

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

Нужний Валерій Вікторович

УДК 624.9

**РОБОТА І ВИТРИВАЛІСТЬ БАШТОВИХ СТАЛЕВИХ СПОРУД
СУЦІЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ З УТОЧНЕННЯМ ВПЛИВУ ВИХРОВОГО
ЗБУДЖЕННЯ**

05.23.01 Будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Київ 2025

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Робота виконана на кафедрі металевих та дерев'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Білик Сергій Іванович
Київський національний університет
будівництва і архітектури Міністерства освіти і
науки України, завідувач кафедри металевих і
дерев'яних конструкцій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Волкова Вікторія Євгенівна,
Дніпровський державний аграрно-
економічний університет Міністерства освіти і
науки України, завідувачка кафедри цивільної
інженерії, технологій будівництва і захисту
довкілля;

кандидат технічних наук, доцент
Гілодо Олександр Юрійович,
Одеська державна академія будівництва та
архітектури Міністерства освіти і науки
України, завідувач кафедри металевих,
дерев'яних та пластмасових конструкцій

Захист відбудеться «7» травня 2025 р. о 12.00 годині в ауд. 319 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31. Автореферат розісланий «4» квітня 2025 р.

Виконуючий обов'язки вченого
секретаря спеціалізованої вченої
ради Д 26.056.04

доктор технічних наук,



професор

І. І. Солодей

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження: в сучасній інфраструктурі широко застосовуються баштові конструкції у вигляді рекламних пілонів, флагштоків, електроосвітлювальних опор, споруд для розташування телекомунікацій, опор блискавкозахисту тощо. Для всіх подібних споруд властивий динамічний вплив вітру і зокрема явище вихрового збудження, що полягає в розвитку затухаючих коливань у площині, перпендикулярній до напрямку дії вітру. Коливання можуть відбуватися вже при помірних швидкостях вітру із значною кількістю коливальних рухів за умови, що швидкість фронтального вітру вища за критичну. З введенням в дію зміни №2 до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», чинної від 2020-06-01 з'явилися положення у додатку К, що вимагають проводити розрахунок баштових споруд на вихрове збудження. Зокрема норми містять попередження, що необхідно або виконувати розрахунок на втому, або здійснювати конструктивні заходи щодо гасіння проявів вихрового збудження. Таким чином існує актуальна науково-технічна проблема і задачі з розрахунку баштових споруд на вихровий резонанс і витривалість з урахуванням особливостей конструктивних рішень. Переважна більшість баштових споруд, що зараз знаходяться в експлуатації, проектувалася без розрахунків на вихрове збудження і потребують перевірки. Таким чином актуальність роботи полягає в тому, що вплив вихрового збудження на баштові споруди масового використання, потребують додаткових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота виконувалася відповідно до держбюджетної тематики кафедри металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА «Розвиток теорії вибору раціональних ресурсозберігаючих конструкцій сталевих рам з використанням ефективних двотаврових профілів енергоекономічних будівель» (номер держреєстрації: 0121U111715 від 20.06.2021, керівник: д.т.н., проф. Білик С.І.), що виконується на підставі наказу КНУБА №243 від 03.06.2021.

Метою роботи є визначення закономірностей впливу вихрового збудження на напружено-деформований стан елементів споруд, залежно від геометричних параметрів споруд та їх динамічних характеристик. Розробка рекомендації щодо ефективного формоутворення баштових споруд суцільного перерізу та їх конструктивних деталей.

Об'єкт дослідження: баштові сталеві споруди із суцільним перерізом, які працюють в кліматичних умовах України.

Предмет дослідження: робота і напружено-деформований стан конструкцій сталевих баштових споруд від одночасної дії вихрового збудження та фронтального вітру; визначення параметрів розрахунку споруд на витривалість.

Методи досліджень Використані методи: теорії будівельної механіки, опору матеріалів, теорії розрахунку металевих конструкцій на вітрові навантаження на витривалість, аналітичні методики, числові дослідження з використанням методу скінчених елементів.

Основні задачі досліджень:

- Виконати порівняння підходів, розрахункових положень щодо розрахунку баштових споруд на вітрове навантаження з врахуванням динамічної складової згідно нормативних документів, чинних в Україні
- Визначити власні частоти коливань досліджуваних споруд та виконати розрахунки на фронтальний вітер з врахуванням параметрів споруд (жорсткість, висота, маса, змінність перерізів до довжини);
- Виконати розрахунки критичних швидкостей для прояву вихрового збудження в кожній із споруд, а саме при якій швидкості в прив'язці до природно-кліматичних умов м Києва за якою формою і частотою це явище проявляється;
- Розрахувати конструкції на вихрове збудження згідно резонансного методу, представленого у європейських будівельних нормах, виявити зусилля в основі, порівняти його величину у відсотках до зусиль від фронтального вітру залежно від змінних параметрів споруд;
- Виконати розрахунки конструкцій споруд на складний напружений стан з метою виявлення закономірностей впливу вихрового збудження на споруди;
- Виконати оцінку розподілу вітрів за швидкістю і тривалістю дії за архівом погоди метеостанцій на прикладі одного року, встановити параметри для розрахунку баштових сталевих споруд на витривалість з урахуванням кількості циклів.
- Виконати оцінку впливу рівня напружень в конструкціях споруд, які можуть виходити за межу витривалості, для різних елементів та деталей на витривалість конструкцій;
- Виконати аналіз та розробити рекомендації щодо використання ефективних форм поперечного перерізу та конструкцій опорних вузлів споруд для мінімізації впливу вихрового збудження.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Визначені закономірностей виникнення вихрового резонансного збудження в простих консольних сталевих баштових спорудах суцільного не циліндричного перерізу з різною висотою та частотою коливань.
2. Узагальнені підходи щодо оцінки впливу вихрового збудження на споруди залежно від їх висоти, власної частоти.

3. Визначені закономірності та кількісні показники циклічних коливань споруд від дії вихрового збудження для оцінки витривалості.
4. Створена розрахункова модель для розрахунку на витривалість сталевих баштових споруд суцільного перерізу при одночасній дії максимального фронтального вітру із вихровим збудженням.

Достовірність результатів базується на застосуванні апробованого аналітичного резонансного методу розрахунку на вихрове збудження, що впроваджений в Єврокод 1.

Практичне значення одержаних результатів На основі отриманих результатів буде подана пропозиція про внесення уточнюючих положень до національних будівельних норм України ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування»

Результати, отримані автором дисертації, були апробовані при проектуванні рекламних пілонів висотою від 12 до 25 м ПП «МакДональдз Юкрейн ЛТД», а також під час виконання проекту підсилення флагштока висотою 48,5 м в м. Києві.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях:

- «XIV Міжнародна науково-практична конференція «КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ -2024» (23-24 травня 2024 року, м. Чернігів, Національний університет "Чернігівська політехніка")
- «27 міжнародна конференція «Матеріали і технології» (16-18 жовтня 2019р м. Порторож Словенія)

Публікації автора. Результати дисертаційної роботи опубліковані в фахових наукових виданнях України в тому числі індексованих в у міжнародних базах.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури. Загальний обсяг дисертації складається з 145 сторінок, у тому числі 41 рисунків, 36 таблиць, список використаних джерел із 111 назвами на 11 сторінках.

ОСНОВИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, визначені мета і методи досліджень, об'єкти задачі, наведена новизна..

У першому розділі відображена постановка проблеми, наведені поняття про додаткові ефекти від дії вітру, які проявляються паралельно з дією фронтального

вітру для різних типів споруд при їх специфічних геометричних параметрах та жорсткостях. До таких проявів відносяться вихрове збудження, флатер, галопування, прояви смерчів. Так для баштових споруд при співвідношенні сторін від 1 до 2 прямокутного, круглого, трикутного та близьких до них перерізів характерне явище вихрового збудження, що проявляється у вигляді затухаючих автоколивань в площині, перпендикулярній до дії вітру. Положення про необхідність такого розрахунку було введено з імплементацією на теренах України системи Єврокод. В національних нормах вперше поняття, умови та первинні положення щодо розрахунку споруд на вихрове збудження були введені в 2020 р із введенням зміни 2 з додатком К до ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування». Дане явище мало в методологічних підходах для широкого використання в інженерній практиці в Україні, де прийнято розраховувати будівлі і споруди передусім на дію максимального фронтального вітру.

В розділі наведена основна теорія розрахунку на вітер відповідно до існуючих розрахункових моделей із врахуванням динамічної складової. Автором було проведено співставлення розрахунку на вітрове навантаження баштових споруд за Єврокод 1, імplementованим в Україні, ДБН В.1.2-2:2006, діючим з 1.01.2007 р та СНиП, відмінним з введенням ДБН. В усіх випадках пульсаційна складова, що викликає динамічну реакцію споруди при дії випадкового вітрового спектру, розглядається як квазистатичне навантаження. Але встановлено, що в ДБН є невизначеності стосовно динамічного розрахунку баштових споруд, коефіцієнт динамічності для яких перевищує 1.2. За відсутності фактичних методик в інженерній практиці в Україні подібні споруди розраховують в програмних комплексах «SCAD» і «Ліра», де реалізований алгоритм врахування пульсаційної складової згідно відміненого з 2007 р СНиП, що фактично породжує не розв'язану колізію.

В розділі також розглянуті історія досліджень та їх сучасні напрямки щодо закономірностей та умов прояву явищ вихрового збудження в баштових спорудах та його дії. Питаннями емпіричного вивчення вихрового збудження в аеродинамічних трубах і розробки математичного моделювання займалися як в колишньому СРСР (ЦНИИСК, ЦАГИ) в так і на Заході – це праці Давенпорта, Холмса, Скрутона, Пікарді, Соларі, Вікері, Басу, Руммана, Рушевича. В колишньому СРСР були проведені дослідження поведінки циліндричних споруд в потоці повітря, де увага була приділена коливанням споруд від вихрового збудження за другою власною формою коливань. При такому випадку було доведено, що резонансні зусилля від вихрового збудження в спорудах перевищують зусилля від дії фронтального вітру і визначальними при

розрахунках на міцність, у той час як коливанням за першою власною частотою з врахуванням витривалості не було приділено належної уваги.

В цей же час на основі праць університетів м. Генуя та Аахена (праці Пікарді, Соларі, Вікері, Басу, Руммана, Рушевича) був реалізований резонансний метод розрахунку на вітрове вихрове збудження, що представлений в Єврокод 1, який застосовується на практиці при проектуванні будівель і споруд а також при наукових дослідженнях.

Підтверджена актуальність досліджень, сформульовані наукові задачі, які відповідають основним напрямкам наукових досліджень в даній сфері, які проводяться у світі та опубліковані в виданнях, індексованих Scopus та Web of Science.

У другому розділі представлені приклади споруд, в яких виникає вихрове збудження. Автором розроблені конструкції змінної і постійної жорсткості суцільностінчасті баштового типу висотою від 11,355 до 25,575 м. Також представлено результати досліджень флагштоку висотою 48,5м, зведеного в Києві в 1964г. За дослідженнями створена розрахункова схема для встановлення власних форм та частот коливань в програмному комплексі SCAD. Загальний вигляд досліджуваних споруд наведений на рис. 1.

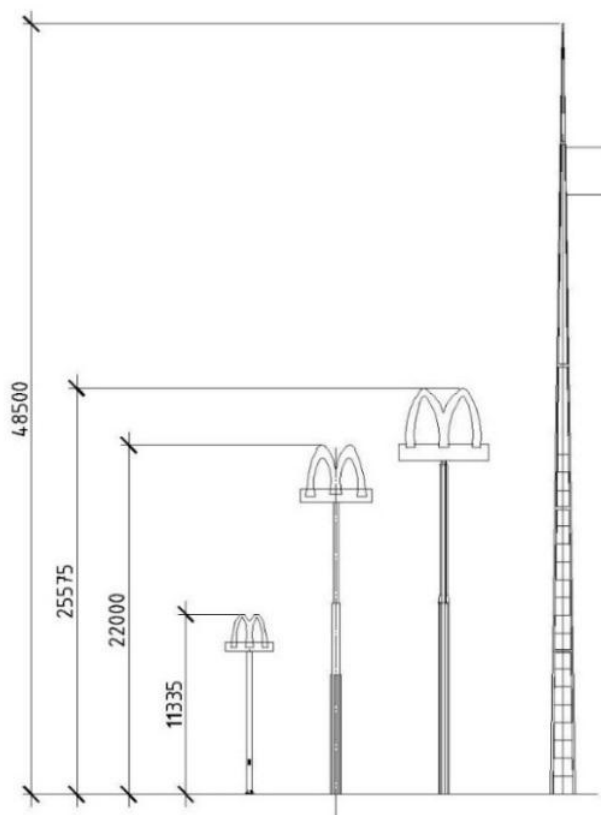


Рис. 1 Досліджувані споруди

До досліджуваних споруд відносяться чотири споруди.

Споруда 1. Пілон одноступеневий, висота 11.355м разом з фірмовим знаком. Поперечний переріз конструкції – труба 326х6. Вага фірмового знаку (зосереджена маса на кінці консолі) – 0.5 Т. Тривалість першого старшого періоду власних коливань: $T_1 = 0,83с$. Схема споруди представлена на рис.2

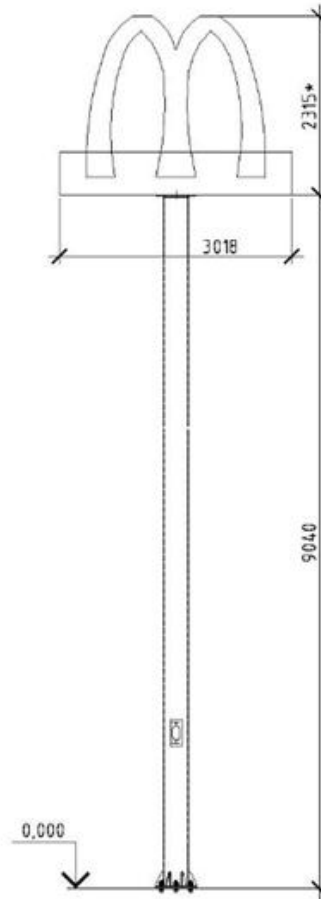


Рис. 2 Споруда 1. Пілон висотою 11.355 м

Споруда 2. Пілон двоступеневий за монтажною схемою, висота 22 м разом з фірмовим знаком. Поперечний переріз змінний, виділяються три ступені за жорсткістю. Нижня ступінь виконана з труби круглої 530х8, підсиленої чотирма швелерами 24, середня - з труби 530х8, верхня – з труби 325х6. Вага фірмового знаку (зосереджена маса на кінці консолі) – 1 Т. Тривалість трьох старших періодів власних коливань: $T_1 = 0,884с$, $T_2 = 0,156с$, $T_3 = 0,0489с$

Схема споруди представлена на рис.3

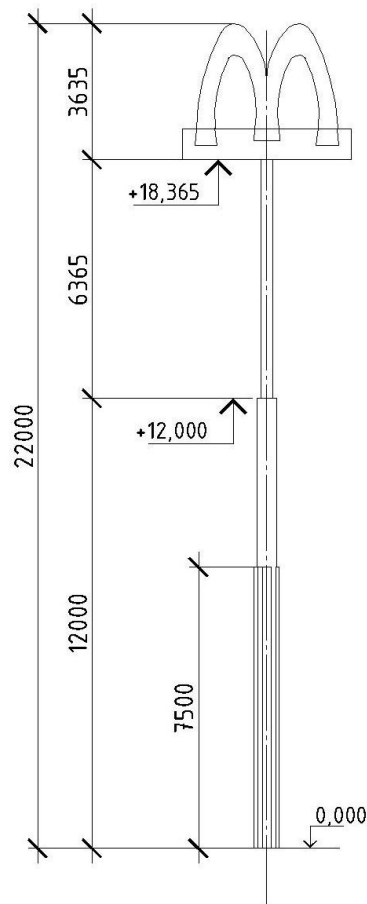


Рис. 3 Споруда 2. Пілон висотою 22 м

Споруда 3. Пілон двоступеневий за монтажною схемою, висота 25,575 м разом з фірмовим знаком. Поперечний переріз змінний, виділяються дві ступені за жорсткістю. Нижня ступінь – труба 530x8, підсилена чотирма швелерами 24, верхня - складена система з прокатних швелерів 30 (основне прямокутне ядро на планках) з підсиленням чотирма швелерами 20. Вага фірмового знаку (зосереджена маса на кінці консолі) – 1 Т. Тривалість трьох старших періодів власних коливань: $T_1 = 1,02551\text{с}$, $T_2 = 0,1853\text{с}$, $T_3 = 0,0602\text{с}$

Схема споруди представлена на рис.4

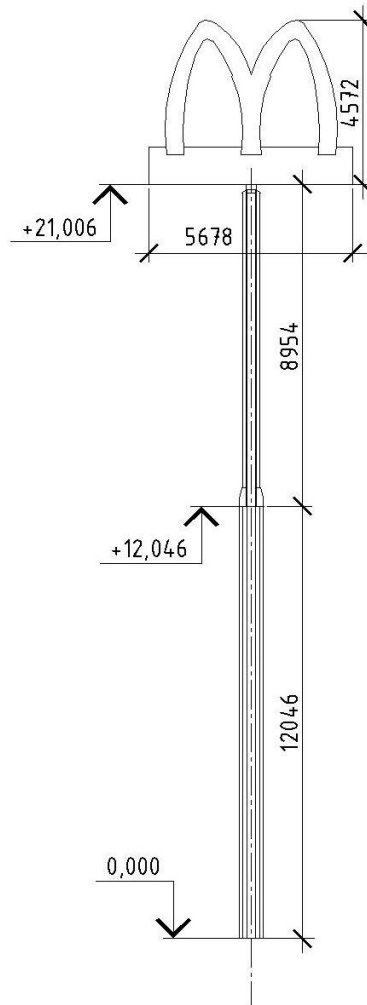


Рис.4 Споруда 3. Пілон висотою 25,575 м

Споруда 4. Флагшток вистою 48.5 м, збудований у 1964р на території Палацу дітей та юнацтва у складі композиції фонтану «Зорі та сузір'я» у Києві. Цей флагшток після 54 років експлуатації у 2018 р був капітально відремонтований. У конструктивному відношенні флагшток виконаний зі складеним перерізом у вигляді трьох складених таврів, розташованих з кроком 120 градусів із змінним по висоті перерізом. Зовнішнє облицювання виконане з алюмінієвих фасадних панелей. Флагшток був порахований у програмному комплексі "SCAD" на дію вітрових навантажень із прапором 6х3 м. Власні частоти коливань, отримані в результаті модального аналізу:

$$T_1 = 1,4710\text{с}$$

$$T_2 = 0,4764\text{с}$$

$$T_3 = 0,2592\text{с}$$

Конструктивна схема флагштоку представлена на рис. 5.

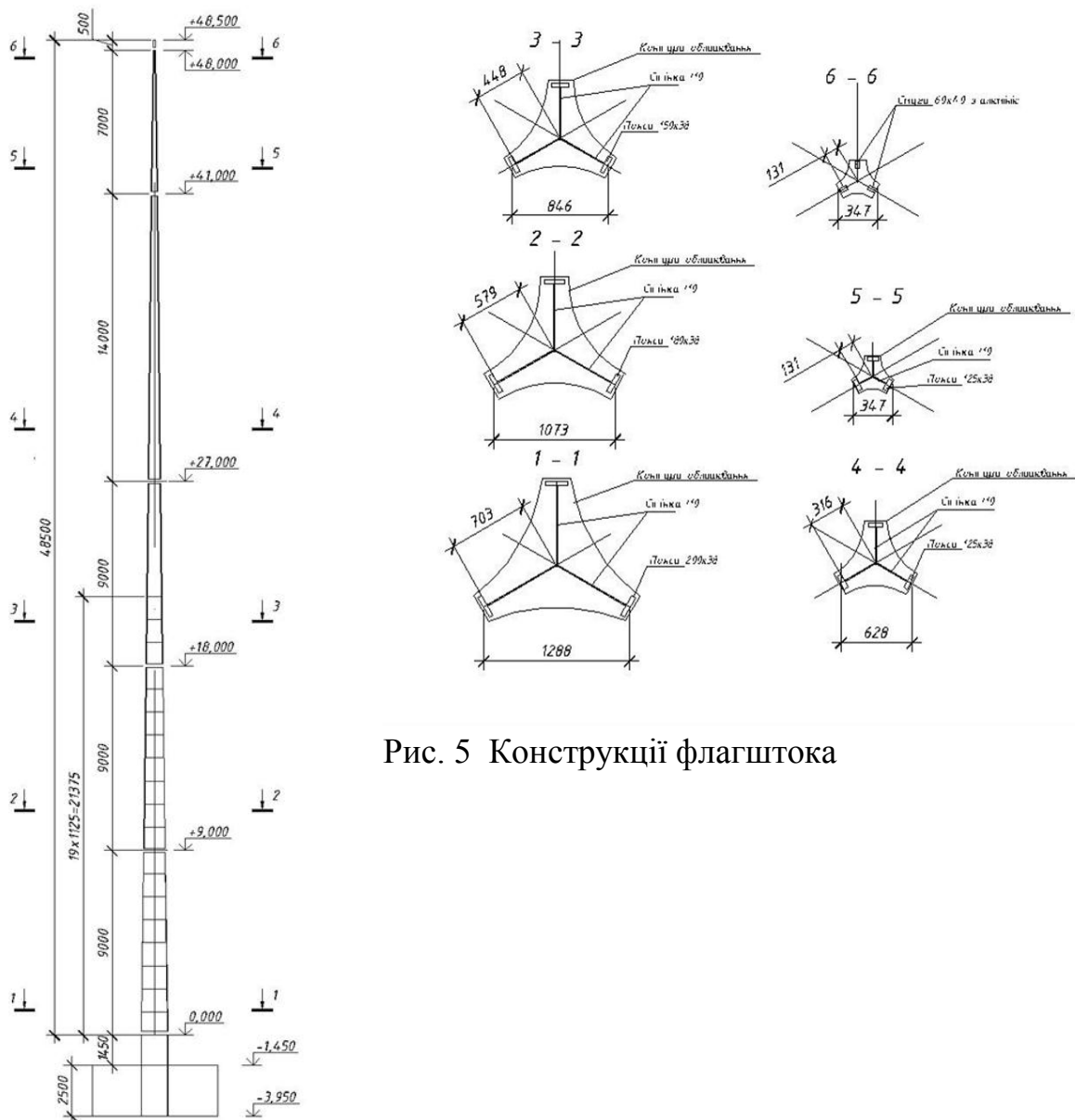


Рис. 5 Конструкції флагштока

В третьому розділі удосконалений методологічний підхід оцінки динамічних властивостей споруд баштового типу з урахуванням власних частот і форм коливань та критичної швидкості вітру. Числові дослідження приведені для кліматичних умов м. Києва та регіону. Результати розрахунку за критичних швидкостей і аналізу форм вихорового збудження для досліджуваних споруд представлені в таблицях 1, 2, 3, 4

Таблиця 1. Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихорового збудження для пілона висотою 11.335м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань, при якій відбувається вихрове збудження
1,2	3,54	1 форма

Таблиця 2. Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для пілона висотою 22.0 м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань, при якій відбувається вихрове збудження
1,13	5,44	1 форма
6,4	30,8	2 форма не відбувається
20,449	98.5	3 форма не відбувається

Таблиця 3. Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для споруди пілона висотою 25.572 м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань, при якій відбувається вихрове збудження
0,9751	5,82	1 форма
5,39	32	2 форма не відбувається
16,61	99.2	3 форма не відбувається

Таблиця 4. Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для споруди флагштока висотою 48,5 м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань, при якій відбувається вихрове збудження
0,679	5,54	1 форма
2,09	17,1	2 форма*
3,71	30,5	3 форма не відбувається

*може виникнути вихрове збудження в рідкісних випадках, оскільки швидкість вітру 17.1м/с

Як показали розрахунки, всім конструкціям властивий прояв вихрового збудження з першою власною формою коливань, який вже може проявлятися при слабких і помірних вітрах 3,54м/с, 5,44м/с, 5,82 м/с, 5,54м/с. Таким чином встановлено закономірність між критичними швидкостями вітру та частотами та формами коливань споруд. Вперше встановлено, що резонансні явища можуть відбуватися вже при дії помірних вітрів від 3,5 до 6 м/с, час дії яких найбільший за час життєвого циклу споруди.

Проведено вперше дослідження з визначення кількості коливань циклів від вихрового збудження для розрахунків на витривалість. Орієнтовне визначення кількості коливальних циклів від вихрового збудження визначено шляхом аналізу архіву погоди з доступних джерел, які містять архівні дані щодо швидкості і часу дії вітрів з 2011 і до тепер для кожного регіону. Враховуючи специфіку дії вітру на сталеві баштові споруди симетричного перерізу дослідженням напрямку дії вітру можна умовно знехтувати. Для аналізу був обраний 2011 р як перший рік, задокументований в повному обсязі щодо дії вітрових навантажень, та проаналізовані інші роки щодо дії максимальних вітрів.

В архіві вказана усереднена швидкість вітру, що відповідає статичній складовій дії вітру. Аналіз вітрів наведений в таблиці 5.

Таблиця.5 Тривалість і розподіл по часу дії вітрів в 2011р з швидкістю понад 4 м/с

Швидкість вітру, м/с	Тривалість дії на рік, с	Відсоток від загального часу на рік	Частка від максимального навантаження, у перерахунку до максимальної середньої швидкості 25 м/с $\left(\frac{V_i}{V_{max}}\right)^2$
4, 5	8615780	27,32	0,033
6	1802400	5,72	0,058
7	871200	2,76	0,078
8	469800	1,49	0,1
9	286200	0,91	0,13
10	154800	0,49	0,16
11	59400	0,19	0,19
12	30600	0,10	0,23
13	16200	0,05	0,27
14	5400	0,02	0,31
15	3600	0,01	0,36
Всього	20156180	0,64	

За інші роки характеристики дії вітрів були подібні.

На основі даних, приведених в таблиці 5, автором запропонована формула (1) визначення орієнтовної кількості коливальних циклів:

$$N_i = \frac{\sum t}{T_i}, \quad (1)$$

Де N_i – кількість коливальних циклів за i -ою частотою власних коливань, $\sum t$ – сумарний час дії вітрів з швидкістю, що перевищує критичну для i -ої форми, T_i – період коливань за i -ою власною частотою.

За розробленою методикою визначена орієнтовна кількість коливальних циклів на рік для досліджуваних споруд залежно від їх динамічних характеристик з урахуванням змін жорсткості перерізів:

- $14,4 \cdot 10^6$ циклів для споруди пілона висотою 11.335м;
- $4,3 \cdot 10^6$ циклів для споруди пілона висотою 22.0м;
- $3,4 \cdot 10^6$ циклів для споруди пілона 25,572 м;
- $2,6 \cdot 10^6$ циклів для споруди флагштока 48,5 м.

Цей якісний аналіз є достатнім для того, щоб зробити висновок, що кількість коливальних циклів є дуже висока (понад 10^5 згідно ДБН) і тому при проектуванні конструкцій баштового типу з врахуванням витривалості конструкцій необхідно виконувати обмеження напружень до межі витривалості.

В четвертому розділі проведені числові дослідження конструкцій баштового типу на дію фронтального вітру за допомогою програмного комплексу SCAD, де фактично реалізований алгоритм розрахунку за відмінним СНиП, та за Єврокод, а також проведені дослідження впливу вихрового збудження. Розроблена порівняльна методика визначення впливу вихрового збудження на сталеві баштові споруди, яка полягає в порівнюванні зусиль від вихрового збудження в опорному перерізі споруди у відсотках від розрахункових опорних зусиль від дії фронтального вітру. Результати розрахунків внесені до таблиці 6.

Таблиця 6. Результати розрахунків досліджуваних конструкцій на фронтальний вітер та вихрове збудження.

Параметр	Розрахована споруда			
	Пілон 11.355 м	Пілон 22 м	Пілон 25,572м	Флагшток 48 м
Опорний згинальний момент при динамічному розрахунку в розрахунковому комплексі SCAD, кНм	40,9	227,7	402,65	766,9
Опорний згинальний момент при розрахунку за Єврокод, кНм. В дужках з врахуванням часткового коефіцієнту $\gamma_Q = 1,3$	47,4 (61,62)	323,9 (421,1)	483,0 (627,9)	857,7 (1115,0)
Критична швидкість, м/с	3,42	5,44	5,82	5,54
Частота коливань першого старшого періоду, Гц	1,2	1,13	0,975	0,68
Момент в опорі за розрахунком за вихровим збудженням, M_v , кНм	1,404	43,6	75,4	373,25
$\frac{M_v}{M} \cdot 100\%$ в дужках відсоток у порівнюванні до зусиль від фронтального вітру за Єврокодом	3,4(2,9)	19,1(13,4)	18,7(15,6)	48(43,5)

Розрахунок конструкцій на фронтальний вітер з урахуванням динамічного впливу у програмному комплексі SCAD та за Єврокод показали значні розбіжності. Це пояснюється різними розрахунковими моделями визначення вітрового напору по висоті, різними характеристиками та класифікацією типів

місцевості за характером рослинності і забудови а також різними базовими величинами врахування вітрового напору – за нормативним (характеристичним) тиском та максимальною усередненою швидкістю. Також слід зауважити, що Єврокод пропонує в систему розрахункових комбінацій зусиль вводити частковий коефіцієнт $\gamma_Q=1,3$ та коефіцієнти врахування сполучень тимчасових навантажень $\psi_0=0,6$ та $\psi_1=0,2$, у той час як згідно ДБН може використовуватися коефіцієнт 0.9 для сполучення двох і більше тимчасових навантажень. За умови відсутності вказівок та чітких методик врахування коефіцієнтів динамічності в ДБН для даного типу споруд їх фактичного розраховують як за відмінним з 01.01.2007 СНИП так і за імплементаційним в Україні Єврокод, однак із дотриманням умов щодо забезпечення надійності при використанні відповідних коефіцієнтів надійності. Яку систему використовувати, приймає проектувальник згідно власних міркувань під власну відповідальність.

Згідно запропонованої методики встановлена нова закономірність: для найменшої конструкції пілона висотою 11.355, де може відбуватися до 14 .. 15 млн циклів, при досить невеликому характеру зусиль від вихрового збудження (2,5..3,4% від дії фронтального вітру) нема жодної загрози щодо розвитку накопичення пластичних деформацій від втоми. У той час як для вищих споруд, де кількість циклів орієнтовно на рік становить від 2.4 до 3.5 млн та рівень зусиль сягає до 19...48% від дії фронтального вітру, необхідна перевірка на витривалість і запровадження обмежень напружень до межі витривалості.

Уточнено закономірність загального впливу вітру на суцільностінчасті сталеві баштові споруди. Вихрове збудження проявляється при дії вітру, швидкість якого дорівнює або перевищує критичну для даної конструкції, і амплітуда коливань та зусилля не залежать від швидкості вітру, як це відбувається при дії конструкції на фронтальний вітер. Характер одночасної дії фронтального вітру, при якому система відхиляється за вітром і вертається в вихідне положення, обов'язково супроводжується поперечними знакозмінними коливаннями від вихрового збудження. Верхня точка споруди при цьому описує вузький овал. Цій феномен зображено на рис. 6



Рис. 6 Характер коливань споруди при дії фронтального вітру

Внаслідок цього необхідно виконувати розрахунок конструкцій на одночасну дію максимального фронтального вітру та вихрового збудження. Конструкцію необхідно при цьому розраховувати в пружній стадії роботи.

Встановлено, що для круглих, хрестоподібних перерізів внаслідок розвитку напружень у взаємно перпендикулярних напрямках вплив від одночасної дії моментів не настільки значний, оскільки пік одних напружень знаходиться в нейтральних точках для інших напружень від моменту у перпендикулярному напрямку. Для прямокутних перерізів чи трьох таврів, як для флагштока висотою 48 м, вплив більший. Епюри нормальних напружень для опорного перерізу пілона висотою 25,572 м та флагштока висотою 48 м зображені на рис. 7 та 8 відповідно. Для несиметричного відносно двох осей флагштока, розглядається найгірший випадок дії фронтального вітру, як зображено на рис. 8. Для всіх інших випадків дії вітру під іншим кутом так чи інакше фіксується подібна картина з відносно інших граней та з векторним перерозподілом вітрових зусиль.

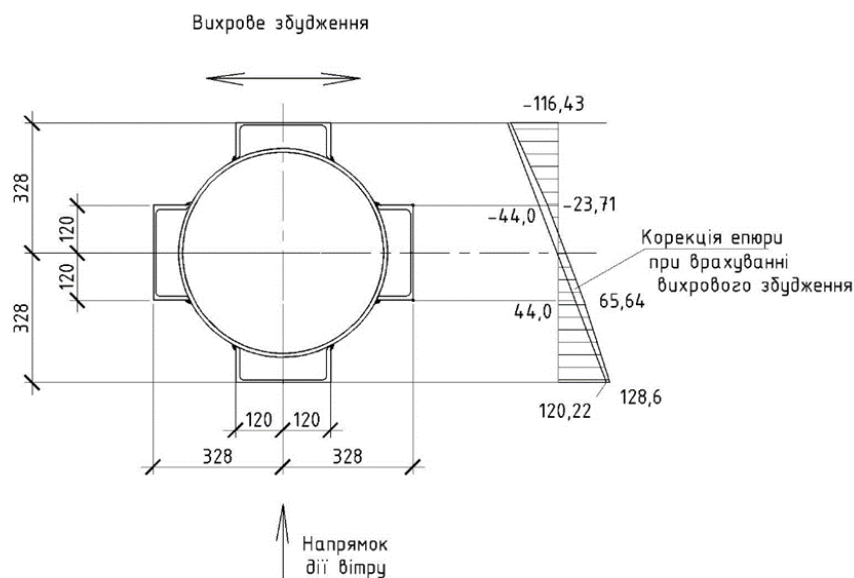


Рис. 7 Нормальні напруження, МПа в опорному перерізі пілона висотою 25,572 м (епюра для правого боку перерізу)

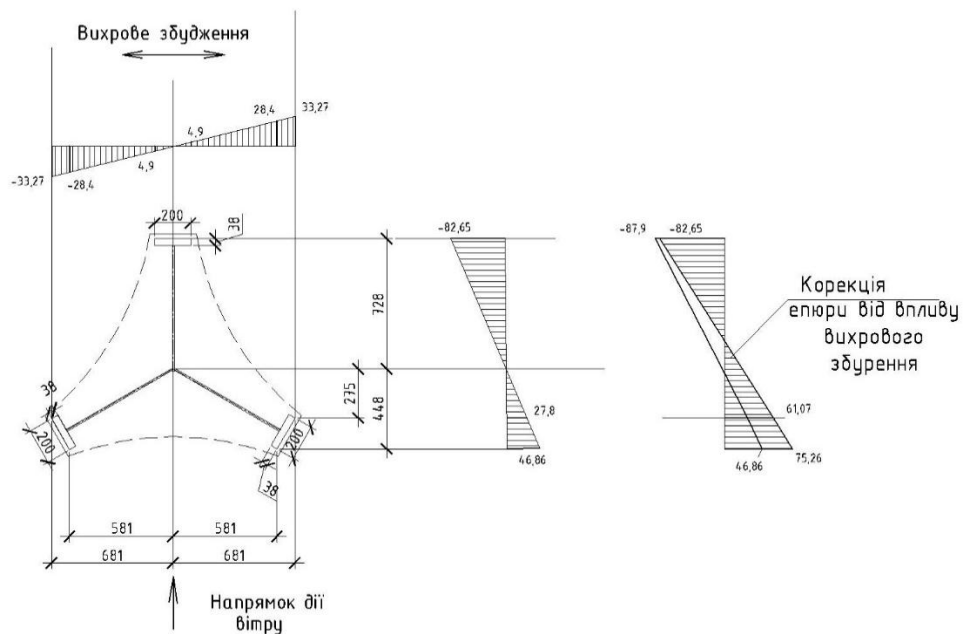


Рис. 8 Нормальні напруження, МПа в опорному перерізі флагштока висотою 48 м (епюра для правого боку перерізу)

Так результати різних перерізів баштових споруд показали, що впливи додаткових напружень від вихрового збудження можуть як компенсуватися в нейтральній зоні перерізу, так і бути суттєвими. Такі дослідження проведені вперше і вказують на необхідність розробки раціональних форм перерізу та вузлів для подібних споруд залежно від їх геометричних параметрів та призначення.

Як показали дослідження конструкцій, рівні напружень в основі можуть бути достатньо не високими внаслідок того, що окрім напружень при конструюванні споруд враховується достатня жорсткість для забезпечення прогинів і переміщень, водночас деталі опорних баз - траверси, зварні шви, анкерні болти як і самі опорні перерізи потребують розрахунків і оцінки на втому. При проектуванні опорних баз, анкерних болтів доцільно використовувати схеми розташування болтів по колу а самі плити баз та підосви фундаментів робити круглої та близької до неї форми.

Як було встановлено, явище вихрового збудження відбувається незалежно від діючої швидкості вітру, яка дорівнює та перевищує критичну. У той час в ДБН В.1.2-2:2006 «Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування» в додатку К наведена формула К.6, якою пропонується при розрахунках споруд на одночасну дію фронтального вітру та вихрового збудження визначати тиск від фронтального вітру як:

$$W_{m,cr,i} = \left[\frac{v_{cr,i}}{v_{max}} \right]^2 W_m \quad (2)$$

В цій формулі фактично пропонується вітровий тиск обмежувати тиском при критичній швидкості від вихрового збудження, що фактично не враховує

випадок одночасної дії максимального фронтального вітру разом з вихровим збудженням. Дане положення потребує коригування..

В п'ятому розділі розглянуте впровадження удосконалених методик розрахунку баштових споруд на витривалість.

Як було відображено в інших розділах дисертації, в баштових спорудах відбувається коливання від вихрового збудження в напрямку, поперечному до дії вітру, із сталою частотою і амплітудою із знакозмінними напруженнями $\pm\sigma$ із коефіцієнтом асиметрії напружень $\rho = -1$. Одночасно з цим виникають напруження від фронтального вітру та динамічної реакції із напруженнями від 0 до σ із коефіцієнтом асиметрії напружень $\rho = 0$. Характер перерозподілу зусиль і напружень багато в чому залежить від форми поперечного перерізу і конструкцій вузлів.

Якщо коливання від дії вихрового збудження можна приймати відносно сталими за амплітудою і значенням напружень, то напруження від фронтальної дії вітру з динамічною реакцією носять випадковий характер, який вказаний для 2011р в таблиці 5. Складність полягає в оцінці істинного розподілу вітрів за швидкістю і тривалістю, тому можуть бути запропоновані два методи оцінки рівня напружень на витривалість.

Перший метод полягає в проведенні ретельних метеоспостережень, визначення істинного розподілу швидкостей і тривалості дії вітрів в часі. Це потребуватиме влаштування вимірювального обладнання для визначення швидкості і напрямку дії вітру в часі із статистичною обробкою отриманих результатів. При застосуванні цього методу істотний вплив матимуть мікрокліматичні умови майданчика, наявність перешкод і т.д. Це вартісні спостереження, які прив'язані до конкретних умов розташування конструкції і не можуть бути екстрапольовані на інші майданчики і місцевості. В такому разі відсікаються всі розрахункові ситуації, коли рівень напружень не перевищує межі витривалості, та здійснюється оцінка тих значень зусиль і напружень, що виходять за межу витривалості і кількість циклів яких значно нижча за 10^6 .

Другий запропонований метод носить спрощений консервативний характер і має більші запаси. Він полягає в тому, що напруження від сумарної дії максимального розрахункового фронтального вітру приймаються як амплітудні циклічні. При цьому вперше запропоновано для крайових значень напружень вздовж напрямку вітру виконувати розрахунок межі витривалості за коефіцієнтом асиметрії напружень $\rho = 0$, у той час як напруження в середній зоні, де діють пікові напруження від вихрового збудження розраховувати на напруження з коефіцієнтом асиметрії $\rho = -1$. У якості прикладу на рис. 9 наведена епюра нормальних напружень для досліджуваних пілонів. Так для розрахунків на витривалість для точок А і Г рекомендується враховувати напруження межі витривалості за коефіцієнтом асиметрії $\rho = 0$, у той час як у точках Б і В за коефіцієнтом асиметрії $\rho = -1$.

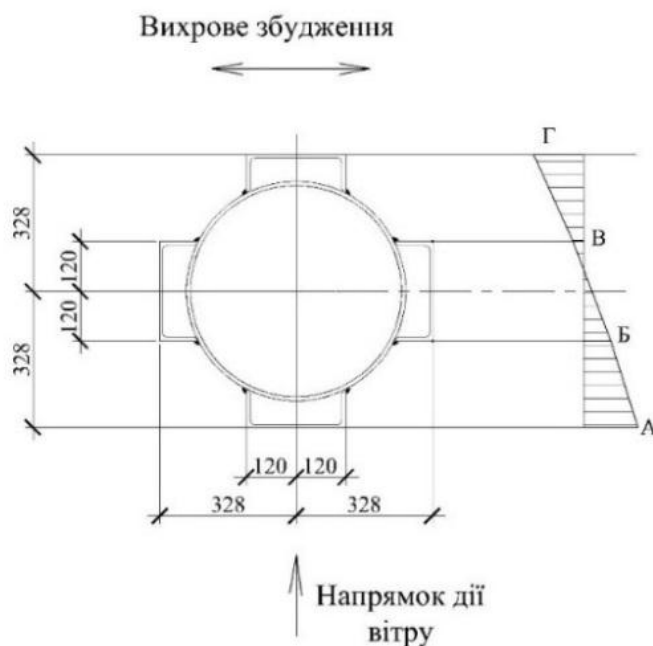


Рис. 9 Еюра нормальних напружень для пілонів із характерними точками

За ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування» основні конструкції і деталі вузлів баштових споруд відносяться до наступних груп:

- Основний переріз – група 1 для перерізу з прокатними кромками, 2 – для складеного перерізу з обрізними кромками;
- Флангові зварні шви траверс – 6б
- Шви кріплення траверс до бази – 5б
- Анкерні болти – 1

Проведений розрахунок меж витривалості для різних груп конструкцій для коефіцієнтів асиметрії напружень. $\rho = -1$, $\rho=0$ залежно від опору сталі на межі міцності. Результати розрахунків представлені в таблиці 7

Таблиця 7. Межі витривалості для різних груп конструкцій при різних марках сталей при коефіцієнтах асиметрії напружень $\rho = -1$, $\rho = 0$

Група конструкцій	$\rho = -1$			$\rho = 0$		
	235 $\leq R_{yn}$ ≤ 290	325 $\leq R_{yn}$ ≤ 500	590 $\leq R_{yn}$ ≤ 620	235 $\leq R_{yn}$ ≤ 290	325 $\leq R_{yn}$ ≤ 500	590 $\leq R_{yn}$ ≤ 620
1	64,95	82,95	122,95	116,0	150,8	198,3
2	64,36	74,36	89,36	122,5	145,8	158,2
5б	42,44	42,44	42,44	75,78	75,78	75,78
6б	43,33	43,33	43,33	72,21	72,21	72,21

Також вперше було проведено дослідження щодо характеру зміни витривалості конструкцій і деталей споруд при зміні рівня напружень. В

таблиці 8 вказано, як із збільшенням напруження знижується витривалість конструкції при напружень з коефіцієнтом асиметрії $\rho = -1$, що відповідає коливанням від вихрового збудження. При цьому для розрахунків в таблиці 8 прийнято, що базова кількість річних циклів коливань складає приблизно $3,5 \cdot 10^6$ і перевищення напружень на 2% знижує витривалість з умовно нескінченного терміну до 5 років.

Таблиця 8. Розрахункова кількість циклів до накопичення втоми для основного перерізу баштової споруди (група 1) зі сталі сталі $235 \leq R_{yn} \leq 290$ при коефіцієнті асиметрії напружень $\rho = -1$

Напруження, МПа	65	66	67	68	70	90	100	110
Кількість циклів	350424982	16396067	8248691	5443639	3165889	387733	185648	72467
Приблизний термін експлуатації до накопичення втоми	95 років	5 років	2 роки	1,5 роки	Менше одного року			
Межа витривалості	$R_{vi} = \frac{2\sigma_{-1}}{2-d_n(1+\rho_i)} \left(1 - 1,63 \frac{S_{\sigma-1}}{\sigma_{-1}}\right) = \frac{2 \cdot 122}{2-0,88(1-1)} \left(1 - 1,63 \frac{35}{122}\right) = 64,95 \text{МПа}$							

В єврокод за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-9:2012 межі витривалості визначаються за кривими витривалості за рис. 7.1 Як було визначено раніше, для досліджуваних відбувається від 2.6 до 14.4 млн коливальних циклів на циклів на рік. Якщо приймється термін служби 10 років, то кількість циклів приймається 10^7 , при збільшенні до 50 і вище років порядок кількості циклів 10^8 . Тому можна стверджувати, що для забезпечення надійності за Єврокод залежно від встановленого терміну експлуатації криві слід приймати в діапазоні порядку кількості циклів від 10^7 до 10^8 або до межі пошкодження (позиція 3 на рисунку)

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи були отримані наступні результати:

1. Виконане узагальнення порівняння теорії розрахунку будівель і споруд на вітрові навантаження згідно відмінених в Україні в 2007р норм 1985р, діючого ДБН та Єврокод. Внаслідок спрощень в ДБН фактично відсутня методика і положення для динамічного розрахунку споруд діаметром чи шириною до 1 м і висотою понад 12 м та міститься посилання на виконання

спеціального динамічного розрахунку, затверджена методика якого фактично відсутня. Тому в реальній практиці проектувальниками в Україні застосовуються алгоритми розрахунку на пульсаційну складову відмінених у 2007 старих норм 1985р, які закладені до програмних комплексів “SCAD” і “Ліра”. Порівняльний розрахунок досліджуваних в дисертації споруд за алгоритмами “SCAD” та Єврокод показав, що має місце велика різниця в результатах розрахунків до 45%. Отримані дані не підлягають чіткій порівняльній оцінці, внаслідок того, що різні системи базуються на застосуванні різного математичного апарату і реалізованих різних базових положень. Розрахунок досліджуваних споруд на вихрове збудження був виконаний за резонансним методом, що реалізований в Єврокод і ДБН

2. Визначені закономірності впливу вихрового збудження для умов кліматичної зони міста Києва на роботу чотирьох реалізованих на практиці баштових споруд з висотою від 11.35 до 48 м, що були збудовані з 1964 по 2021р. В програмному комплексі “SCAD” визначені їх власні частоти коливань по перших трьох формах. За власними частотами коливань виявлені їх критичні швидкості, які показали, що вихрове збудження викликає коливання за першою власною формою коливань вже при помірних вітрах від 3,42 до 5,86 м/с при максимальних швидкостях для даного регіону 20..25м/с. Для даної форми коливань характерні коливання з відносно не високими зусиллями і не визначальними за міцністю, однак з високою кількістю коливальних циклів. Для споруди флагштоку висотою 48 м було виявлено, що при швидкості вітру 17,1 м/с може проявлятися вихрове збудження за другою формою власних коливань, що може призводити до прояву зусиль більших за зусилля від динамічної реакції на дію фронтального вітру.

3. Визначені закономірності взаємозв'язку між зусиллями від вихрового збудження та зусиллями від дії фронтального вітру. Вплив вихрового збудження нелінійно зростає і становить від 3% для найменшої споруди до 48% для найвищої з досліджуваних споруд від абсолютних значень зусиль, що виникають в конструкції при дії фронтального вітру. В цих дослідженнях величина зусиль як від вихрового збудження так і фронтального вітру залежить від частотних характеристик системи, висоти, маси, яка в свою чергу залежить від жорсткості.

4. Вперше проведена оцінка кількості коливальних циклів для споруд протягом одного року за стенограмою архіву погоди в місті Києві в довільно обраний 2011 р. Для досліджуваних конструкцій виявлено закономірність, що за рік може відбуватися від 2.6 до 14.4 млн коливальних циклів під час дії вітрового навантаження різної інтенсивності. Ці результати вказують на те, що при

проектуванні баштових споруд необхідно враховувати обмеження напружень за межею витривалості.

5. Розроблено підхід визначення ефективних поперечних перерізів баштових споруд суцільного перерізу та їх частин. Так ефективними з точки зору впливу вихрового збудження є круглі та близькі до них перерізи. В таких перерізах пікові напруження для зусиль від силового фактору відносно однієї площини припадають на нейтральну зону для зусиль відносно іншої перпендикулярної площини. В прямокутних і близьких до них перерізах в кутових точках відбувається додавання зусиль від фронтального вітру та вихрового збудження. Стосовно опорних вузлів ефективним є кругове розташування анкерних болтів. Зусилля від вихрового збудження необхідно враховувати при розрахунку основ і фундаментів, особливо коли фундаменти мають квадратну форму в плані

6. Розроблена удосконалена методика врахування факторів і напружень межі витривалості для основних груп конструкцій: основного перерізу з прокатними кромками, зварних швів та анкерних болтів. Були розраховані напруження межі витривалості для різних груп конструкцій та кількість циклів витривалості для знакозмінних коливань для різного рівня напружень. Також встановлені параметри розрахунків на витривалість виходячи з кількості коливальних циклів в спорудах за Єврокод

7. Вперше запропонована практична консервативна розрахункова модель баштових споруд на витривалість, при якій приймається одночасна дія розрахункового граничного фронтального вітру та вихрового збудження. Дана модель може бути запропонована для вихрового збудження з коливаннями за першою власною частотою. Більш точне визначення спектрів дії вітрів за швидкостями і тривалістю дії є задачею складною, що потребує багаторічних спостережень безпосередньо на майданчику розташування споруди з виявленням частоти повторення і тривалості дії максимальних вітрів. Тому для споруд, в яких за розрахунками і вітровими характеристиками місцевості може відбуватися вихрове збудження за другою формою власних коливань рекомендується влаштовувати конструктивні засоби для гасіння вихрового збудження

8. Розроблені рекомендації, щодо вдосконалення методологічного підходу розрахунку на одночасну дію фронтального вітру та вихрового збудження, (додаток К зміни №2 до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування»).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Результати дисертаційної роботи опубліковані в фахових наукових виданнях України в тому числі індексованих в у міжнародних базах.

а) статті, що включені до наукових періодичних видань інших держав, та у наукових фахових виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Nuzhnyj, V., & Bilyk, S. (2024). Revealing the influence of wind vortex shedding on the stressed-strained state of steel tower structures with solid cross-section. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(1 (129)), 69–79. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.306181> (Scopus, квартиль 3)

2. В.В. Нужний Розрахунки сталевих баштових споруд на витривалість з врахуванням впливу вихрового збудження. Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2024. № 113, - с. 275-284. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.275-284> (Web of Science)

б) статті в наукових фахових виданнях України:

3. Нужний В.В. Вихрове вітрове збудження у баштових спорудах суцільного перерізу. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві Зб. наук. праць. Вип. 21. – Луцьк: Луц. НТУ, 2024. – с. 138 – 151. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-15](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-15)

4. В. Нужний, М. Дауров. (2024) Розрахунок баштової споруди на витривалість з врахуванням вихрового збудження. Будівельні конструкції. Теорія і практика (14).- с. 102-113. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.102-113>

5. Нужний, В. . (2024). Особливості розрахунку на витривалість баштових споруд при дії вітрових навантажень. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (15), 97–109. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.15.2024.97-109>

в) публікації по доповідях на міжнародних та вітчизняних конференціях:

6. Stability and dynamics of variable cross-section cantilever steel structures/ Tsyupyn E.I., Nuzhnyj V.V., Bilyk A.S.// 27th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY (16–18 October 2019, Portorož, Slovenia) –p.178.

7. Нужний В.В. Аналіз впливу вихрового вітрового збудження на баштові споруди // XIV Міжнародна науково-практична конференція «КОМПЛЕКСНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ

АНОТАЦІЯ

**Нужний В.В. Робота і витривалість баштових сталевих споруд
суцільного перерізу з уточненням впливу вихрового збудження.** - Рукопис

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 - Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2024.

В дисертаційній роботі проведено дослідження впливу вітрового вихрового збудження на напружено-деформований стан сталевих баштових споруд суцільного перерізу. Вихрове збудження проявляється в баштових спорудах внаслідок послідовного зриву вихорів по кромках споруди, що спричинює її коливання в площині, перпендикулярній до дії вітру. Дане явище не є широко відомим в інженерній практиці в Україні, вказівки щодо розрахунків на вихрове збудження в національних нормах з'явилися тільки в 2020р і є недостатньо пророблені. Був проведений аналіз існуючих методик з розрахунку на вихрове збудження та були розраховані і проаналізовані чотири реалізованих на практиці баштових споруди висотою від 11,355 м до 48,5 м. Було виявлено, що їм властивий прояв вихрового збудження вже при слабких та помірних вітрах за шкалою Бофорта, який відбувається за першою власною частотою. Виконана оцінка впливу вихрового збудження по залежно від висоти споруди, розподіленої маси вплив вихрового збудження складає від незначних 3% від зусиль від дії фронтального вітру для споруд висотою близько 12 м до 48% і вище для споруд висотою понад 48..50 м.. За архівом погоди в інтернеті для умов міста Києва оцінена кількість коливальних циклів на рік для баштових споруд, яка виявилася від 2,6 до 14,4 млн для досліджуваних споруд, що потребує при розрахунку здійснювати обмеження напружень до межі витривалості. Запропонована розрахункова модель з одночасною дією максимального фронтального вітру та вихрового збудження. Досліджена ефективна форма поперечного перерізу, вузлів і деталей баштових споруд. Така форма має бути у вигляді кола або близької до нього форми, натомість квадратні поперечні перерізи та квадратні фундаменти є менш ефективними. Встановлені критерії розрахунку на витривалість згідно національних норм ДБН та Єврокод.

Ключові слова: вихрове збудження; інерційні коливання; вітрове навантаження; баштова споруда; розрахунок на витривалість.

ABSTRACT

Valerii Nuzhnyi Performance and durability of solid cross-section steel tower structures with clarification of the vortex shedding influence. - Manuscript.

The thesis is monograph submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.23.01 – Building structures, buildings and structures. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation study investigated the influence of wind vortex shedding on the stress-strain state of steel tower structures of solid cross-section. Vortex shedding manifests itself in tower structures as a result of the sequential breakdown of vortices along the edges of the structure, which causes it to oscillate in a plane perpendicular to the action of the wind. This phenomenon is not widely known in engineering practice in Ukraine, instructions for calculations for vortex excitation in national standards appeared only in 2020 and are insufficiently developed. An analysis of existing methods for calculating vortex excitation was conducted and four tower structures implemented in practice with a height of 11,355 mm to 48.5 m were calculated and analyzed. It was found that they are characterized by the manifestation of vortex shedding already at weak and moderate winds on the Beaufort scale, which occurs at the first mode of natural frequency. The outflow of vortex shedding was estimated depending on the height of the structure, the distributed mass, the influence of vortex shedding is from a small 3% of the forces from the action of the frontal wind for structures with a height of about 12 m to 48% and higher for structures with a height of more than 48.50 m. According to the weather archive on the Internet for the conditions of the city of Kyiv, the number of oscillation cycles per year for tower structures was estimated, which turned out to be from 2.6 to 14.4 million for the studied structures, which requires limiting the stresses to the endurance limit when calculating. A calculation model with the simultaneous action of the maximum frontal wind and vortex shedding proposed. The effective shape of the cross-section, nodes and parts of tower structures is studied. This shape should be in the form of a circle or a shape close to it, while square cross-sections and square foundations are less effective. The criteria for calculating endurance are established according to the national standards DBN and Eurocode.

Keywords. Vortex shedding; inertial oscillations; wind load; tower structure; fatigue.