. – М., 1984. – 145 с.
131. Солодарь М.Б. Металлические конструкции вытяжных башен / М.Б. Солодарь, М.В. Кузнецов, Ю.С. Плишкин. – Л.: Стройиздат, 1975. – 179 с.
132. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки

будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2-14-2009 – [Введены в действие с 2009-12-01] /Мінрегіонбуд України, 2009. - К.: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 30 с. (Державні будівельні норми України).

133. Система надійності та безпеки у будівництві. Настанова. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDN): ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 – [Введены в действие с 2009-07-01] / Мінрегіонбуд України, 2009. - К.: ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 81 с. (Національний стандарт України).

134. Стальные конструкции. Нормы проектирования. СНиП II-V.3-72. – М.: Стройиздат, 1973. – 143 с.

135. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. СП 16.13330.2011. – М.: Минрегион России, 2011. – 171 с.

136. Стальные конструкции. Нормы проектирования, изготовления и монтажа. ДБН В.2.6-163:2010.– К.: Минрегионстрой Украины, 2011. – 127 с.

137. Стальные конструкции. Нормы проектирования, изготовления и монтажа. Приложения. ДБН В.2.6-163:2010. – К.: Минрегионстрой Украины, 2011. – 127 с.

138. Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калибровочная сталь. ГОСТ 1050-88. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 76 с.

139. Сталь повышенной прочности (классов пр. 265, 295, 315, 325, 345, 355, 375, 390, 440). ГОСТ 19281-2014. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 76 с.

140. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. ГОСТ 380-2005. – М.: Издательство стандартов, 2005. – 56 с.

141. Степанов М.Н. Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости при асимметричном цикле нагружений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2005, №8. – С. 50-57.

142. Строительная климатология. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. – К.: Минрегионстрой Украины, 2011. – 127 с.

143. Суцев С.П. Оценка остаточного ресурса дымовых труб по критериям снижения жесткости и долговечности их несущей способности при эксплуатации // Вопросы безопасности объектов нефтегазового комплекса. – М: ЦИЭКС, 2004. – С.35-38.

144. Суцев С.П. Оценка долговечности труб с несплошностями по критериях механики разрушения / С.П. Суцев, А.Г. Пирогов // Мониторинг и безопасность трубопроводных систем. – Уфа: Транстэк, 2004. - №1. – С.27-30.

145. Суцев С.П. Оценка остаточного ресурса дымовых труб.– Уфа: МНТЦ «БЭСТСТ», 2003. – 50с.

146. Тренин С.И. Построение метода решения ряда осесимметричных задач теории упругости // Вестник МГУ. – М.: МГУ, 1952. – С. 45-51.

147. Труфяков В.И. Оценка надежности сварных соединений с учетом свойств материала, особенностей технологии методов контроля / В.И. Труфяков, В.С. Гиренко, В.Ф. Давиденко // В кн. Выбор и обеспечение методов и норм контроля качества сварных соединений. – Л.: ЛДНТП, 1976. – С. 69-73.

148. Тылкин М.А. Структура и свойства строительных сталей / М.А. Тылкин, В.И. Большаков, П.Д. Одесский – М.: Металлургия, 1983. – 287 с.

149. Указания по проектированию металлических конструкций антенных сооружений объектов средств связи. СН-376 - 67. – М., Стройиздат, 1968. – 56 с.

150. Упрощенный метод расчета напряжений в локально нагретой цилиндрической оболочке. Мицубиси Дзюко Ихо. – Япония, 1974. – №3. – 76 с.

151. Федяевский К.К. Силы вихревой природы, действующие на вынужденное колебание цилиндра / К.К. Федяевский, Л.Х. Блюмина // Сб: Труды конференции по аэродинамике и аэроупругости высотных строительных сооружений. – М.: ЦАГИ, 1974. – С. 104-120.

152. Филоненко-Бородич М.М. Две задачи о равновесии упругого параллелепипеда. – М.: ПММ, т.XV, вып.5, 1951. – 121 с.
153. Филоненко-Бородич М.М. Механическая теория прочности. – М.: Изд-во МГУ, 1961. – 456 с.
154. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости. – М.: Физматгиз, 1959. – 351 с.
155. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 161 с.
156. Хажинский Г.М. О теории ползучести и длительной прочности // изв. АН СССР. МТТ. – 1971. – №6. – С. 29-36.
157. Хеллан К. Введение в механику разрушения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
158. Хилл Р. Математическая теория пластичности. – М.: ТТТИ, 1956. – 407 с.
159. Худсон Д. Статистика для физиков. – М.: Мир, 1967. – 242 с.
160. Шаповал Д.В. Долговечность стволов металлических дымовых труб с трещиноподобными дефектами / Дис. канд. тех наук. – Уфа, 2004. – 127 с.
161. Шаханов С.Б. Дефекты сварных соединений и методы их устранения. – Л.: Стройиздат, 1980. – 80 с.
162. Шварц Г.Л. Таблицы коррозионной стойкости титана и его сплавов в различных агрессивных средах / Г.Л. Шварц, Л.С. Макарова, А.П. Акшенцова. – М.: Машиностроение, 1961. – 67 с.
163. Шестериков С.А. Релаксация и длительная прочность трубок при сложном напряжении. – Научные труды Института механики МГУ. – №3. – 1973– С. 57-62.
164. Шишков И.А. Дымовые трубы энергетических установок. / М.: Энергия, 1976. – 176 с.

165. Шорр Б.Ф. Основы расчета на ползучесть неравномерно нагретых деталей. Прочность и деформации в неравномерных температурных полях. М.: Атомиздат, 1962. – С. 183-239.

166. Чалек И. Ползучесть металлических материалов. – М.: Мир., 1987. – 304 с.

167. Юдин В.Ф. Аэродинамическое сопротивление пучков ребристых плит в поперебчном потоке газа / В.Ф. Юдин, Тохтарова Л.С. – Энергомашиностроение. – №9. – 1972.– С. 44-45.

168. Юргенсон Х. Гибкость и прочность трубопроводов. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 216 с.

169. Яровой С.Н. Долговечность и остаточный ресурс металлических дымовых труб с учетом температурного и коррозионного воздействия // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2017. –Вып. 88. – С. 110-114.

170. Яровой С.Н. Восстановление эксплуатационной пригодности железобетонной дымовой трубы высотой 120м печей П-601 и П-602 технологической установки ЛЧ 35/11 ООО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» в г. Кстово, Нижегородской обл. после взрыва газа в трубе / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2014. – Вып. 76. – С. 56-61.

171. Яровой С.Н. Граничные значения основных дефектов и повреждений при определении категории технического состояния промышленных дымовых труб / С.Н. Яровой, Ю.Н. Яровой, Е.Ю Дорофеев // Сб. научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2007. – Вып. 43. – С. 592-584.

172. Яровой С.Н. Надежность и жизнеспособность железобетонной трубы высотой 120м печей П-601 и П-602 технологической установки ЛЧ 35/11 после взрыва газа в трубе на ООО «Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» в г. Кстово, Нижегородской обл. / С.Н. Яровой, А.И. Горовый, Е.Ю. Дорофеев // Сб. научных трудов «Строительство,

Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2014. – Вып. 77. – С. 243-247.

173. Яровой С.Н. Особенности работы и расчета трех металлических дымовых труб, стоящих в ряд на небольшом расстоянии друг от друга и расположенных на общем железобетонном фундаменте / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Материалы международной научно-практической конференции «Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения». – Харьков: ХНУСА, 2015. – С. 146-152.

174. Яровой С.Н. Оценка напряженно-деформированного состояния вантовых оттяжек при смещении опор и температурных воздействиях / Ю.Н. Яровой, С.Н. Яровой, А.А. Мозговой. // Вестник ДонАСА. - Макеевка: ДонАСА, 2005. Вып. 8(56). – С. 3-8.

175. Яровой С.Н. Оценка технического состояния металлических дымовых труб ОАО «Таганрогский металлургический завод» после длительного срока эксплуатации // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2016. – Вып. 85. – С. 103-108.

176. Яровой С.Н. Повреждаемость металлических дымовых труб и несущих башен на протяжении жизненного цикла и предельные значения дефектов и повреждений / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Сб. научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2017. – Вып. 99. – С. 187-193.

177. Яровой С.Н. Проблемы надежности и причины обрушения металлических конструкций факельной эстакады под трубопроводы комплекса реформинга ООО ««Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез» / С.Н. Яровой, Е.Ю. Дорофеев // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2015. – Вып. 81. – С.22-25.

178. Яровой С.Н. Промышленная безопасность металлических дымовых труб компрессорных станций магистрального трубопровода после длительного срока эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый,

Е.Ю. Дорофеев // Сб. научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2013. – Вып. 69. – С. 619-622..

179. Яровой С.Н. Промышленная безопасность металлических дымовых труб трубопрокатного цеха №1 ОАО «Таганрогский металлургический завод» / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Сб. научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2016. – Вып. 83. – С. 243-249.

180. Яровой С.Н. Надежность и жизнестойкость металлических дымовых труб компрессорных станций магистрального газопровода «Кременчуг - Ананьев-Черновцы - Богородчаны» после длительного срока эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Сб научных трудов «Расчет и проектирование металлических конструкций». – Москва: МГСУ, 2013. – С. 251-256.

181. Яровой С.Н. Надежность и жизнеспособность металлической башни на крыше здания Госпрома после длительного срока эксплуатации / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2015. – Вып. 80. – С. 90-92.

182. Яровой С.Н. Резервы несущей способности дымовых труб турбоагрегатов компрессорных станций «Заднепровская», «Кировоградская», «Южнобугская» магистрального газопровода «Кременчуг - Ананьев-Черновцы - Богородчаны» / С.Н. Яровой, А.И. Горовый // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2013. –Вып. 71. – С. 225-230.

183. Яровой С.Н. Сложные варианты усиления стропильных ферм конструкций покрытия производственных зданий / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, С.Н. Яровой // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений». – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2016. – №1. – С. 70-76.

184. Яровой С.Н. 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.

185. Яровой С.Н. Долговечность и надежность металлической башни на крыше здания Госпрома в г. Харькове после длительного срока эксплуатации / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Сб. научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2015. – Вып. 82. – С. 237-243.

186. Яровой С.Н. Надежность и эксплуатационная пригодность металлических дымовых труб мартеновского и энергетического цехов «Таганрогский металлургический завод» после длительного срока эксплуатации / В.В. Фурсов, С.Н. Яровой // Сб. научных трудов «Строительство, Материаловедение, машиностроение». – Днепропетровск: ПГАСА, 2016. – Вып. 85. – С. 103-108.

187. 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 // Научный вестник строительства. – Харьков: ХНУСА, 2016. – Вып. 84. – С. 231-235.

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

189. Яровой С.Н. Обследование и безопасность металлических дымовых труб ОАО «Тагмет» после длительного срока эксплуатации / И.И. Ведяков, М.И. Гукова, С.Н. Яровой // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений». М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2016. – №2. – С. 7-13.

190. Янкелевич В.И. Условия работы и расчет дымовых труб. М.: Акватерм, 2002, №3. – С. 72-74.
191. American National Standard. Building Code Requirements for Minimum Design loads in Building and other Structures. ANSI A58.1. – 1972. – p. 87-98.
192. Bruckner A. Prediction of failure probabilities for cleavage fracture from the scatter of crack geometry and of fracture toughness using weakest link model / A. Bruckner. D. Minz. – Engineering fracture mech., 1983, v.18, №2. – p. 359-375.
193. Cintotta I.I. Experimental Investigation of Wind. Induced Oscillation Effects on Cylinder in Two Dimensional Flow at High Reynolds Numbers / I.I. Cintotta, G.W. Jons, R.W. Wolker // Meeting on Ground Wind Load Problems in Relation to Launch Vehicles. Nasa Langley Research Center. 1966. – P. 65-78.
194. Devenport A.G. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. – Proc I.C.E., London, 1961. – Vol.87. – p. 194-211.
195. Devenport A.G. The buffeting of large superficial structures by a atmospheric turbulence. Annals of the New York Academy of Sciences. Vol. 116, art.1.June, 1964. – p. 213.
196. Devenport A.G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. – Quarterly Journal Royal Meteorological society, London, 1961. – Vol. 87. – p. 194-211.
197. Gallagher J.P. The damage tolerant design hand book // Metals and ceramics information Centre, MCIC – HB – OIR, 1984. – p. 94-111.
198. Govda B.H. Вибрационные характеристики кругового цилиндра в треугольном размещении. Ladshmana, Prasad, B.V.S.S.S., Anand R.B. Forth International Colloguium on Bluff Body Aerodinamics and Applications, Bohum. Sept. 11-14, 2000, vol. Abstr. Bohum[^] Rubr – Univ. 2000. – с. 201-204.
199. Holmes J.D. Динамическая реакция сквозных башен на действие ветра / J.D. Holmes, P. Paevere. Nat.conf.publ. Inst. Eng., Austral.– №94/8. – 1994. – P. 327-337.

200. Jiang Hongping, Исследование реакции башенных конструкций , вызванные ветровыми нагрузками / Hongping Jiang, Xiangting Zhang. Zhendong ya chondji. – vibr. And shok. – 13.№1. – 1994.–. P. 46-54.
201. Koniq Michael. Экспериментальные исследования трехмерного следа за цилиндрическим телом при малых числах Рейнольдса. Mitt. M. – Planck. – inst. Stromungstorsch, №111. – 1993. – P. 46-74.
202. Kihara H. Precaution for avoidance of fracture of pressure vessers / H. Kihara, H. Oba, S. Susei. – Institution Mechanic Engineers, V.c. 52/71. – 1971. – p.183-189.
203. Kozlovski Aleksander. Некоторые проблемы стальных дымовых труб / Aleksander Kozlovski, Jerzy Lucaszynski, Adam Reichard, Bogdan Stancievich // Zesz. Nauk. PRZESZ Bud. Inz. Srodow. , №40. – 1990– С. 34-38.
204. Kutler P. Supersonic Flow in the Formed by Two Intersecting Wedges / ALAA journal, vol.12, Maj 1974. – P. 577-581.
205. Novak M. Aeroelastic Instability of Prisms in Turbulent Flow / M.Novak, A. Devenport. J. of the Eng. Mech. Div. Proc. ASCE. Feb. 1970. – 241 p.
206. Novak M. Aeroelastic Galloping of Rigid and Elastic Bodies // The University of Western Ontario BLWT -3-68, 1968. – 165 p.
207. Parkinson G.V. Wind – Induced Instability of Structures // Pfil. Trans. Roy.Soc. London, A.269.– 1971. – 230 p.
208. Peil Udo. Ветровые нагрузки на высотные сооружения // Mitt. Techn.Univ. Carolo - Wilchelmina, Braunshweig.– 30, №1. – 1995. P. 50-56, 58-64, 68-72.
209. Okada Hisashi, Okada Yasuo, Kikitsu Hitomitsu, Ohashi Nasamiki // Стратегия исследования ветровых нагрузок зданий BRI и NILIM. NIST Spect. Publ. 2002, №987. – С. 133-139.
210. Sayers A.T. Срыв вихрей с групп трех и четырех равнорасположенных цилиндров в поперечном потоке // J. Wind Eng. And ind. Aerodin. – 1990, №2. – P. 213-221

211. Scrutton C. On the Wind Excited Oscillations of Stacks, Towers and Masts. Proc. Symp. Wind Effects on Building and Structures NPL. Teddington 1965. – 312 p.

212. Takami H. Steady two-dimensional viscous flow of an incompressible fluid past a circular cylinder / H. Takami, H.B. Keller // Phus.Fluids. –V.12, №12. – 1969. – P. 51-56.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові 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 // Науково-практичний 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 // Наукoвий 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 РИНЦ).*

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, Saarbrücken, 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. Воронецкий, 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 трубопрокатного 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. Горовый // Збірник наукових праць «Товарный 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. Горовый, 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. Горовый, 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. Горовый // 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.

ДОДАТОК Б
ОСНОВНІ ОБ'ЄКТИ І РЕЗУЛЬТАТИ ОБСТЕЖЕНЬ
МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ
ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ

У додатку Б представлені основні характеристики обстежених металевих димових труб і несучих веж, описано дефекти і пошкодження, виявлені при обстеженні, представлені рекомендації щодо ремонту.

Б.1. Металеві димові труби висотою 22.00 м компресорної станції «Південнобузька» (15 труб) [145, 178].

Магістральний газопровід «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани» уведений в експлуатацію в 1988 р. Уздовж траси були збудовані три компресорні станції – КС «Задніпровська», КС «Кіровоградська» і КС «Південнобузька».

На компресорній станції «Південнобузька» встановлено 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б. Для відведення продуктів згоряння кожен турбоагрегат підключений до двох димових труб (рис. Б.1). Загальна кількість обстежуваних труб на станції – 15 одиниць.



Рисунок Б.1 – Металеві димові труби КС «Південнобузька»

На момент обстеження металеві димові труби експлуатувалися протягом 25 років. Кожна труба знаходиться в експлуатації близько 250 днів на рік. Довжина металевих димових труб – 22.00 м, зовнішній діаметр труб –

2210 мм. Димові труби циліндричного обрису жорстко (консольно) затиснені в монолітних залізобетонних ростверках на палевій основі з 4 паль.

Стовбур металевих димових труб зварений з 16 елементів стиковими швами. Елементи димової труби виготовлені зі сталі ВСт3сп5. Висота елементів від 950 мм до 1500 мм. Товщина стінки труби нижнього елемента – 16 мм, з позн. 1.04 м до позн. 14.85 м товщина стінки – 10 мм, вище позн. 14.85 м – товщина стінки 5 мм.

Ззовні на стовбурі труби на стиках елементів приварені кільцеві ребра з листа товщиною 10 мм або кутиків 90×8. Опорний лист труб виготовлений з листа товщиною 30 мм. Під анкерні болти М36 в опорному листі прорізані 12 отворів діаметром від 40 мм до 45 мм. Ребра жорсткості між опорним листом і стовбуром труби відсутні. На позн. 0.80 м у трубі вварене металеве днище з листа товщиною 5 мм. На позн. 1.04 м у трубу входить газохід розміром 4712×1040 мм. Турбоагрегати працюють на природному газі. Температура газів на вході в димову трубу +250⁰С.

Виявлені при обстеженні основні дефекти і пошкодження труб детально описані і проаналізовані у розділі 5.

Б.2. Металеві димові труби висотою 22.00 м компресорної станції «Кіровоградська» (16 труб) [144, 180].

Компресорна станція «Кіровоградська» розташована по трасі магістрального газопроводу «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани» і уведена в експлуатацію в 1988 р.

На компресорній станції «Кіровоградська» встановлено 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б. Для відведення продуктів згоряння кожен турбоагрегат підключений до двох димових труб. Загальна кількість досліджуваних труб на станції – 16 труб (рис. Б.2).

На момент обстеження металеві димові труби експлуатувалися протягом 25 років. Кожна труба знаходиться в експлуатації близько 250 днів на рік. Довжина металевих димових труб – 22.00 м, зовнішній діаметр труб –

2210 мм. Димові труби циліндричного обрису жорстко (консольно) затиснені в монолітних залізобетонних ростверках на палевій основі з 4 паль.



Рисунок Б.2 – Металеві димові труби КС «Кіровоградська»

Металева димова труба зварена з 16 елементів стиковими швами. Елементи димової труби виготовлені зі сталі ВСт3сп5. Висота елементів від 950 мм до 1500 мм. Товщина стінки труби нижнього елемента – 12 мм, з позн. 1.04 м до позн. 4.00 м товщина стінки – 10 мм, з позн. 4.00 м і до позн. 14.85 м – 6 мм, вище позн. 14.85 м – товщина стінки 5 мм.

Ззовні на стовбурі труби на стиках елементів приварені кільцеві ребра з листа товщиною 10 мм або кутиків 90×8. Опорний лист труб виготовлений з листа товщиною 30 мм. В опорному листі прорізані 12 отворів діаметром 39 мм під анкерні болти М36. З двох сторін кожного болта встановлені металеві ребра жорсткості товщиною 8 мм. На позн. 0.80 м у трубі вварене металеве днище з листа товщиною 5 мм. На позн. 1.04 м у трубу входить газохід розміром 4712×1040 мм.

Турбоагрегати працюють на природному газі. Температура газів на вході в димову трубу +250⁰С.

Виявлені при обстеженні основні дефекти і пошкодження труб детально описані і проаналізовані у розділі 5.

Б.3. Металеві димові труби висотою 22.00 м компресорної станції «Задніпровська» магістрального газопроводу (16 труб) [143, 178].

Компресорна станція «Задніпровська» розташована по трасі магістрального газопроводу «Кременчук – Ананьїв – Чернівці – Богородчани» і уведена в експлуатацію в 1988 р.

На компресорній станції «Задніпровська» встановлено 8 турбоагрегатів ГПА ГТК-10-4Б. Для відведення продуктів згоряння кожен турбоагрегат підключений до двох димових труб (рис. Б.3). Загальна кількість обстежуваних труб на станції – 16 одиниць.

На момент обстеження металеві димові труби експлуатувалися протягом 25 років. Кожна труба знаходиться в експлуатації в середньому близько 250 днів на рік.

Довжина металевих димових труб – 22.00 м, зовнішній діаметр труб – 2210 мм. Димові труби циліндричного обрису жорстко затиснені в монолітних залізобетонних ростверках на палевій основі з 4 паль.

Стовбур металевої димової труби зварений з 16 елементів стиковими швами. Елементи димової труби виготовлені зі сталі ВСт3сп5. Висота елементів від 950 мм до 1500 мм. Товщина стінки труби нижнього елемента – 10 мм, з позн. 1.04 м до позн. 7.30 м товщина стінки – 6 мм, з позн. 7.30 м і до верхнього обрізу труби товщина стінки 5 мм.

Ззовні на стовбурі труби на стиках елементів приварені кільцеві ребра з швелерів №8. Опорний лист труб виготовлений з листа товщиною 22 мм, підкріплювальні ребра бази виготовлені з листа товщиною 10 мм. В опорному листі прорізані 12 отворів діаметром 45 мм під анкерні болти М42. На позн. 0.80 м у трубі вварене металеве днище з листа товщиною 5 мм. На позн. 1.04 м у трубу входить газохід розміром 4712×1040 мм. З позн. 1.00 м і до верхнього обрізу ззовні на трубі виконана теплоізоляція.

Турбоагрегати працюють на природному газі. Температура газів на вході в димову трубу +250⁰С.



Рисунок Б.3 – Металеві димові труби КС «Задніпровська»

Виявлені при обстеженні основні дефекти і пошкодження труб детально описані і проаналізовані у розділі 5.

Б.4. Металеві димові труби секційних печей №4 і №5 трубопрокатного цеху №1 ВАТ «Тагмет» (5 труб) [46, 47, 48, 49, 188, 189].

Металеві димові труби №1, №2 і №3 секційної печі №4 і №1, №2 секційної печі №5 трубопрокатного цеху №1 збудовані в 1964 р. (рис. Б.4). Позначка оголів'я димових труб – 25.00 м.



Рисунок Б.4 – Три металеві димові труби секційної печі №4 (на передньому плані) і дві труби секційної печі №5 (на дальньому плані).

На позначці 6.77 м димові труби опираються на металеву просторову ґратчасту опору. Довжина труб з позн. 6.77 м – 18.25 м, діаметр вихідного отвору – 1.00 м. Стовбур труби циліндричного обрису, за винятком ділянки труби з позн. 10.77 м до позн. 11.40 м, де стовбур конічного обрису з переходом діаметра від 1170 мм до 1000 мм. Товщина стінки стовбура труби по всій висоті – 5 мм.

На позн. 6.77 м до труб підходять газоходи діаметром 1170 мм від секційних печей №4 і №5. Стовбур труби виготовлений зі сталі Ст3кп. Футеровка стовбура труби виконана з позн. 6.77 м до позн. 10.77 мм шамотною цеглою марки Шл-1.0, товщиною 116 мм. На стовбурі труби виконано хімічний захист ґрунтовкою ГФ 021 у 2 шари.

Секційні печі працюють на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+500^{\circ}\text{C}$, мінімальна $+450^{\circ}\text{C}$. Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний.

На позн. 24.10 м на трубах встановлено дифузор діаметром 2000 мм. Стовбур металевої труби всередині цеху розкріплений за допомогою розпірок у двох рівнях – до підкранової балки і до цегляної стіни. На покритті стовбур металевої труби розкріплений за допомогою однієї металевої просторової розпірки і двох відтяжок діаметром 16 мм.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труб:

- захисне лакофарбове покриття на багатьох ділянках труб зруйноване;
- корозійний знос стовбурів димових труб до 10%;
- металеві розпірки посередині труби з площини зрізані в одному або двох рівнях;
- розтяжки димової труби в рівні оголів'я ослаблені;
- елементи решітки металевої опори під трубу вигнуті або зрізані;
- руйнування захисного шару бетону фундаменту під опору, оголення і корозія арматури.

Б.5. Металева димова труба висотою 25.70 м термічних печей механічного цеху ВАТ «Тагмет» [188, 189].

Металева димова труба термічних печей термічного відділення механічного цеху збудована в 1965 р. (рис. Б.5).

Висота труби – 25.72 м, діаметр вихідного отвору – 0.58 м. Стовбур труби циліндричного обрису, за винятком ділянки труби з позн. 8.97 м до 9.82 м, де стовбур конічного обрису з переходом від внутрішнього діаметра 1100 мм до 850 мм. З позн. 0.60 м до позн. 8.97 м товщина стінки стовбура труби 10 мм, вище – товщина 8 мм. Стовбур труби виготовлений зі сталі Ст3. На позн. 4.00 м до стовбура труби підходить газохід діаметром 580 мм.



Рисунок Б.5 – Металева димова труба висотою 25.70 м термічних печей механічного цеху.

Футеровка стовбура труби першої ланки виконана з позн. 0.60 м до позн. 8.97 м шамотною цеглою марки Ш38 і Ш39 товщиною 241 мм, другої ланки – з позн. 8.97 м і вище – шамотною цеглою марки Ш38 і Ш39 товщиною 116 мм. Висота футеровки – з позн. 0.60 м до позн. 25.72 м складає 25.12 м. Між стовбуром труби і футеровкою влаштовано теплоізоляцію

з інфузорної землі товщиною 10 мм. Металева труба закріплена на залізобетонному фундаменті 8-ма анкерними болтами діаметром 40 мм.

Термічні печі працюють на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+150^{\circ}\text{C}$, мінімальна $+120^{\circ}\text{C}$. Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труби:

- захисне лакофарбове покриття на трубі зруйноване;
- корозійний знос стовбура труби до 15%;
- перевищення нормативного відхилення труби від вертикалі;
- довжина двох анкерних болтів недостатня для встановлення контргайок.

Б.6. Металева димова труба висотою 25.00 м газоочищення печі КС-55 мартенівського цеху ВАТ «Тагмет» [175, 189].

Металева димова труба висотою 25.00 м газоочищення печі КС-55 мартенівського цеху збудована у 2001 р. (рис. Б.6).

Висота труби – 25.00 м.

Стовбур труби з позн. 0.30 м до позн. 25.00 м циліндричного обрису, внутрішній діаметр труби – 1004 мм, товщина стінки – 8 мм. Стовбур труби виготовлений зі сталі ВСт3пс.

На позн. 5.56 м до стовбура труби підходить газохід. На позн. 18.60 м труба закріплена розпірками до несучих конструкцій будівлі газоочищення. Футеровка стовбура труби не передбачена.

Металева труба закріплена на залізобетонному фундаменті 16-ма анкерними болтами діаметром 25 мм.

Вапняково-обпалювальна піч КС-55 працює на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+120^{\circ}\text{C}$.

Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний.



Рисунок Б.6 – Металева димова труба висотою 25.00 м газоочищення печі КС-55 мартенівського цеху

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труби:

- захисне лакофарбове покриття на деяких ділянках труби зруйноване;
- корозійний знос стовбура димової труби до 3%;
- гайки на анкерних ботах не затягнуті.

Б.7. Металева димова труба висотою 17.80 м печі обпалу вогнетривів мартенівського цеху ВАТ «Тагмет» [175, 188].

Металева димова труба висотою 17.80 м печі обпалу вогнетривів мартенівського цеху збудована в 1961 р. (рис. Б.7).

Висота труби – 17.80 м. Стовбур труби циліндричного обрису, із внутрішнім діаметром труби 934 мм, товщина стінки стовбура труби 8 мм. Стовбур труби виготовлений зі сталі Ст3пс.

На позн. 1.50 м до стовбура труби підходить газохід. Футеровка стовбура труби по всій висоті відсутня. Металева труба закріплена на залізобетонному фундаменті 8-ма анкерними болтами діаметром 36 мм.



Рисунок Б.7 – Металева димова труба висотою 17.8 м печі обпалу мартенівського цеху

Печі обпалу вогнетривів працюють на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+90^{\circ}\text{C}$, мінімальна $+60^{\circ}\text{C}$. Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний. На трубі встановлена ходова драбина з позн. 4.00 м до позн. 17.70 м. Огорожа ходової драбини з позн. 5.00 м і до оголів'я труби.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труби:

- захисне лакофарбове покриття на деяких ділянках труби зруйноване;
- корозійний знос стовбура димової труби до 15%;
- деформація вертикальних елементів огорожі ходової драбини, два горизонтальних елементи огорожі ходової драбини у рівні верху труби не приварені до вертикальних елементів.

Б.8. Металева димова труба висотою 24.00 м газоочищення сушильного барабану мартенівського цеху ВАТ «Тагмет» [175, 189].

Металева димова труба висотою 24.00 м газоочищення сушильного барабану ділянки ШУС мартенівського цеху збудована у 1965 р. (рис. Б.8).



Рисунок Б.8 – Металева димова труба висотою 24.00 м

Висота труби – 24.00 м. Стовбур труби з позн. 0.50 м до позн.13.00 м циліндричного обрису, внутрішній діаметр труби – 1084 мм, товщина стінки – 8 мм. З позн. 14.00 м і вище стовбур труби циліндричного обрису, внутрішній діаметр – 784 мм, товщина стінки – 8 мм. З позн. 13.00 м до позн. 14.00 м труба має конусоподібний обрис. Стовбур труби виготовлений зі сталі ВСт3пс.

На позн. 7.50 м до стовбура труби підходить газохід. Футеровка стовбура труби по всій висоті не передбачена. Металева труба закріплена на залізобетонному фундаменті 4-ма анкерними болтами діаметром 42 мм.

Сушильний барабан працює на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+100^{\circ}\text{C}$. Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труби:

- захисне лакофарбове покриття на деяких ділянках труби зруйноване;
- корозійний знос стовбура димової труби до 10%, опорної плити і ребер жорсткості – до 8%;

- до огорожі драбини приварені горизонтальні стрижні арматури, які перешкоджають підйому на трубу.

Б.9. Металева димова труба висотою 25.04 м кришталевої ділянки ТСЦ-3 ВАТ «Тагмет» [175].

Металева димова труба висотою 25.04 м кришталевої ділянки ТСЦ-3 збудована у 1973 р. (рис.Б.9).



Рисунок Б.9 – Металева димова труба висотою 25.04 м кришталевої ділянки ТСЦ-3

Стовбур труби циліндричного обрису – з позн. 0.00 м до позн. 12.33 м (внутрішній діаметр труби 1084 мм, товщина стовбура труби 8 мм) і з позн. 13.03 м і до позн. 25.04 м (внутрішній діаметр 788 мм, товщина стовбура труби 6 мм). З позн. 10.03 м до 13.53 м стовбур конічного обрису з переходом від внутрішнього діаметра 1084 мм до 788 мм, товщиною 8 мм. Стовбур труби виготовлений зі сталі Ст3кп.

На стовбурі труби з позн. 0.00 м до позн. 12.33 м приварені вертикальні і горизонтальні ребра жорсткості. Переріз горизонтальних ребер жорсткості – 75×8 мм. Футеровка стовбура труби виконана з позн. 0.00 м до позн. 12.33 мм шамотною цеглою марки Шл-1.0 товщиною 113 мм.

Висота футеровки – 12.33 м. Металева димова труба закріплена за допомогою 4-х анкерних болтів діаметром 45 мм на залізобетонному фундаменті.

Скловарна піч працює на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+400^{\circ}\text{C}$, мінімальна $+200^{\circ}\text{C}$. Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труби:

- захисне лакофарбове покриття на деяких ділянках труби зруйноване;
- корозійний знос стовбура димової труби – до 5%;
- деформація ходових скоб на стовбурі металевої димової труби.

Б.10. Дві металеві вентиляційні труби висотою 19.87 м забору повітря енергетичного цеху ВАТ «Тагмет» [188].

Дві металеві вентиляційні труби висотою 19.87 м забору повітря в камеру фільтрів компресора 4М 10-50/70 кисневої станції енергетичного цеху збудована у 1985 р. (рис. Б.10).

Висота труб – 19.87 м. Стовбури труб циліндричного обрису діаметром 700 мм, товщиною 10 мм. Стовбури труб виготовлений зі сталі ВСт3кп.

Опорні листи баз труб товщиною 40 мм, розміром 140×1400 мм приварені до стовбура труби і ребер жорсткості. До стовбура труби і опорної плити приварені 8 ребер жорсткості з листа товщиною 10 мм.

На позн. 1.30 м до стовбурів труб підходять газоходи 700 мм.

На позн. 10.80 м кожна труба розкріплена з площини двома розпірками зі спарених швелерів.

Розпірки закріплені до елементів каркасу будівлі. Футеровка стовбура труби відсутня. Металеві труби закріплені на залізобетонному фундаменті 8-ма анкерними болтами діаметром 30 мм.

Ступінь агресивності впливу – середньоагресивний.



Рисунок Б.10 – Металеві вентиляційні труби висотою 19.87 м забору повітря енергетичного цеху

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труб:

- захисне лакофарбове покриття на деяких ділянках труб зруйноване;
- корозійний знос стовбура однієї труби – до 15%, другої – 8%.

Б.11. Металева димова труба висотою 18.00 м печі обпалу стружки копрового цеху ВАТ «Металургійний завод «Електросталь» [50].

Металева димова труба №29 (висотою $H = 18.00$ м) печі обпалу стружки копрового цеху ВАТ «Металургійний завод «Електросталь» у м. Електросталь, Московської обл., збудована у 1982 р. (рис. Б.11).

Стовбур димової труби виготовлений зі сталевих електрозварних труб, діаметр труби – 920 мм, товщина – 9 мм. По висоті стовбур труби зварений з 18 елементів. Між собою частини стовбура димової труби зварені стиковими швами з к-подібним однобічним обробленням крайок. Металева труба зсередини не футерована. На висоту 2.00 м від бази стовбур труби підсилений листами товщиною 9 мм.

Опорний металевий лист бази труби розміром 2.00×2.00 м, товщиною 24 мм. Між опорним листом бази і стовбуром труби приварені 4 опорних ребра висотою 850 мм, товщиною 16 мм.



Рисунок Б.11 – Металева димова труба висотою 18.0 м печі обпалу стружки копрового цеху

У процесі експлуатації на опорний лист бази встановлені два додаткові листи товщиною 30 мм і 14 мм. Ці листи приварені до стовбура труби. Також були встановлені чотири додаткових ребра жорсткості, але до стовбура димової труби вони не приварені.

Металева труба на позн. 0.20 м встановлена на монолітний залізобетонний фундамент. База труби закріплена у фундаменті 4-ма анкерними болтами діаметром 16 мм.

Металева димова труба розкріплена за допомогою 6 відтяжок у двох рівнях. раскреплена при помощи шести оттяжек в двух уровнях. Спочатку чотири відтяжки були розкріплені до двох фундаментів і дві відтяжки до цегляної стіни. Відтяжки розташовані через 120^0 . На позн. 4.00 м до димової труби підходить газохід з металевої труби.

У печі обпалу стружки копрового цеху спалюється природний газ. Температура димових газів на вході газоходу в трубу: мінімальна $+50^{\circ}\text{C}$, максимальна $+90^{\circ}\text{C}$. Об'єм відвідних газів: мінімальних $-0.18\text{ м}^3/\text{с}$, максимальний $-0.38\text{ м}^3/\text{с}$. Вологість газів $-10\text{ г}/\text{м}^3$. Агресивні складові у % по об'єму: $\text{SO}_2 = 0.23\%$, $\text{SO}_3 = 0.02\%$, $\text{CO}_2 = 6.1\%$.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труб:

- захисне лакофарбове покриття труби зруйноване;
- корозійний знос стовбура труби – до 10%;
- корозійний знос опорного листа бази стовбура димової труби – до 20%;
- утрата стійкості листа підсилення стовбура труби;
- відсутні шви кріплення ребер жорсткості до стовбура димової труби;
- відтяжки кріплення труби ослаблені.

Б.12. Металева димова труба висотою 30.00 м печі обпалу стружки ВАТ «Металургійний завод «Електросталь» [50].

Металева димова труба №21 (висотою $H = 30\text{ м}$) дугової печі №2 СПЦ-4 ВАТ «Металургійний завод «Електросталь» у м. Електросталь, Московської обл., збудована у 1980 р. (рис. Б.12).

Стовбур димової труби виготовлений зі сталевих електрозварних труб. Діаметр труби – 1220 мм, товщина – 12 мм. Між собою три частини стовбура димової труби зварені стиковими швами к-подібної форми з однобічним обробленням крайок. Стики труб на позн. 12.00 м і 24.00 м. Металева труба зсередини не футерована.

Металева труба замонолічена в залізобетонний фундамент на глибину 1000 мм. Металева димова труба за допомогою швелерів у двох рівнях на позн. 12.00 м і 22.00 м закріплена до колони каркасу СПЦ-4.

На позн. 9.20 м до димової труби підходить газохід з металевої труби діаметром 1220 мм.

У дуговій печі №2 СПЦ-4 спалюється природний газ Температура димових газів на вході газоходу в трубу: мінімальна $+40^{\circ}\text{C}$, максимальна $+70^{\circ}\text{C}$. Об'єм відвідних газів: мінімальний – $0.13\text{ м}^3/\text{с}$, максимальний – $0.33\text{ м}^3/\text{с}$. Вологість газів – $10\text{ г}/\text{м}^3$. Агресивні складові у % по об'єму: $\text{SO}_2 = 0.20\%$, $\text{SO}_3 = 0.02\%$, $\text{CO}_2 = 6.3\%$.

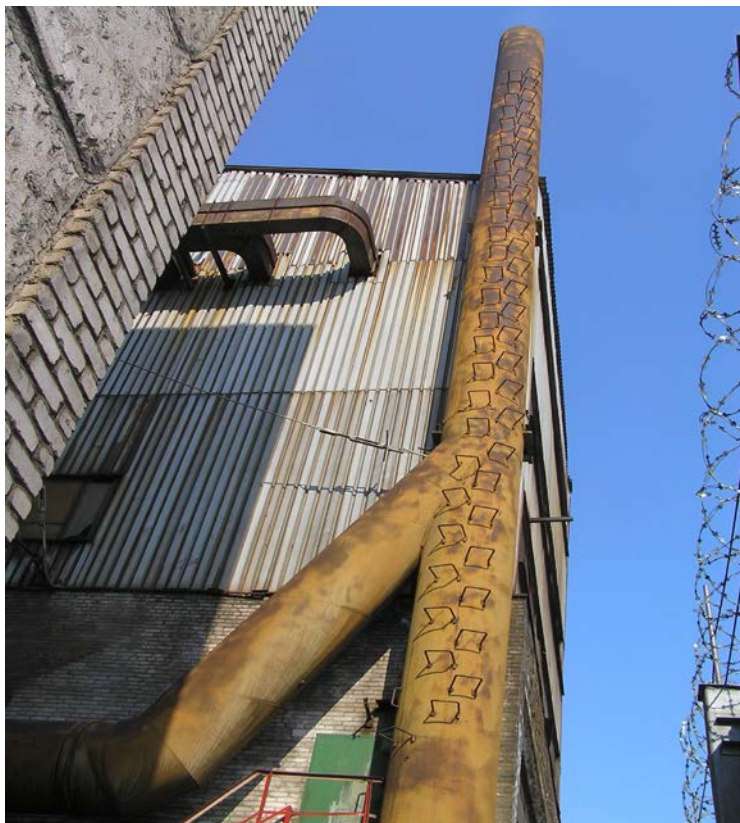


Рисунок Б.12 – Металева димова труба висотою 30.00 м печі обпалу стружки копрового цеху

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження труб:

- захисне лакофарбове покриття труби зруйноване на 50% поверхні труби;
- корозійний знос стовбура димової труби – до 5%;
- каверни у стикових зварних швах, мікротріщини у швах з'єднання елементів труби.

Б.13. Металева вежа висотою 35.00 м і димова труба висотою 39.00 м корпусу 876 ВАТ «Азот», м. Кемерово.

Металева вежа висотою $H = 35.00$ м і димова труба висотою 39.00 м корпусу 876 ВАТ «Азот», м. Кемерово побудовані у 1987 р. (рис. Б.13).

Споруда складається з димової труби і підтримувальної вежі. Вежа являє собою чотиригранну ґратчасту усічену піраміду до позн. 11.08 м, з позн. 11.08 м до позн. 35.08 м – чотиригранну призму. Відстань між осями поясів в основі вежі – 4.40 м, з позн. 11.08 м – 2.5 м. Пояси по всій висоті вежі виконані з труб $\varnothing 159 \times 6$, розкоси вежі виконані з труб $\varnothing 127 \times 4$, розпірки – з швелерів №16, фасонки вежі – з листів товщиною 8 мм.

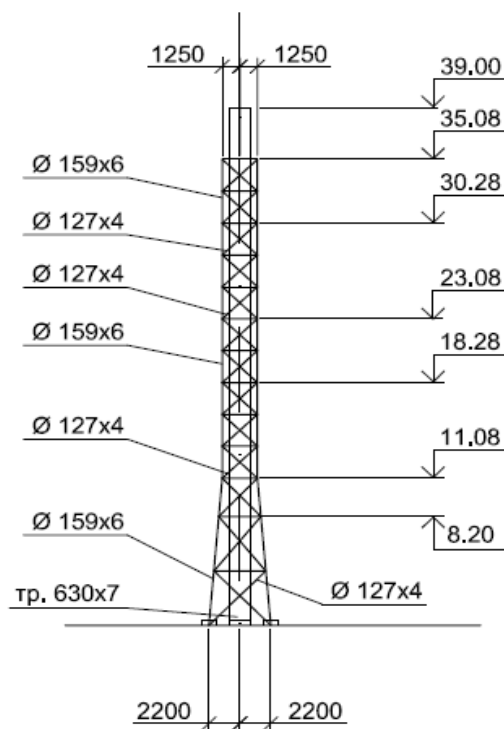


Рисунок Б.13 – Металева вежа висотою 35.00 м і димова труба висотою 39.00 м корпусу 876 ВАТ «Азот», м. Кемерово

Матеріал конструкцій поясів, розпірок і розкосів – сталь марки ВСтЗсп5, елементів діафрагм – ВСтЗпсб. Пояси вежі опираються на окремо встановлені залізобетонні фундаменти-ростверки.

Монтажне з'єднання елементів вежі на болтах і зварюванні, заводські з'єднання на зварюванні. На позн. 11.08 м, 18.28 м, 23.08 м, 35.08 м передбачені робочі майданчики-діафрагми, на які передаються горизонтальні навантаження з факельного стовбура. Горизонтальні вітрові навантаження від факельного стовбура передаються на вежу через спеціальні упори, розташовані на майданчиках. Вертикальне навантаження від ваги стовбура димової труби передається на робочий майданчик вежі на позн. 8.20 м. Робочий майданчик на позн. 30.28 м передбачений для передавання навантаження від ваги труби під час монтажу і ремонту стовбура труби.

Димова труба виготовлена з труби 630×7, висота труби з позн. 6.20 м до позн. 39.00 м. Димова труба виготовлена зі сталі ВСт3сп5. Відвідні гази – оксиди N_2 не більше 1500 кг/м², NH_3 не більше 150 мн/м³, метанол не більше 130 мг/м³, оксиди вуглецю – не більше 0.05%, формальдегід – не більше 0.05%. Температура відвідних газів +250⁰С/200⁰С. Димова труба призначена для викидання в атмосферу продуктів згоряння турбінного газу в котлі-утилізаторі під час виготовлення формальдегіду.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої вежі і труби:

- захисне лакофарбове покриття на всій поверхні труби зруйноване, на елементах витяжної вежі – на 50 % поверхні;
- корозійний знос стовбура димової труби – до 10%;
- корозійний знос поясів, розкосів і розпірок вежі – до 5%;
- корозійний знос елементів робочих майданчиків – до 20%;
- деякі зварні шви між елементами робочого майданчика зруйновані.

Б.14. Металева димова труба і вежа висотою 78.00 м факельної установки корпусу 650 ВАТ «Азот», м. Кемерово.

Металева димова труба і вежа висотою $H = 78.00$ м факельної установки корп. 650 Кемеровського «Азот» збудована у 1982 р. (рис. Б.14).

Споруда складається з металевої труби факельної установки і підтримувальної металевої вежі. Вертикальні навантаження від факельної установки передаються на фундамент труби, горизонтальні – на конструкції підтримувальної вежі.

Вежа являє собою чотиригранну ґратчасту усічену піраміду. Відстань між осями поясів в основі вежі 11.00 м, у рівні верхнього майданчика вежі на позн. 78.00 м – 3.20 м. Монтажне з'єднання елементів вежі на болтах і зварюванні, заводські з'єднання на зварюванні. Усі з'єднання елементів поясів вежі на зварюванні. На позн. 15.00 м, 28.00 м, 40.00 м, 50.00 м, 58.15 м, 66.30 м, 75.00 м, 78.00 м передбачені робочі майданчики-діафрагми, на які передаються горизонтальні навантаження з факельного стовбура.

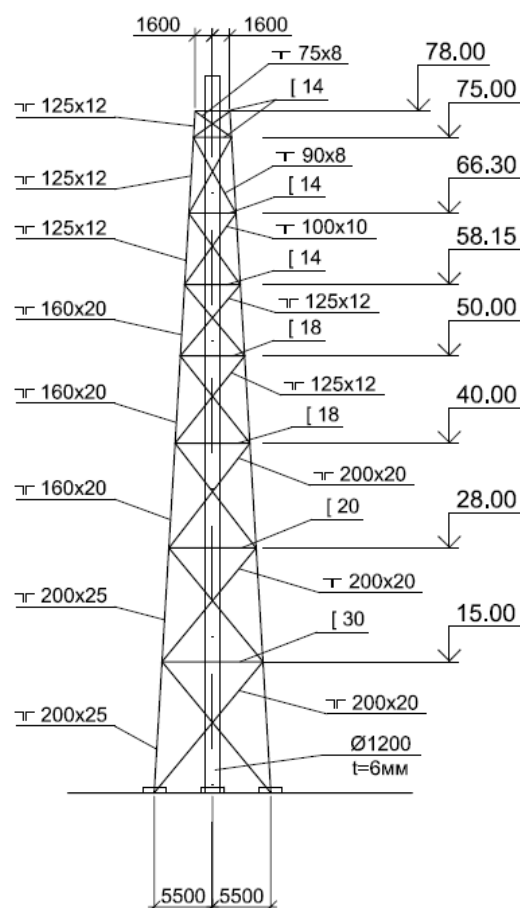


Рисунок Б.14 – Металева димова труба і вежа висотою 78.00 м факельної установки корпусу 650 Кемеровського ВАТ «Азот»

Горизонтальні вітрові навантаження від факельного стовбура передаються на вежу через спеціальні упорні кільця, розташовані на майданчиках.

Конструкція упорних кілець забезпечує можливість температурного розширення витяжного факельного стовбура відносно вежі.

Пояса вежі виконані з парних кутиків 200×12 , 200×20 , 140×10 ; розкоси вежі виконані з парних кутиків 140×10 , 125×8 , 100×10 ; розпірки і балки діафрагм виконані зі швелерів №№ 27, 24, 18, 14. Матеріал поясів, розкосів і розпірок – сталь марки ВСт3пс5, майданчиків і драбин – ВСт3кп2.

Факельний стовбур – вертикальна зварна споруда висотою 80.00 м. Факельний стовбур складається з сепаратора, власне факельного стовбура, лабіринтового затвору, наконечника факела, чергового пальника.

Факельний стовбур внутрішнім діаметром 1200 мм виготовлений зі сталі 09Г2С. Товщина стовбура – 6 мм, матеріал стовбура – низьколегована сталь 09Г2С. Температура середовища в рівні пальника $+440^{\circ}\text{C}$.

Пояси вежі і стовбур факельної установки спираються на окремо встановлені залізобетонні фундаменти.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої факельної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття зруйноване на всій поверхні труби, на елементах витяжної вежі – на 50 % поверхні;
- корозійний знос стовбура факельної димової труби – до 20%;
- корозійний знос поясів, розкосів і розпірок вежі – до 10%;
- корозійний знос елементів робочих майданчиків – до 20%;
- горизонтальні кільцеві упори факельної труби на двох майданчиках демонтовані;
- отвори в настилі робочих майданчиків;
- перильна огорожа на багатьох ділянках зруйнована або вигнута.

Б.15. Металева вентиляційна (вихлопна) труба і несуча вежа висотою 90.00 м корпусу 706 ВАТ «Азот», м. Кемерово[54].

Металева вихлопна труба і несуча вежа висотою 90.00 м уведені в експлуатацію в 1958 р. Металева ґратчаста вежа – вільно встановлена чотиригранна змінного перерізу висотою 90.00 м (рис.Б.15).

Газовідвідний стовбур являє собою металеву циліндричну оболонку з внутрішнім діаметром 1620 мм, товщиною стінки 3 мм. Труба виготовлена з неіржавної сталі ЧС36. Труба по висоті складається з окремих царг, з'єднаних на монтажному зварюванні. З позн. 89.00 м і до обрізу стовбур труби має конусне розширення.

Витяжна труба у процесі експлуатації спирається на окремо встановлену опору і фундамент. Горизонтальні вітрові навантаження від вихлопної труби передаються на майданчики вежі, встановлені на позн. 13.00 м, 22.00 м, 32.00 м, 41.00 м, 49.00 м, 61.00 м, 73.00 м, 83.00 м, 89.00 м. через опорні кільця. Конструкція упорів забезпечує можливість температурного розширення вихлопної труби відносно вежі.

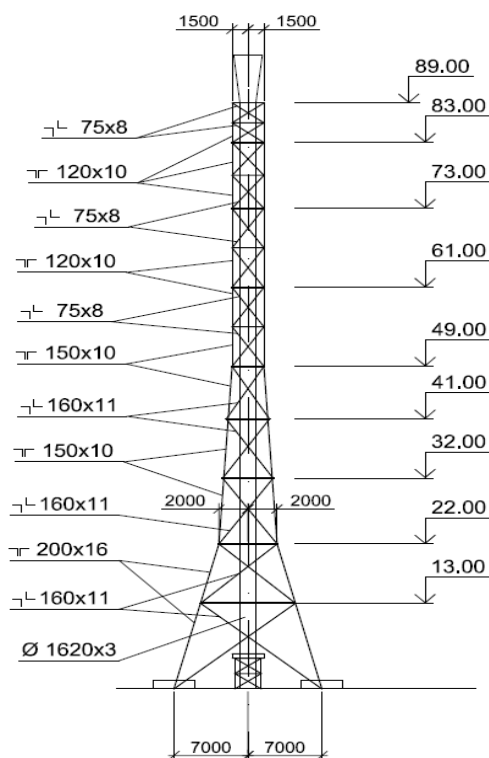


Рисунок Б.15 – Металева вентиляційна труба і вежа висотою 90.00 м

Пояси вежі виконані з двох кутиків (від 200×16 до 90×9), зварених хрестом; розкоси вежі виконані з двох кутиків ($160 \times 11 - 75 \times 8$), зварених хрестом; розпірки вежі виконані з двох кутиків ($100 \times 10 - 75 \times 6$), зварених хрестом; балки робочих майданчиків-діафрагм – зі швелерів (№30 – №16). Елементи вежі виготовлені зі сталі Ст.20. Пояси вежі опираються на окремо встановлені фундаменти.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої факельної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі повністю зруйноване;
- корозійний знос поясів, розкосів і розпірок вежі – до 10%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 50%, настилу – до 100%;
- руйнування зварних швів кріплення драбини до оголів'я труби.

16. Металева факельна труба висотою 30.00 м і несуча вежа висотою 25.80 м корпусу 1028 ВАТ «Азот», м. Кемерово.

Металева факельна труба і несуча вежа корпусу 1028 збудована в 1972 р. (рис. 16).

Металева факельна труба і вежа встановлені на монолітному перекритті підстанції. Висота підстанції – 4.50 м. Вертикальні навантаження від факельного стовбура і вежі передаються на монолітне перекриття підстанції. Горизонтальні вітрові навантаження від факельного стовбура передаються на конструкції підтримувальної вежі. Вежа являє собою тригранну гратчасту конструкцію. Нижня частина вежі висотою 2.80 м являє собою усічену піраміду. Відстань між поясами в основі піраміди – 2.88 м, з позн. 2.80 м пояси вежі паралельні один одному, відстань між осями поясів – 1.01 м. монтажне з'єднання елементів вежі на болтах і зварюванні.

По висоті вежі в чотирьох рівнях передбачені робочі майданчики, на які передаються горизонтальні навантаження з факельного стовбура.

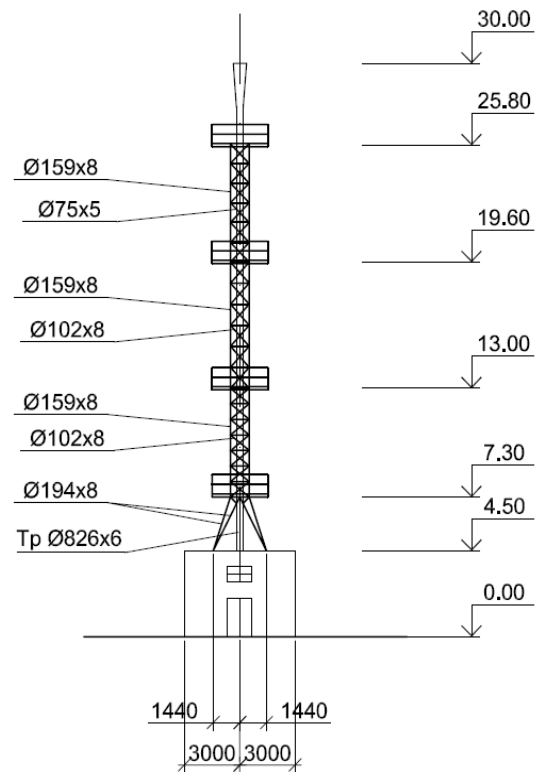


Рисунок 16 – Металева факельна труба і вежа висотою 30.00 м корпусу 1028 Кемеровського ВАТ «Азот»

Конструкція горизонтальних упорів забезпечує можливість температурного розширення факельного стовбура відносно вежі.

Пояси вежі до позн. 2.80 м виконані з труб $\text{Ø}194 \times 8$, вище – з труби $\text{Ø}159 \times 8$. Розкоси вежі виконані з труб $\text{Ø}102 \times 8$ і $\text{Ø}75 \times 5$, розпірки – з труб $\text{Ø}102 \times 8$ і $\text{Ø}75 \times 5$. Вежа виготовлена зі сталі марки ВСт3пс5.

Факельний стовбур являє собою вертикальну зварну споруду з внутрішнім діаметром 820 мм, товщиною 6 мм, позначка верху стовбура +30.00 м. Стовбур виготовлений з низьколегованої сталі 09Г2С, товщина – 6 мм. Температура середовища в рівні пальника +440° С.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої факельної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі повністю зруйноване;
- корозійний знос поясів, розкосів і розпірок вежі – до 20%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 30%;

- вигин поясу вежі, стрілка вигину 50 мм.

Б.17. Металева факельна труба і вежа висотою 78.00 м корпусу 679 ВАТ «Азот», м. Кемерово.

Металева факельна труба і несуча вежа висотою 78.00 м корпусу 679 Кемеровського ВАТ «Азот» збудована в 1974 р. (рис. Б.17).

Вежа являє собою чотиригранну гратчасту усічену піраміду. Відстань між осями поясів в основі вежі 10.00 м, у рівні верхнього майданчика вежі на позн. 78.00 м – 3.00 м. Монтажне з'єднання елементів вежі на болтах і зварюванні, заводські з'єднання на зварюванні. Усі з'єднання елементів поясів вежі на зварюванні через підкладне кільце. На восьми позначках передбачені робочі майданчики-діафрагми, на які через спеціальні упори передаються горизонтальні вітрові навантаження з факельного стовбура. Конструкція упорних кілець забезпечує можливість температурного розширення витяжного факельного стовбура відносно вежі.

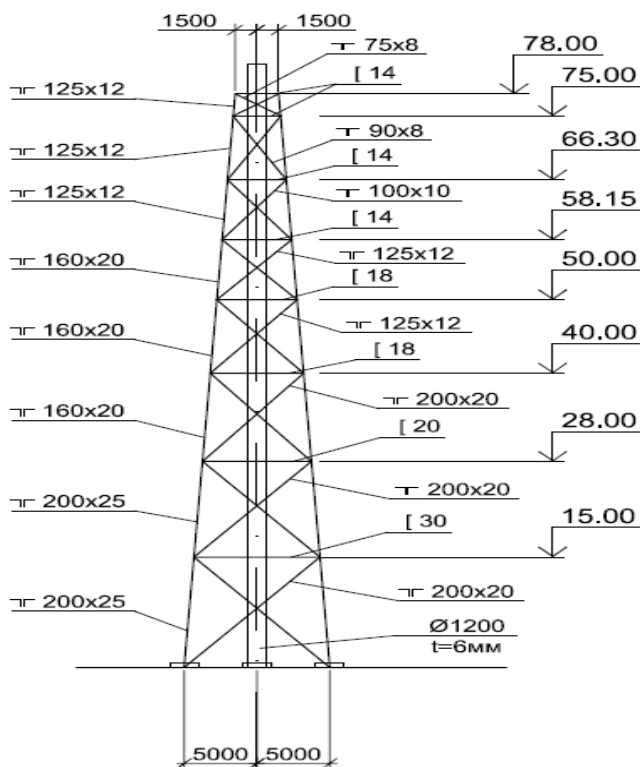


Рисунок Б.17 – Геометричні розміри і перерізи металевої факельної труби і несучої вежі висотою 78.00 м корпусу 679

Пояси вежі, розкоси виконані з парних кутиків, розпірки і балки діафрагм виконані зі швелерів. Геометричні розміри і перерізи показані на рис. Б.17. Матеріал елементів вежі – сталь марки ВСт3пс5. Пояси вежі і стовбур факельної установки спираються на окремо встановлені залізобетонні фундаменти.

Факельна труба (установка) являє собою вертикальну зварну споруду висотою 80.00 м. Факельна установка складається з факельного стовбура, сепаратора, оголів'я, факела, гідрозатвору. Факельний стовбур внутрішнім діаметром 1200 мм, товщина – 6 мм, виготовлений з неіржавної сталі 12Х18Н10Т. Робоча температура $+440^{\circ}\text{C}$, робочий тиск – 2 кг/см^2 . Факельна установка призначена для скидання і подальшого спалення газів при спрацюванні пристрою аварійного скидання, при запуску і зупинці цеху.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої факельної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі зруйноване на 50% поверхні;
- корозійний знос поясів і розкосів вежі – до 5%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 10%;
- горизонтальні упори труби у двох рівнях демонтовані;
- руйнування зварних швів кріплення драбини, ділянки драбини зруйновані;
- отвори в настилі майданчиків механічного характеру.

Б.18. Металева факельна труба висотою 60.00 м і вежа висотою 57.40 м корпусу 2004^а ВАТ «Азот», м. Кемерово

Металева факельна труба висотою 60.00 м і вежа висотою 57.40 м цеху 2004^а Кемеровського ВАТ «Азот» збудована в 1977 р..

Вежа являє собою тригранну гратчасту усічену піраміду до позн. 21.55 м, з позн. 21.55 м до позн. 57.40 м – тригранну призму (рис. Б.18).

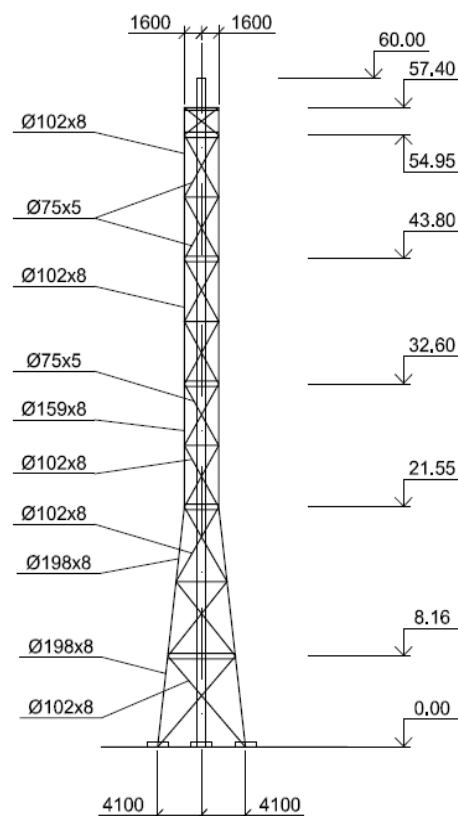


Рисунок Б.18 – Металева факельна труба висотою 60.00 м і вежа висотою 57.40 м цеху 2004^a Кемеровського ВАТ «Азот»

Відстань між осями поясів в основі вежі 8.20 м, з позн. 21.40 м – 3.20 м. Монтажне з'єднання елементів вежі на болтах і зварюванні, заводські з'єднання на зварюванні. По висоті труби в шести рівнях передбачені робочі майданчики-діафрагми, на які передаються горизонтальні навантаження з факельного стовбура через спеціальні упорні кільця. Конструкція упорних кілець забезпечує можливість температурного розширення витяжного факельного стовбура відносно вежі.

Пояси вежі виконані з труб $\varnothing 194 \times 8$, $\varnothing 159 \times 8$ і труб $\varnothing 102 \times 8$, розкоси вежі виконані з труб $\varnothing 102 \times 8$, $\varnothing 75 \times 5$, розпірки – з труб $\varnothing 102 \times 8$ і швелерів №20 і №12. Матеріал конструкцій прийнятий для всіх елементів – сталь марки ВСт3пс6.

Факельна труба являє собою вертикальну зварну споруду висотою 60.00 м. Діаметр факельного стовбура – 616 мм, товщина стінки – 6 мм.

Факельна установка призначена для скидання і подальшого спалення газів при спрацюванні пристрою аварійного скидання, при запуску і зупинці цеху Пояси вежі і стовбур факельної труби спираються на окремо встановлені залізобетонні фундаменти.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої факельної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі повністю;
- корозійний знос поясів, розкосів і розпірок вежі – до 15%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 20%;
- вирізи рифленої сталі в місцях встановлення кільцевих упорів, упори не включені в роботу;
- фасонки розкосів на деяких позначках по висоті вежі втратили стійкість;
- фасонки двох поясів в опорних вузлах на фундамент утратили стійкість;
- відсутні зварні шви кріплення фасонки пояса до фасонки розкосу на позн. 0.80 м.

Б.19. Металева витяжна (вихлопна) труба і несуча вежа висотою 173.00 м цеху ЕФК-4 ВАТ «Міндобрива», м. Воскресенськ, Московської обл.

Вихлопна труба і несуча вежа висотою 173.00 м цеху ЕФК-4 збудовані в 1978 р. Гратчаста несуча вежа – вільно встановлена, чотиригранна спирається на окремо встановлені фундаменти (рис. Б.19).

До позначки 103.00 м вежа являє собою усічену чотиригранну піраміду (з відстанями між осями у рівні фундаментів – 24.00 м), а вище цієї позначки – чотиригранну призму з розмірами між осями поясів – 6.00 м. По висоті вежі на 13 рівнях влаштовані майданчики, на які встановлені вертикальні драбини для підняття на вежу.

Навантаження від витяжної труби передається на вежу через майданчики на позн. 36.40 м, 91.10 м, 123.00 м, 173.00 м.

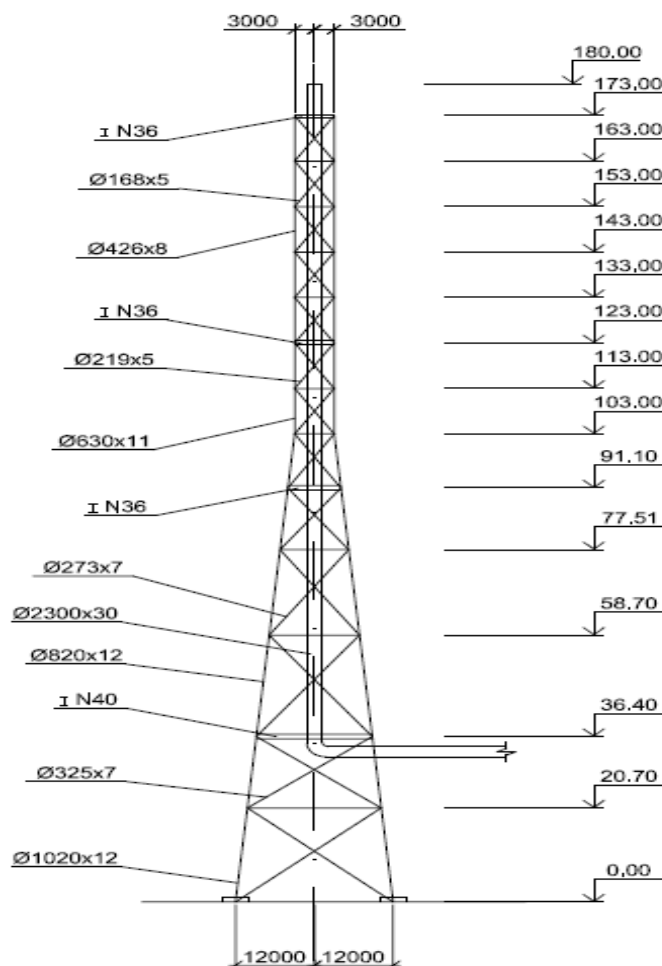


Рисунок Б.19 – Геометричні розміри і перерізи металевої несучої вежі висотою 173.00 м цеху ЕФК-4.

На цих майданчиках розташовані опорні кільця, які передають на діафрагми вежі вертикальне навантаження від газовідвідного стовбура і горизонтальне навантаження від вітрового впливу. На решті майданчиків опорні кільця передають тільки горизонтальне навантаження від вітрового впливу на газовідвідний стовбур.

Пояси вежі виконані з труб – $\text{Ø}1020 \times 12$, $\text{Ø}820 \times 8$, $\text{Ø}630 \times 11$, $\text{Ø}426 \times 8$, розкоси з труб – $\text{Ø}325 \times 7$, $\text{Ø}273 \times 7$, $\text{Ø}219 \times 5$, $\text{Ø}168 \times 5$, розпірки з труб – $\text{Ø}325 \times 7$, $\text{Ø}219 \times 5$, $\text{Ø}168 \times 5$, діафрагми стовбура вежі виконані з двотаврів №60 і №36 і швелерів №24. Пояси вежі, розкоси і розпірки виготовлені зі сталі марки ВСт3пс5. Геометричні розміри і перерізи елементів вежі показані на рис. 19.

Газовідвідний стовбур висотою 157.00 м (позн. оголів'я 180.00 м) і діаметром 2300 мм зібраний з текстофаолітових царг і замкнений у спеціальний сталевий каркас. Сталевий каркас за допомогою вертикальних кутиків і опорних кілець кріпиться до несучих конструкцій вежі. Стовбур опирається на балки робочого майданчика на позн. 27.00 м. Товщина стінки стовбура – 30 мм. Опорні кільця і фасонки каркасу газовідвідного стовбура виготовлені зі сталі ВСт3сп5, кільцеві ребра і тяжі – зі сталі ВСт3пс6.

Вихлопна вежа-труба призначена для викидання в атмосферу газів, що утворюються при виробництві екстракційної фосфорної кислоти, ступінь агресивного впливу на металеві конструкції – середньоагресивний.

При обстеженні були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої витяжної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі зруйноване на 50% поверхні;
- корозійний знос поясів і розкосів вежі – до 5%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 10%;
- корозійний знос верхнього кільцевого елемента каркасу вихлопної труби на позн. 180.00 м до 50% перерізу;
- тріщини в бетоні залізобетонної обійми шириною розкриття до 10 мм одного фундаменту вежі, відколи бетону фундаменту від ударів, оголення арматури.

Б.20. Металева витяжна (вихлопна) труба висотою 180.00 м і несуча вежа висотою 158.00 м цеху сірчаної кислоти ВАТ «Міндобрива», м. Воскресенськ Московської обл. [51].

Металева вихлопна труба висотою 180.00 м і несуча вежа висотою 158.00 м цеху сірчаної кислоти збудована у 1978 р. Вихлопна вежа являє собою ґратчасту трикутну в плані вежу з розташованим у ній газовідвідним стовбуром (рис. Б.20).

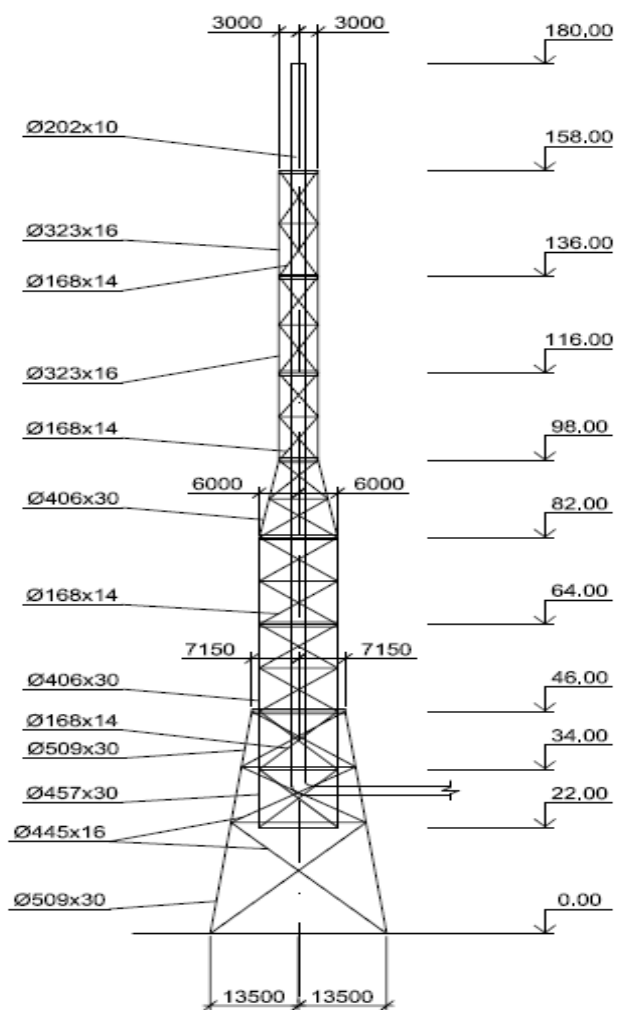


Рисунок Б.20 – Геометричні розміри і перерізи металевої труби висотою 180.00 м і несучої вежі висотою 158.00 м цеху сірчаної кислоти

Вежа сприймає постійні, вітрові і технологічні навантаження від газовідвідної труби, і конструкція передбачає можливість вільних взаємних переміщень газовідвідного стовбура і вежі у вертикальному напрямку при різних їхніх температурних деформаціях.

Гратчаста вежа висотою 158.00 м – тригранна, вільно встановлена, спирається на окремо встановлені фундаменти. Вежа складається із зовнішньої вежі у вигляді усіченої піраміди висотою 46.00 м (відстань між поясами в рівні фундаментів – 27.00 м, на позн. 46.00 м відстань між поясами – 14.30 м), і внутрішньої вежі змінного перерізу (з позн. 22.00 м до позн. 82.00 м відстань між поясами – 12.00 м, з позн. 101.00 м до позн. 158.00 м

відстань між поясами – 6.00 м). Внутрішня і зовнішня вежа стикаються між собою системою балок на позн. 22.00 м і 46.00 м.

Робочі майданчики на вежі розташовані на позн. 22.00 м, 46.00 м, 76.00 м, 116.00 м, 158.00 м. На майданчиках встановлені вертикальні драбини для піднімання на вежу і горизонтальні розпірки, що сприймають вітрові навантаження, що діють на трубу. На позн. 34.00 м, 64.00 м, 98.00 м на вежі встановлені додаткові горизонтальні розпірки, що сприймають вітрові навантаження, які діють на трубу. Пояси зовнішньої вежі виготовлені з труби $\varnothing 509 \times 30$, розкоси – з труби $\varnothing 445 \times 16$. Пояси внутрішньої вежі виготовлені з труб – $\varnothing 457 \times 30$, $\varnothing 406 \times 30$, $\varnothing 325 \times 16$, розкоси з труб – $\varnothing 168 \times 14$. Конструкції вежі виготовлені зі сталі марки ВСт3сп. Перерізи елементів вежі та їх геометричні розміри представлені на рис. Б.20.

Вертикальний газовідвідний стовбур висотою 158.00 м (позн. оголів'я 180.00 м) і діаметром 2.02 м, товщиною 6 мм. Металевий стовбур з внутрішньою полімеризацією. Елементи стовбура зварені стиковими вами. Вертикальне навантаження від газовідвідного стовбура передається на балки робочого майданчика на позн. 46.00 м. 18-метрова верхівка труби виготовлена з низьколегованої сталі Х18Н10Г, а решта ділянок – зі сталі Ст3сп.

Вихлопна труба призначена для викидання в атмосферу газів при виробництві сірчаної кислоти, ступінь агресивності впливу на металеві конструкції – середньоагресивний.

При обстеженні були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої витяжної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі зруйноване на 50% поверхні;
- корозійний знос поясів і розкосів вежі – до 5%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 10%;
- наскрізна корозія стовбура труби, діаметр отвору 100 мм на позн. 179.00 м;

- руйнування вузла кріплення драбини на позн. 164.00 м;
- вигин розпірки від удару на 50 мм на позн. 2.00 м;
- місцева вм'ятина в полиці двотавра балки майданчика на позн. 22.00 м, стрілка вигину 50 мм.

Б.21. Металева витяжна (вихлопна) труба висотою 100.00 м і несуча вежа висотою 92.50 м виробництва азотної кислоти АК-72 ВАТ «Міндобрива», м. Розсош, Воронежської обл. [53].

Металева витяжна (вихлопна) труба висотою 100.00 м і несуча вежа висотою 92.50 м для виробництва азотної кислоти АК-72 збудована в 1978 р. Гратчаста вежа висотою 92.50 м – вільно встановлена чотиригранна вежа змінного перерізу по висоті. Пояси вежі опираються на окремо встановлені фундаменти (рис. Б.21).

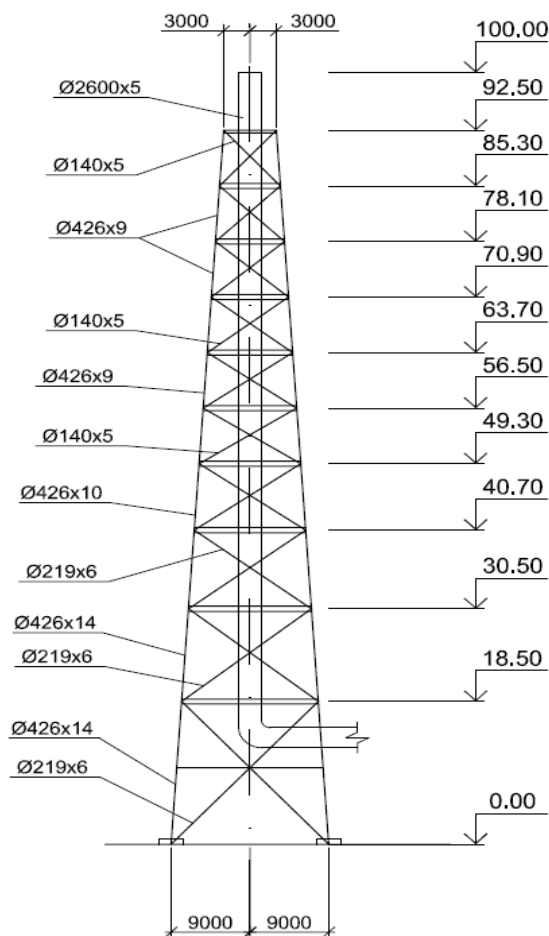


Рисунок Б.21 – Геометричні розміри і перерізи металевої несучої вежі висотою 158.00 м цеху сірчаної кислоти

Відстань між поясами вежі в рівні фундаментів – 18.00 м, на позн. 92.00 м – 6.00 м. По висоті вежі влаштовані діафрагми, що забезпечують геометричну незмінність поперечних перерізів і використовуються як майданчики для обслуговування і переходу. Горизонтальні вітрові навантаження від вихлопної труби передаються на майданчики вежі через кільцеві упори, встановлені на позн. 30.30 м, 40.70 м, 49.30 м, 56.30 м, 63.70 м, 70.90 м, 78.10 м, 83.50 м, 92.50 м. Конструкція упорів забезпечує можливість температурного розширення вихлопної труби відносно вежі. Пояси вежі виготовлені з труб $\varnothing 426 \times 14$, $\varnothing 426 \times 10$, $\varnothing 426 \times 9$, розкоси – з труб $\varnothing 219 \times 6$, $\varnothing 140 \times 5$, розпірки – з труб $\varnothing 273 \times 7$, $\varnothing 219 \times 6$, $140\varnothing \times 5$. Геометричні розміри і перерізи елементів вежі представлені на рис. Б.21.

Елементи конструкції вежі виготовлені: пояси, розкоси і розпірки – зі сталі марки Ст.20; елементи кутових фасонки і опорних кілець газовідвідного стовбура, майданчиків-діафрагм – ВСт3пс.

Газовідвідний стовбур являє собою тонкостінну циліндричну оболонку з внутрішнім діаметром 2600 мм, товщиною стінки 5 мм. Оболонка складається з окремих царг, з'єднаних на монтажному зварюванні. Витяжна труба у процесі експлуатації спирається через опорне кільце на балки робочого майданчика вежі на позн. 18.50 м. Газовідвідний стовбур виготовлений зі сталі 03Х13АГ19. Труба призначена для видалення продуктів згоряння і побічних продуктів при виготовленні азотної кислоти.

При обстеженні були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої витяжної труби і несучої вежі:

- захисне лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі зруйноване на 50% поверхні;
- корозійний знос поясів вежі – до 10%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 10%;
- утрата стійкості стовбура труби на позн. 42.00 м з утворенням гофр на ділянці довжиною 2.00 м;

- непровари у швах при варення накладок у місцях стиків поясів на позн. 82.00 м і 76.00 м;
- непровари в монтажному шві стику труб поясу на позн. 32.00 м;
- наскрізна точкова виразкова корозія розкосів діаметром 2-3 мм на позн. 83.00 м;
- корозійний знос циліндричної обичайки опирача навколо поясу до 10%;
- руйнування бетону фундаментів на глибину до 100 мм, оголення і корозія арматури і хомутів до 10%.

Б.22. Металева труба висотою 120.00 м і несуча вежа висотою 108.00 м цеху 53 установки ЕП-300 НХЗ ВАТ «Сибурнефтехим», м. Кстово, Нижньогородської обл. [52].

Металева факельна труба висотою $H = 120.00$ м і несуча вежа 108.00 м цеху 55 установки ЕП-300 збудована в 1979 р. Гратчаста вежа прийнята вільно встановленою тригранною змінного перерізу. З позн. 0.00 м і до позн. 62.10 м вежа являє собою тригранну гратчасту усічену піраміду, яка переходить у тригранну гратчасту призму. Відстань між осями поясів у рівні фундаментів вежі 20.00 м, у рівні перелому вежі на позн. 62.10 м – 7.00 м.

Пояси вежі виконані з труб – $\varnothing 426 \times 12$, $\varnothing 426 \times 10$, $\varnothing 325 \times 8$, $\varnothing 273 \times 8$, розкоси – з 219×5 , розпірки – з труб 219×5 . Геометричні розміри і перерізи елементів вежі представлені на рис. Б.22.

Пояси, розкоси і розпірки вежі виготовлені зі сталі ВСт3пс5, решта конструкцій – зі сталі ВСт3кп. Монтажне з'єднання елементів вежі на болтах і зварюванні. Усі з'єднання елементів поясів вежі на зварюванні через підкладне кільце. По висоті вежі у дев'яти рівнях (позн. 18.50 м, 30.20 м, 47.40 м, 62.10 м, 72.30 м, 82.50 м, 92.70 м, 102.90 м, 108.00 м) передбачені робочі майданчики-діафрагми, на які передаються горизонтальні навантаження з факельного стовбура.

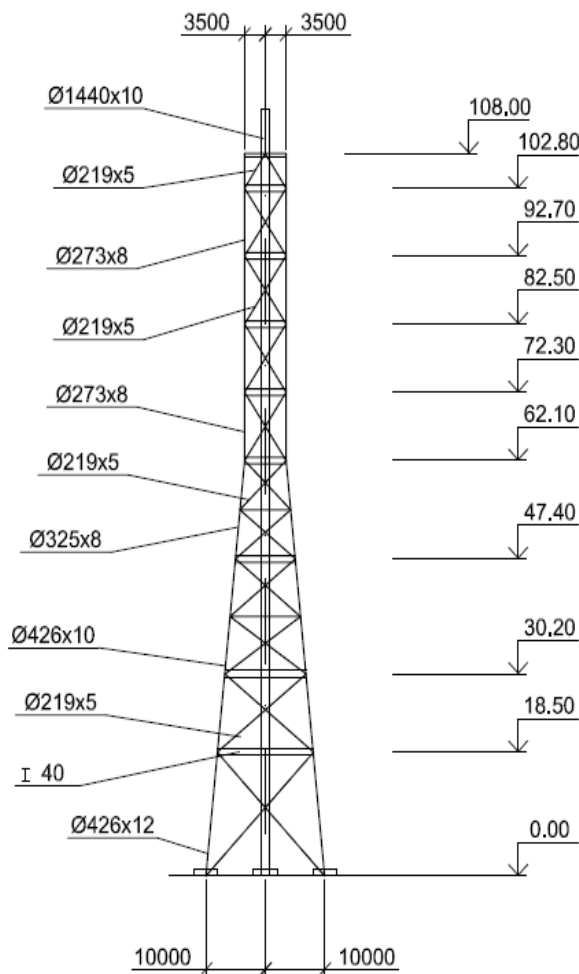


Рисунок Б.22 – Геометричні розміри і перерізи металеві несучої вежі висотою 108.00 м цеху 53

Конструкція упорів забезпечує можливість температурного розширення витяжного факельного стовбура відносно вежі. На майданчику на позн. 102.90 м передбачені балки для опори факельного стовбура на вежу на час монтажу. Пояси вежі спираються на окремо встановлені фундаменти.

Факельна труба використовується для спалювання і викидання в атмосферу вуглеводневих газів. Спалення газів відбувається на верхньому обрізі стовбура труби на позн. 120.00 м. Температура відвідних газів 200°C , тиск 0.005 Мпа. Витяжна факельна труба являє собою тонкостінну циліндричну оболонку із внутрішнім діаметром 1420 мм, товщиною стінки 10 мм, з кільцевими ребрами жорсткості. Витяжна факельна труба опирається на власний окремо встановлений фундамент. Монтажні стики

висяжного стовбура запроектовані на зварюванні впритул. У період ремонту, коли труба перебуває в холодному стані, вихлопна труба може спиратися на майданчик на позн. 102.90 м. Газовідвідний факельний стовбур виготовлений зі сталі Х13.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої факельної труби і несучої вежі:

- до позн. 62.00 м захисне лакофарбове покриття на елементах висяжної вежі зруйноване на 50% поверхні, з позн. 62.00 м – повне руйнування захисного лакофарбового покриття;
- корозійний знос поясів і розкосів вежі – до 10%;
- корозійний знос балок робочих майданчиків – до 10%;
- значні температурні деформації факельного стовбура у рівні оголів'я на ділянці довжиною 1.50 м;
- факельна труба спирається на верхній робочий майданчик вежі;
- вигин розпірки від удару на 2000 мм у рівні нижнього майданчика;
- перильні огорожі майданчиків на багатьох ділянках вигнуті, руйнування швів кріплення драбин і огорожі.

Б.23. Металева димова труба висотою 27.00 м і несуча вежа висотою 25.00 м цеху скловарних печей ТСЦ-3 ВАТ «Тагмет», м. Таганрог, Ростовської обл.

Металева димова труба висотою 27.00 м і несуча вежа висотою 25.00 м скловарних печей ТСЦ-3 збудована у 2002 р.

Внутрішній діаметр металевої димової труби – 708 мм, товщина стінки стовбура труби – 6 мм. Матеріал стовбура труби – сталь ВСт3пс. Стовбур труби на позн. 7.90 м спирається на балки майданчика металевої вежі. Металева труба розкріплена з площини ковзними упорами на робочих майданчиках вежі на позн. 15.90 м и 24.90 м, які передають на вежу з труби тільки вітрові навантаження. Скловарні печі працюють на природному газі, максимальна температура відвідних газів $+145^{\circ}\text{C}$, мінімальна $+110^{\circ}\text{C}$. Ступінь агресивного впливу – середньоагресивний.

Металева вежа навколо труби – чотиригранна, висотою 25.00 м. Несуча вежа – з паралельними поясами, відстань між поясами – 3.50 м (рис. Б.23).

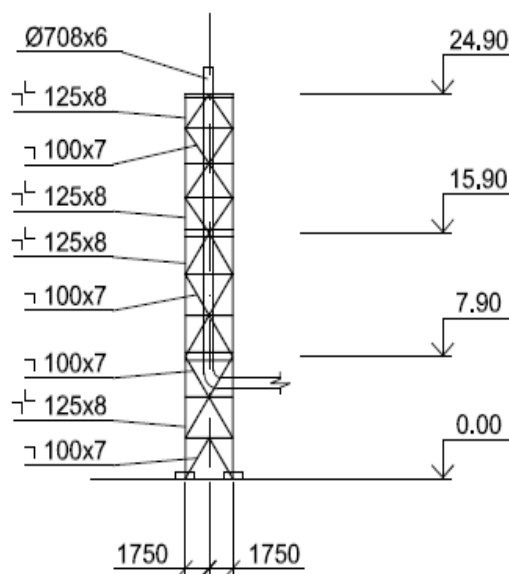


Рисунок Б.23 – Металева димова труба висотою 27.00 м і несуча вежа висотою 25.00 м скловарних печей ТСЦ-3.

Пояси металевої вежі виготовлені з парних кутиків (хрестом) 125×8, решітка між поясами ромбічна з одиночних кутиків 100×7. Решітка з'єднана з поясами вежі через фасонки з листа товщиною 10 мм. Балки розпірок вежі (які є також елементами робочих майданчиків) виготовлені зі швелерів №14. На позн. 4.00 м, 7.90 м, 11.90 м, 15.90 м, 19.90 м і 24.90 м на вежі влаштовані робочі майданчики. Металоконструкції вежі і труби виготовлені зі сталі ВСт3пс.

Пояси вежі опираються на монолітну залізобетонну фундаментну плиту. Глибина закладення підшви фундаменту – 3.50 м.

Металева димова труба висотою 27.00 м кришталевої ділянки ТСЦ-3 призначена для відведення газів, що утворюються при роботі трьох скловарних печей і блоку обпалювальних печей №2.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої димової труби і несучої вежі:

- лакофарбове покриття на елементах витяжної вежі зруйноване на 30% поверхні;
- горизонтальні упори на позн. 15.90 м і 24.90 м встановлені з відхиленням від проекту і не розкріплюють трубу з площини.

Б.24. Металева вежа висотою 32.50 м цеху на даху будівлі Держпром у м. Харкові [181, 184].

Металева вежа висотою 32.50 м, розташована на даху будівлі Держпром, м. Харків, збудована у 1955 р. (рис. Б.24). Металева вежа встановлена на металеву опорну раму, розташовану на даху будівлі Держпром на позн. 58.00 м. Металева рама спирається на чотири залізобетонні опори, пов'язані з монолітними залізобетонними колонами каркасу будівлі.

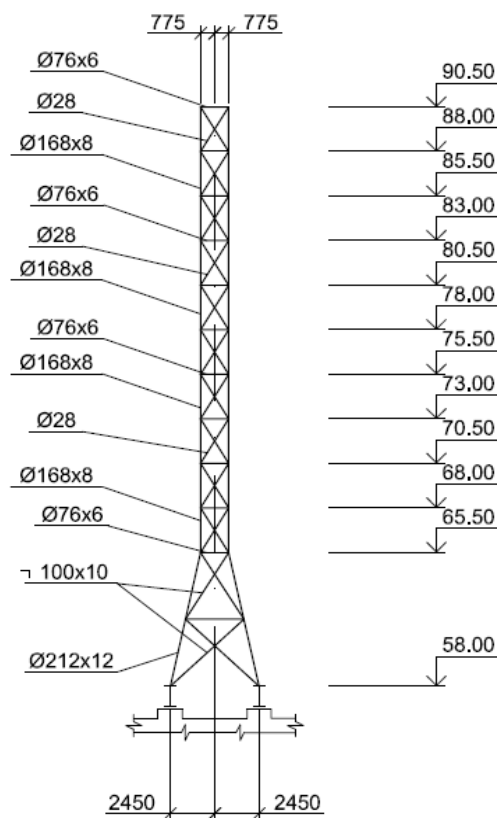


Рисунок Б.24 – Металева вежа висотою 32.50 м на даху будівлі Держпром у м. Харкові

Металева вежа являє собою чотиригранну ґратчасту усічену піраміду з позн. 58.00 м і до позн. 65.50 м з розмірами в основі 5.80×5.80 м,

і з позн.65.50 м і до позн.90.50 м – чотиригранну призму з розмірами між поясами 1.75×1.75 м. Вежа змонтована з 11 просторових секцій – однієї усіченої піраміди і 10-ти чотиригранних призм. Між собою секції сполучені за допомогою фланцевих з'єднань. У кожному фланцевому з'єднанні встановлено 8 болтів М30. В опорному вузлі кожний пояс вежі через фланцеве з'єднання закріплений з металевою рамою 12-ма болтами М16.

Пояси пірамідальної частини вежі виготовлені з металевої труби $\varnothing 219 \times 10$ мм, решітка – з кутиків 100×10 . Пояси призматичної частини виготовлені з труби $\varnothing 168 \times 8$ мм, решітка – з круглої арматури $\varnothing 28$ мм, розпірки – з труби $\varnothing 76 \times 6$ мм. З позн. 88.00 м і до позн. 106.70 м змонтований центральний шпиль, який спирається на балку з двох металевих швелерів №16^а. Шпиль виготовлений з металевої труби $\varnothing 219 \times 10$ мм (з позн. 88.00 м до позн. 102.50 м), і з металевої труби $\varnothing 168 \times 8$ мм (з позн. 102.50 м до позн. 106.70 м). У рівні майданчиків на позн. 88.00 м і на позн. 90.50 м шпиль розкріплений чотирма металевими розпірками.

Металева вежа спирається на дві металеві балки, що входять у раму, зі спарених двотаврів №45^а. Відстань між осями балок – 5800 мм, довжина балок – 13750 мм. Між собою балки розкріплені 6-ма розпірками з двотаврів №30^а (відстань між розпірками 2525 мм і 2900 мм), розв'язані решіткою з кутиків 100×10 мм і являють собою жорстку раму. Між опорами вежі металеві балки бетоновані.

Опорами під металеву раму слугують залізобетонні стійки, зв'язані з залізобетонними колонами каркасу будівлі. Відстань між опорами – 10850×5800 мм. Із залізобетонних стійок випущені спарені металеві швелери №12, сполучені з металевою рамою. У місцях кріплення металевої опорної рами на залізобетонні опори передаються стискаючі зусилля, відрив і горизонтальне навантаження. Для сприйняття відривних зусиль на кожній опорі слугують анкери з двох швелерів №12.

Нині у металеву вежу встановлені антени стільникового і радіозв'язку.

При обстеженні були виявлені такі основні дефекти металевої несучої вежі:

- руйнування захисного лакофарбового покриття на 50-70% поверхні металоконструкції опорної рами, поясів, розкосів і розпірок вежі;
- отвір у стінці двотаврової балки робочого майданчика на позн. 88.00 м діаметром 70.00 мм;
- наскрізна корозія рифлених листів настилу майданчиків на позн. 88.00 м;
- руйнування бетону бетонування головних металевих балок рами, оголення і корозія хомутів від 50% до 100% .

Б.25. Металева радіовежа висотою 87.00 м цеху в м. Сєвєродонецьк Луганської обл.

Металева радіовежа висотою 87.00 м, розташована в м. Сєвєродонецьк Луганської області, збудована у 1966 р. за проектом Дніпропетровського філіалу інституту «Проектстальконструкція» (рис. Б.25).



Рисунок Б.25 – Металева вежа висотою 87.00 м у м. Сєвєродонецьк Луганської області

Металева радіовежа має загальну висоту 87.00 м і складається із власне вежі висотою $H = 75.00$ м і металевої щогли довжиною 12.00 м.

Гратчаста металева вежа – вільно встановлена змінного по висоті обрису. З позн. 0.00 м до позн. 57.00 м – усічена чотиригранна піраміда, з позн. 57.00 до позн. 75.00 м – чотиригранна призма. Відстань між поясами вежі на позн. 0.00 м – 10.00 м, на позн. 57.00 м і вище – 1.50 м. Металева вежа змонтована з 8-ми секцій за допомогою болтів діаметром 22 мм і подальшим зварюванням монтажними швами.

По висоті вежі на позн. 9.00 м, 16.50 м, 25.50 м, 33.25 м, 39.25 м, 48.50 м, 57.00 м, 63.82 м, 85.00 м встановлені діафрагми жорсткості, які забезпечують геометричну незмінність поперечних перерізів і використовуються як перехідні майданчики і майданчики для обслуговування. Для піднімання на вежу між майданчиками встановлені металеві драбини з захисними огорожами.

Пояси і розкоси вежі з позн. 0.00 м до позн. 27.00 м виготовлені з двох кутиків 125×12 , розташованих хрестом, з позн. 27.00 м до позн. 67.00 – з двох кутиків 80×8 , пояси вище позн. 67.00 м – з кутика 80×8 , розпірки – з кутиків 70×6 .

Розпірки вежі в рівні діафрагми на позн. 16.50 м виготовлені зі швелера №16 з кутиком 80×8 , вище – зі швелера №12 і кутика 70×6 , у рівні обрізу вежі на позн. 75.00 м – зі швелерів №14.

Пояси вежі спираються на окремо встановлені монолітні залізобетонні фундаменти розміром у плані 1200×1200 м. Монолітні залізобетонні фундаменти армовані робочою арматурою діаметром 20 мм класу АІІІ, кроком 200 мм. Фундаменти виготовлені з бетону марки М200.

Опорний лист поясів бази вежі є товщиною 40 мм, ребер жорсткості – товщиною 20 мм, фасонки поясів – 16 мм. Розміри у плані опорного листа – 800×800 мм. База кожного поясу вежі з'єднана з монолітним залізобетонним фундаментом 4-ма анкерними болтами діаметром 56 мм.

Пояси, розпірки і розкоси вежі виготовлені зі сталі ВСт3пс, драбини і огорожі – зі сталі ВСт3кп.

На майданчику на позн. 63.82 м встановлено технологічне устаткування, яке нині не працює. На момент обстеження на вежі на багатьох рівнях встановлені антени FM-радіо і стільникового зв'язку.

Під час обстеження були виявлені такі основні дефекти і пошкодження металевої несучої вежі:

- руйнування захисного лакофарбового покриття на 70% поверхні металоконструкцій поясів, розкосів і розпірок вежі, корозійний знос елементів – до 5%;

- руйнування захисного лакофарбового покриття на 50% поверхні металоконструкцій баз поясів, корозійний знос елементів – до 5%;

- деформації кутиків у місцях з'єднання поясів від розпирального впливу продуктів корозії вежі на позн. 57.00 м;

- руйнування захисного лакофарбового покриття на 70% поверхні балок майданчиків, настилу, драбин, і огорож по всій висоті вежі, корозійний знос до 39.25 м – 5%, з позн. 39.25 м – до 10%;

- зварні шви кріплення настилу до балок майданчиків на позн. 33.25 м зруйновані;

- руйнування захисного шару бетону залізобетонних фундаментів під кожним поясом, оголення і корозія арматури до 5%, руйнування цементного відливу на горизонтальних поверхнях фундаментів.

ДОДАТОК В
АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ПРОЕКТНИЙ ТА НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ

**«ХАРКІВСЬКИЙ
ПРОМБУДНДІПРОЕКТ»**

вул. Маломаясницька, 2, м. Харків, 61010, Україна
Телефон/факс (057) 7-519-519
E-mail: psp-nauka@yandex.ru
Рахунок 26008036468800
в ПАТ «УкрСиббанк» м. Харків
МФО 351005
Код ЄДРПОУ 33412963
Сертифікат ISO 9001:2008 №UA227797 от 13.02.15

ЧАСТНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ПРОЕКТНЫЙ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

**«ХАРЬКОВСКИЙ
ПРОМСТРОЙНИИПРОЕКТ»**

ул. Маломаясницкая, 2, г. Харьков, 61010, Украина
Телефон/факс (057) 7-519-519
E-mail: psp-nauka@yandex.ru
Счёт 26008036468800
в ПАО «УкрСиббанк» г. Харьков
МФО 351005
Код ЕГРОУ 33412963
Сертификат ISO 9001:2008 № UA227797 от 13.02.15

№ 152 от 18 квітня 2018 г.
На _____ от _____
№ _____ от _____

Акт впровадження.

Складений в тому, що результати теоретичних і експериментальних дисертаційних досліджень по надійності металевих димових труб і несущих веж після тривалого терміну експлуатації, отримані здобувачем Яровим С.М., були використані при технічному обстеженні, ремонті та підсиленні, продовжені термінів безпечної експлуатації димових труб і несучих веж управління магістральних газопроводів «Черкаситрансгаз», металевої радіовежі на даху будівлі Держпром в м. Харкові, металевої радіовежі в м. Северодонецьк.

Директор



Удовиченко О.С.



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «СТРОИТЕЛЬСТВО»
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ИМЕНИ В. А. КУЧЕРЕНКО

№ 132/18 от 22 апреля 18 г.
на № _____ от «___» _____ 20__ г.

АКТ

о практическом использовании результатов диссертационной работы профессора кафедры «Металлических и деревянных конструкций» ХНУСА (Харьковский национальный университет строительства и архитектуры), кандидата технических наук, г. Харьков, Украина, Ярового Сергея Николаевича на тему: «Надежность металлических дымовых и вентиляционных труб, и их несущих башен» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований по надежности металлических дымовых и вентиляционных труб, полученные соискателем Яровым С.Н., внедрены в рамках работ по экспертизе промышленной безопасности (оценке технического состояния, определении долговечности и остаточного ресурса, продлении безопасного срока эксплуатации) металлических дымовых труб мартеновского, трубопрокатного, энергетического цехов Таганрогского металлургического завода.

Директор ЦНИИСК
им. В.А. Кучеренко
д.т.н., профессор



И.И. Ведяков

СК6417

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»:
109428, Москва, 2-я Институтская ул. 6,
тел.: +7 (499) 170-1548; +7 (495) 602-0070;
факс: +7 (499) 171-2250
inf@cstroy.ru | www.cstroy.ru

ЦНИИСК ИМ. В. А. КУЧЕРЕНКО:
109428, Москва, 2-я Институтская ул. 6,
тел.: +7 (499) 171-2650,
факс: +7 (499) 170-1023, +7 (499) 171-2858;
dtsniisk@rambler.ru, tsniisk@rambler.ru | www.tsniisk.ru

ИНН 5042109739, КПП 504201001,
ОГРН 1095042005255
Юридический адрес: 141367,
Московская область, Сергиево-Посадский р-н,
пос. Загорские Дали, дом 6-11

«Затверджую»



Проректор з науково-педагогічної роботи
Харківського національного університету
будівництва і архітектури (ХНУБА),
д.т.н., професор

Гончаренко Д.Ф.

« 26 » квітня 2018 р.

Акт впровадження.

Складений в тому, що результати теоретичних і експериментальних досліджень, викладених в дисертаційній роботі Ярового С.М. «Надійність металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж» використовуються в учбовому процесі при вивченні спеціального курсу по металевим конструкціям та при виконанні дипломних магістерських робіт.

Завідувач кафедру металевих та

дерев'яних конструкцій, к.т.н., професор

Перетятко Ю.Г.



ТОВ "ПРОМ-БУДКОНСТРУКЦІЯ"

ЄДРПОУ 39693030, 61057, м. Харків, вул. Пушкінська, 11/13, к.30,
п/р № 2600801607831 у ПАТ «КРЕДОБАНК» у м. Харків,
МФО 325365, платник єдиного податку 3 групи без реєстрації ПДВ
тел. (057) 755-12-19
E-mail: prom-bud@mail.ua

№55/17 от 29.11. 2017 г.

Акт впровадження.

Складений в тому, що результати теоретичних і експериментальних дисертаційних досліджень по надійності металевих димових труб і несущих веж, отримані здобувачем Яровим С.М., були використані при технічному обстеженні, ремонті та підсиленні металевих димових труб і несучих веж Харківської «Теплоелектроцентралі -3».

Директор

ТОВ «ПРОМ-БУДКОНСТРУКЦІЯ»



Сергієнко М.О.

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ИНСТИТУТ ГРАДИНВЕСТСТРОЙ»
ул. Клочковская, д. № 191А, офис 109
г. Харьков, Украина, 61145

р/с 26002052312150 в ПАО КБ
«ПриватБанк», г. Харьков
МФО 351533, код ЄГРПОУ 38383419
ИНН 383834120300
Св-во поательщика НДС № 200082046



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ІНСТИТУТ ГРАДІНВЕСТБУД»
вул. Клочківська, б. № 191А, офіс 109
м. Харків, Україна, 61145

р/р 26002052312150 в ПАТ КБ
«ПриватБанк», м. Харків
МФВ 351533, код ЄДРПОУ 38383419
ПІН 383834120300
Св-во платника ПДВ № 200082046

исх. № 369 то « 24 » октября 2017 года

Акт внедрения.

Составлен в том, что результаты теоретических и экспериментальных исследований по надежности и долговечности металлических дымовых труб после длительного срока эксплуатации, полученные соискателем Яровым С.Н. в его диссертационной работе, внедрены при определении технического состояния, определении остаточного ресурса, проведении ремонтных работ и продлении безопасного срока эксплуатации 47 металлических дымовых труб компрессорных станций «Заднепровская», «Кировоградская» и «Южнобугская» магистрального газопровода «Кременчуг – Ананьев – Черновцы – Богородчаны».

Директор
ООО «ИНСТИТУТ ГРАДИНВЕСТСТРОЙ»



С.И. Рябко



НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОНСОРЦИУМ ИЗОТЕРМИК

Член Ассоциации нефтепереработчиков и
нефтехимиков России

Союза нефтегазопромышленников России

Ассоциации «Химнефтегазэксперт»

Ассоциации «РосТеплоСтройМонтаж»

Ассоциации «Металлургэксперт»

СПО «Нефтегазсервис»

117587, Москва, Варшавское шоссе, 125, стр.1, секция 11
www.isotermik.ru www.isotermik.info isotermik@yandex.ru

Тел/факс: +7 (495) 319-59-67; +7 (495) 319-53-67
Тел.: +7 (985) 928-48-27

Исх. № 005/2 от 16.01.2018г.

Акт внедрения

Составлен в том, что результаты теоретических и экспериментальных исследований по надежности и долговечности металлических дымовых и вентиляционных труб, их несущих башен, полученные соискателем Яровым С.Н. в его диссертационной работе, внедрены при определении технического состояния и остаточного ресурса различных высотных сооружений, продлении безопасного срока их эксплуатации на объектах металлургического завода «Электросталь» г. Электросталь, химических комбинатов «Минудобрение» г. Воскресенск и «Азот» г. Кемерово, при разработке стандарта саморегулирующей организации СТО СПО ЭТМП 03-2016 «Методика обследования технического состояния промышленных и дымовых труб».

Генеральный директор,
д.т.н., член-кор. АИН РФ



Х.М. Ханухов