

УДК 624.9

РОЗРАХУНКИ СТАЛЕВИХ БАШТОВИХ СПОРУД НА ВИТРИВАЛІСТЬ З ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ВІТРОВОГО ВИХРОВОГО ЗБУДЖЕННЯ

В.В. Нужний,

здобувач ступеня канд. техн. наук

*Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ. 03037*

DOI: 10.32347/2410-2547.2024.113.275-284

Робота присвячена питанням впливу вихрового збудження на сталеві баштові споруди суцільного перерізу, що широко застосовуються в сучасній інфраструктурі. Визначений характер впливу вихрового збудження на споруди, визначена усереднена кількість коливальних циклів на рік та розроблені рекомендації щодо розрахунку споруд на витривалість.

Ключові слова: вихрове збудження, баштові споруди, витривалість, вітрове навантаження, власна частота, форма коливань.

Вступ. Теорії та практичні моделі щодо розрахунку будівель і споруд на вітрові навантаження розвивалися активно з середини 20 ст. на основі яких постали національні норми різних країн та наднаціональні – Єврокод. Була досліджена робота конструкцій на дію фронтального вітру розроблені методики квазистатичного і динамічного розрахунку з врахуванням пульсаційної складової вітру, однак феномен вихрового збудження для баштових споруд був досліджений і описаний значно пізніше та розроблені розрахункові моделі, які наведені в EN 1991-1-4.

Вихрове збудження виникає в баштових спорудах круглого, прямокутного та близьких до цих форм перерізів, де ширина приблизно дорівнює висоті перерізу. Явище пов'язане з вихровою доріжкою Кармана в потоці рідини або газу, коли при дії на нерухому перешкоду утворюються завихрення. При цьому з лівої та правої кромки споруди послідовно відбувається зрив вихорів, котрий розхитує споруду, спричинюючи її коливання з частотою, близькою до її власної. Необхідна умова прояву вихрового збудження – це дія вітру із швидкістю вищою за критичну. Коливання носять затухаючий характер і відбуваються під дією інерційних мас в площині, перпендикулярній до дії вітру. Фактично при спостереженні баштових споруд під час дії вітру всі помітні для ока знакозмінні коливання споруд є наслідками прояву вихрового збудження

Якщо в EN 1991-1-4 наводяться дві методики розрахунку на вихрове збудження для суцільно-стінчастих та решітчастих систем, то в національних нормах України вказівки щодо розрахунку конструкцій на вихрове збудження з'явилися лише у 2020 р. із введенням в дію зміни 2 до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи», однак при цьому не міститься жодних практичних вказівок чи методик розрахунку. Дане явище є мало відомим в широкій інженерній практиці в Україні і потребує аналізу та виявлення закономірностей, оскільки при проектуванні переважної більшості баштових споруд вихрове вітрове збудження не враховувалося.

1. Постановка задачі. В сучасній інфраструктурі широко застосовуються баштові споруди від рекламних стел та флагштоків вистою 6...10 м до більш масштабних пілонів, флагштоків, циліндричних технологічних апаратів колонного типу висотою понад 40..80 м. Для всіх споруд характерний прояв вихрового збудження при дії вітрів. В роботі, результати якої наведені в даній статті, розглядалися реальні реалізовані споруди із суцільним перерізом. В силу аеродинамічних особливостей, дані дослідження можуть бути застосовані також і для решітчастих споруд із суцільною зовнішньою оболонкою.

До основних задач які необхідно вирішити є:

- для реальних споруд різної висоти та жорсткості визначити власні частоти коливань для основних форм коливань та виявити критичні швидкості для різних власних форм коливань та проаналізувати із діапазоном діючих вітрів;

- розрахунок на вихрове збудження досліджуваних споруд за допомогою існуючих аналітичних методик;
- аналіз напружено-деформованого стану та виявлення закономірностей щодо врахування одночасної дії фронтального вітру та вихрового збудження залежно від конфігурації поперечного перерізу споруди та форми її вузлів;
- оцінка кількості коливальних циклів баштових споруд від вихрового збудження та виявлення критеріїв розрахунку баштових споруд на витривалість і в яких випадках цей фактор є критичним;

На основі вирішених задач розроблюються загальні рекомендації щодо розрахунку баштових конструкцій на витривалість при дії вітру.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробка основних теорій математичних моделей прикладання вітрового навантаження на споруди розвивалася з 1960-х рр. шляхом дослідження моделей споруд в аеродинамічних трубах в результаті чого були розроблені теорії розрахунків споруд на вітрове навантаження [1,2], що реалізовані в національних нормах різних країн. Переважно були розроблені методики і теорії розрахунку споруд на дію фронтального вітру. Вихрове збудження як феномен, що виникає в баштових спорудах, досліджувалося паралельно і огляд розвитку цього питання представлений в [3], самі ж аналітичні методи були сформульовані і впроваджені пізніше. Аналітичні методи розвивалися на основі праць і досліджень [4-9], в результаті був реалізований резонансний метод розрахунку, представлений в EN 1991-1-4, який, окрім рекомендованої методики розрахунку при проектуванні споруд, використовується як аналітичний метод для наукових досліджень.

Якщо брати наукову школу колишнього СРСР, спадком якої тривалий час користувалася Україна, то в [10] був наведений результат розрахунку залізобетонної димової труби висотою 80 м, в якій при усередненій швидкості вітру (що визначає статичну складову вітру) близько 17м/с призводить до розвитку коливань за другою власною частотою, зусилля від яких перевищують зусилля від фронтального вітру. Таким чином вказується на потенційну небезпеку саме коливань від вихрового збудження за другою формою власних коливань, у той час як коливання за першою власною частотою, які дають значно нижчі зусилля були вказані як такі, що не визначають несучу спроможність споруди, однак при цьому питання витривалості не розглядалося. Посилання на подібний розрахунок було присутнє в відміненому на території України СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» до введення в дію ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» в 2007 р.

Сучасні дослідження щодо впливу вихрового збудження можна віднести до декількох напрямків. Одним з них є продовження фундаментальних досліджень для похилих до напрямку вітру стержнів [11], для стержнів з не дослідженим раніше діапазоном геометричних параметрів, значенням числа Рейнольдса тощо. До другого напрямку [12, 13, 14] можна віднести дослідження унікальних конструкцій, телекомунікаційних веж тощо, де за допомогою застосування обдування моделей споруд в аеродинамічних трубах та з застосуванням аналітичних методик визначаються феномени впливу дії вітру на споруду та аналіз її витривалості. Окреме місце займає дослідження впливу вітру та вихрового збудження на вітроенергетичні установки з врахуванням впливу вітрових потоків від обертання лопатей [15]. Також досліджується застосування технічних засобів для гасіння впливу вихрового збудження [16].

3. Дослідження і результати дослідження

В даному дослідженні виконувався розрахунок чотирьох реальних реалізованих баштових споруд. До цих споруд відносяться три рекламних пілона «Макдональдз» висотою 11,355 м (споруда 1), 22,0 мм (споруда 2) і 25,575 (споруда 3) м із розташованим зверху фірмовим знаком у вигляді зосередженої маси на кінчику споруди. Четвертою спорудою був флагшток висотою 48,5 м, зведений в Києві у 1964 р. (споруда 4). Схематично всі споруди зображено на рис. 1

Результати досліджень були також опубліковані в [17, 18, 19]. Був здійснений розрахунок споруд на фронтальний вітер та вихрове збудження. Зусилля від останнього порівнювалися із зусиллями від фронтального вітру. Розрахунки та визначення власних частот визначалися за допомогою програмного комплексу SCAD.

Розрахунок на вихрове збудження був виконаний за Єврокод.

Критична швидкість, для i -тої власної частоти n_i визначається за формулою:

$$V_{cr,i} = \frac{n_i d}{S_t}, \quad (1)$$

де n_i – власна частота коливань споруди, d – ширина споруди, S_t – число Струхала.

Результати визначення власних частот і форм коливань для досліджуваних споруд наведені в таблиць 1, 2, 3, 4.

Розрахунок на вихрове збудження виконаний за EN 1991-1-4:2005. Так спочатку визначається амплітуда відхилень верхньої точки споруди:

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot K \cdot K_w \cdot C_{lat}, \quad (2)$$

де $y_{F,max}$ – амплітуда поперечних коливань в потоці повітря; St – число Струхала; S_c – число Скругтона, яке визначає схильність і сприяння конструкції до коливань в аеропружному середовищі; b – ширина споруди, що піддається дії вітру; K – табличний коефіцієнт форми коливань, що приймається залежно від форми коливань. Зокрема для першої форми його приймають 0,13; K_w – коефіцієнт кореляції, що визначається за геометричними параметрами згідно формул додатку Е EN 1991-1-4:2005; C_{lat} – коефіцієнт дії бічної сили, що для круглих перерізів приймається за графіками за числом Рейнольдса, для прямокутних 1,1.

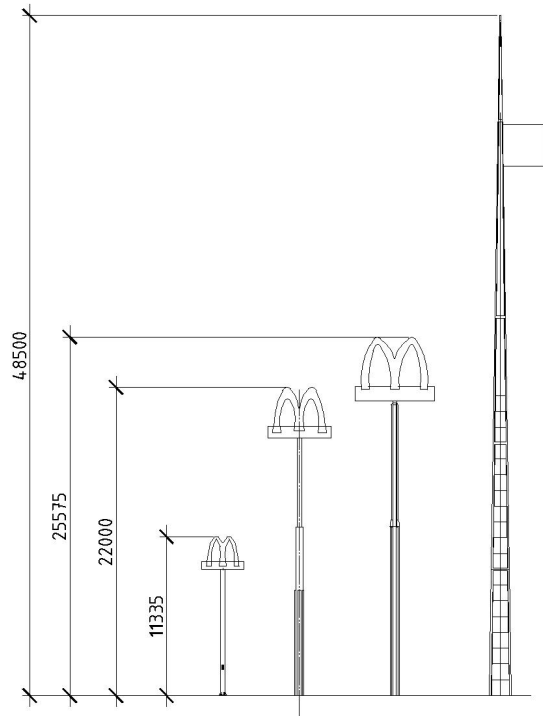


Рис. 1 Досліджувані споруди

Таблиця 1

Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для споруди 1 (друга і третя частота виходять за межі резонансних і не враховуються SCAD)

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 споруди 2

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	Не відбувається
20,449	98,5	Не відбувається

Таблиця 3

Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для споруди 3

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань, при якій відбувається вихрове збудження
0,9751	5,82	1 форма
5,39	32	Не відбувається
16,61	99,2	Не відбувається

Таблиця 4

Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для споруди 4

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	Не відбувається

*може виникнути вихрове збудження в рідкісних випадках, оскільки швидкість вітру 17.1 м/с можлива для умов Києва.

У подальшому розрахунок виконується за спрощеними схемами з визначенням погонної сили:

$$F_w(s) = m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,\max}, \quad (3)$$

де $m(s)$ – розподілена маса конструкції; $n_{i,y}$ – власна частота коливань; $\Phi_{i,y}(s)$ – функція форми власних коливань.

Результати розрахунків споруд на дію максимального розрахункового фронтального вітер та вихрове збудження внесені до таблиці 5. Розрахунки на фронтальний вітер виконувалися за ДСТУ EN 1-1-4

Таблиця 5

Результати розрахунків споруд на дію фронтального вітру та вихрового

Параметр	Досліджувана споруда			
	Споруда 1	Споруда 2	Споруда 3	Споруда 4
Момент в опорі від фронтального вітру M , кНм.	47,4	323,9	483,0	857,7
Момент в опорі від вихрового збудження, M_v , кНм	1,404	43,6	75,4	373,25
$M_v/M \cdot 100\%$	2,9	13,4	15,6	43,5

Як показали розрахунки, вплив вихрового збудження зростає з висотою споруд внаслідок збільшення періоду власних коливань та мас споруд внаслідок зростання їх жорсткостей. Для досліджуваних споруд опорний момент від вихрового збудження складає від 2,9 до 43,5% від фронтального вітру. Коливання відбуваються за першою власною частотою коливань.

Для споруди 4 флагштоку при швидкості вітру 17.1 м/с можливий прояв вихрового збудження за другою формою власних коливань, які згідно [10, 14] можуть давати резонансні зусилля, що перевищують зусилля від дії максимального фронтального вітру. Це потребує подальших досліджень.

Орієнтовне визначення кількості коливальних циклів від вихрового збудження визначено шляхом аналізу інтернет ресурсу архіву погоди [20], де зберігаються дані щодо швидкості і часу дії вітрів з 2011 і до тепер. Враховуючи специфіку дії вітру на баштові споруди, дослідженням напрямку дії вітру можна умовно знехтувати. Для аналізу був випадково обраний 2011 р (як перший рік, в який задокументована швидкість вітру з інтервалом спостереження 30 хв) 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 6.

На основі даних, приведених в таблиці 6, за формулою:

$$N_i = \frac{\sum t}{T_i}, \quad (4)$$

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.

Кількість коливальних циклів для досліджуваних споруд складала:

– $14.4 \cdot 10^6$ циклів для споруди 1;

- $4,3 \cdot 10^6$ циклів для споруди 2;
- $3,4 \cdot 10^6$ циклів для споруди 3;
- $2,6 \cdot 10^6$ циклів для споруди 4.

Цей первинний якісний аналіз без ретельного аналізу інших років є достатнім для того, щоб зробити висновок, що кількість коливальних дуже висока і для оцінки витривалості конструкцій необхідно виконувати обмеження напружень до межі витривалості.

Таблиця 6

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 $(V_i/V_{\max})^2$
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	

Іншою особливістю впливу вихрового збудження на напружено-деформований стан є те, що зусилля від вихрового збудження діють в напрямку, перпендикулярному до дії фронтального вітру. Для прикладу на рис. 2 зображений у якості прикладу вплив вихрового збудження на нормальні напруження в основі споруди 3, поперечний переріз якої являє собою круглу трубу, підсилену швелерами.

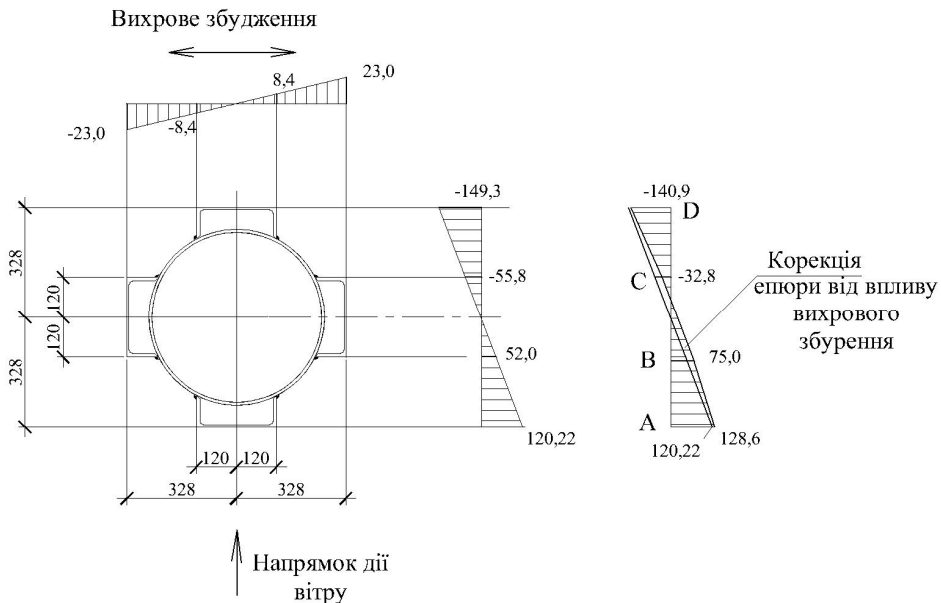


Рис. 2. Епюра нормальних напружень для споруди 3 з врахуванням вихрового збудження

Для круглого перерізу, або близького до нього, відбувається перерозподіл зусиль і напружень, оскільки пікові значення напружень від зусилля вздовж однієї осі припадають на нейтральну зону напружень від зусиль вздовж другої осі. Тому для наведеного прикладу врахування вихрового збудження разом з максимальним фронтальним вітром дає збільшення пікових нормальних напружень лише на 7%. У той час якщо споруда має прямокутний переріз, то максимальні напруження від вихрового збудження потрібно додавати повністю до напружень від максимального фронтального вітру.

Вихрове збудження відбувається за будь-якої швидкості вітру, що перевищує критичне значення, тому максимальні напруження і зусилля виникатимуть при одночасній дії максимального розрахункового фронтального вітру та вихрового збудження. Якщо щодо вихрового збудження, як було показано вище, можна приймати відносно сталі параметри, то з врахування дії фронтального вітру є питання. Так в таблиці 6 наведений приблизний розподіл вітрів, що діяли в 2011 р., з якого випливає, що критичні вітри діяли протягом 64% всього річного часу та в 60% величина вітрового тиску не перевищувала 10% від максимального розрахункового фронтального вітру, повторюваність якого складає раз на 50 років. Для вироблення реальної розрахункової моделі, в якій допустити розрахунок на витривалість із перевищенням напружень межі витривалості наприклад для вітрів із швидкостями 9 м/с і вище (див. табл. 6) є досить складною задачею яка потребує багаторічних спостережень безпосередньо на майданчику будівництва з врахуванням конкретних умов (рози вітрів, перешкод, відкритих поверхонь, похилого рельєфу тощо). Фактично однозначно на це питання відповісти не можна, однак можна пояснити, чому в більшості випадків витривалість споруд, що знаходяться в експлуатації тривалий час, є забезпеченою.



Рис. 3. Характер коливань споруди від дії фронтального вітру

З точки зору консервативного підходу заради безпеки експлуатації подібних будівель і споруд можна запропонувати метод, по якому відбувається обмеження всіх напружень в цілому в будівлі до межі витривалості. Так феномен деформацій і коливань баштових споруд від вітру зображений на рис. 3.

Так по напрямку дії вітру відбуваються відхилення споруди при прояві динамічної реакції на вітер, коли вона відхиляється від нульового положення до амплітудного значення і коефіцієнт асиметрії напружень $\rho_i=0$, у той час як у перпендикулярному до дії вітру напрямку, де відбуваються знакозмінні коливання, коефіцієнт асиметрії напружень слід приймати $\rho_i=-1$. Тому рекомендується за рис. 2 в точках А і D враховувати межу витривалості при асиметрії напружень $\rho_i=0$, у той час як в точках В і С - при асиметрії напружень $\rho_i=-1$. Визначення значень меж витривалості за ДБН В.2.6-198:2014 в рамках цієї роботи приведені в [18].

Аналогічні міркування можуть бути застосовані при розрахунках конструкцій за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-9:2012, приймаючи параметри кривих витривалості за рис. 7.1 (наведений на рис. 4) за межею пошкоджень (позиція 3).

Слід зазначити, що для сталевих баштових споруд із суцільним перерізом подібне обмеження напружень не призводить до значних перевитрат матеріалу, оскільки подібні споруди проектуються з врахуванням жорсткості з обмеженням прогинів і переміщень. В даному аспекті особливої уваги потребує конструювання опорних вузлів баз – траверс, анкерних болтів тощо.

Висновки. Проведений аналіз наявної літератури щодо розрахунку конструкцій на вихрове збудження та обраний аналітичний метод розрахунку конструкцій на вихрове збудження для проведення досліджень. Були досліджені реальні реалізовані на практиці баштові споруди на вплив вихрового збудження.

Як показали дослідження, при відсутності чіткої простежуваної залежності, вплив вихрового збудження нелінійно зростає із збільшенням висоти споруди. Так для баштової споруди висотою близько 12 м вплив вихрового збудження дуже не значний, у той час як для споруди

флагштока висотою 48,5 м зусилля від вихрового збудження складають 43% від зусиль від фронтального вітру. Дослідження показали, що найбільш ймовірний розвиток коливань від вихрового збудження за першою формою власних коливань, який вже може відбуватися при помірних вітрах із швидкістю 3,5..5,5 м/с, а кількість коливальних циклів на рік перевищує 10^6 . Така частота коливань потребує при розрахунках на витривалість і конструюванні споруд приймати напруження конструкціях і деталях споруд з врахуванням межі витривалості. Визначені і запропоновані критерії розрахунку конструкцій споруд на витривалість.

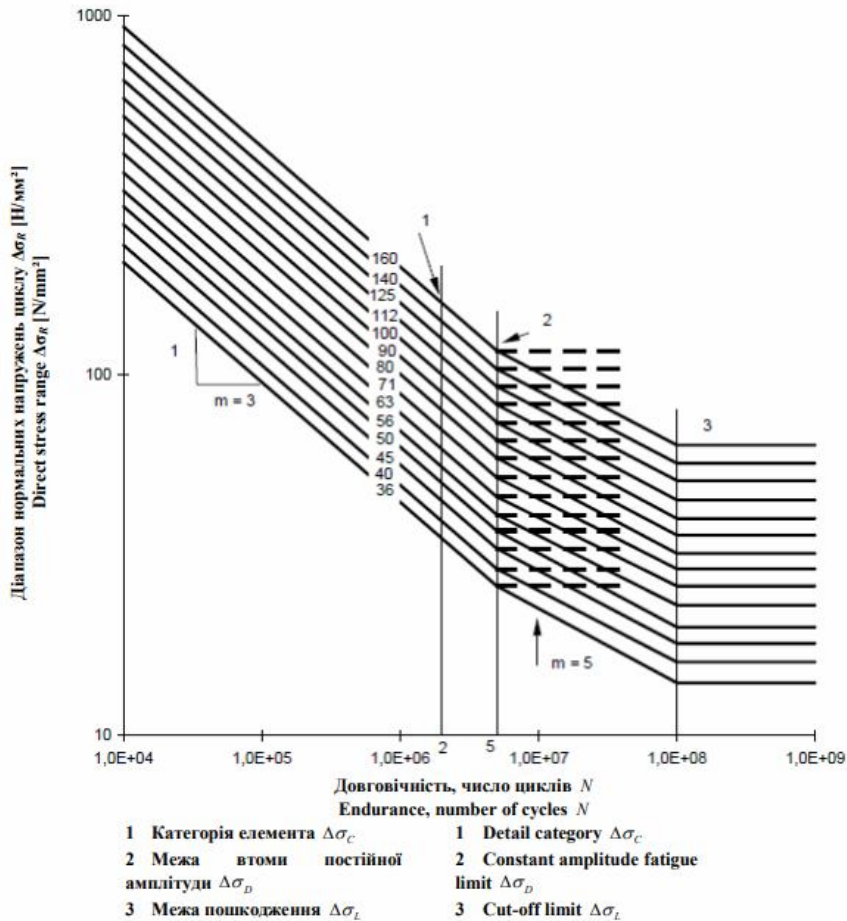


Рис. 4. Параметри кривих витривалості за ДСТУ-Н Б EN 1993-1-9:2012

Ефективним перерізом для баштових споруд з точки зору перерозподілу зусиль від одночасної дії фронтального вітру та вихрового збудження є коло та близькі до нього перерізи, внаслідок чого пікові зусилля і напруження вздовж однієї осі, потрапляють в нейтральну зону по іншій осі. Для квадратних і прямокутних перерізів вплив пікових зусиль у взаємно перпендикулярних площинах підсумовуються в кутових точках, що теоретично на прикладі флагштока висотою 48,5 м додає 48% зусиль при врахуванні вихрового збудження.

Сталеві суцільностінчасті баштові споруди мають відносний запас міцності внаслідок того, що при проектуванні і розрахунках на фронтальний вітер вони проектуються з жорсткістю достатньою для забезпечення прогинів і переміщень. Небезпечними в цьому аспекті, тобто такими що потребують уваги, є решітчасті конструкції із суцільною зовнішньою оболонкою, що створює аеродинамічні ефекти, аналогічні для суцільностінчатих споруд. Це можуть бути як правило монументальні споруди в стержньових елементах каркасу і вузлах яких можуть відбуватися характерні для решітчастих споруд концентрації зусиль, що можуть перевищувати межу витривалості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Davenport, A. G. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961. –Vol.19 – p.449-472.
2. Simiu E., Scanlan R.H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York: John Wiley, 1996, 704 p.
3. Giosan, I. and Eng, P. (2007) Vortex Shedding Induced Loads on Free Standing Structures, Structural Vortex Shedding Response Estimation Methodology and Finite Element Estimation. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.582.3179>
4. Scruton, C.: An Introduction to Wind Effects on Structures – Oxford University Press, Oxford, UK, 1981
5. Galemann, T., Ruscheweyh, H.: Untersuchung winderregter Schwingungen an Stahlschornsteinen. Forschungsbericht Projekt 163 - Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 1992.
6. Holmes, J.D.: Response of cylindrical structures to vortex shedding in the natural wind - 13th Australian Fluid Mechanics Conference Monash University, Melbourne, Australia, 13-18 December 1998.
7. Verboom, V.K., van Koten, H.: Vortex excitation: Three design rules tested on 13 industrial chimneys - Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98 (2010), pp. 145-154.
8. Piccardo, G., Solari, G. – Closed Form Prediction of 3D Wind-excited response of slender structures. Journal of Wind Engineering in Industrial Aerodynamics, 1998; 74-76: 697-708.
9. Solari, G. – The role of analytical methods for evaluating the wind-induced response of structures, Journal of Wind Engineering in Industrial Aerodynamics, 90, 1453-1477, 2002.
10. Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра. – М., Стройиздат, 1978 – 216с.
11. Zhengliang Li, Zhisong Wang, Jiahong Li and Siyuan Liu. Experimental Study on Vortex-Induced Vibration of Steel Tubes in Transmission Towers at Various Inflow Conditions, Buildings (MDPI) 2023, 13(1), 252; <https://doi.org/10.3390/buildings13010252>.
12. Priyan Mendis, Shiromal Fernando, John Holmes, Tharaka Gunawardena, Yousef Abu-Zidan, Priyan Dias. Wind induced fatigue analysis of Lotus Tower Mast. Nineteenth Australasian Wind Engineering Society Workshop, April 4-6, 2018, Torquay, Victoria.
13. Vieira, D., Barros, R.C. Tubular steel lattice telecommunication towers, subjected to wind loading and vortex shedding (2017) COMPDYN 2017 - Proceedings of the 6th International Conference on Computational. Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2, pp. 3154-3162 https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4_6
14. Rakočević, M., Popović, S.: Calculation procedure for determining wind action from vortex-induced vibration with verification of fatigue strength of steel structures, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 9, pp. 793-809, <https://doi.org/10.14256/JCE.2125.2017>
15. Wang, D., Zhao, Z., Liu, Y., Ma, Y., Liu, H., Chen, M. Study on vortex induced resonance mechanism between tower and blade of large wind turbine [(2023) Taiyangneng Xuebao/Acta Energeiae Solaris Sinica, 44 (10), pp. 306-312. <http://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-084>
16. Krishnappa, L., Sander, A., Thoben, K.-D. Aerodynamic Devices to Reduce/Suppress Vortex Induced Vibrations on a Wind Turbine Tower: A Review. (2022) Journal of Physics: Conference Series, 2265 (3), art. No. 032053 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032053>.
17. Нужний В.В. Вихрове вітрове збудження у баштових спорудах сутільного перерізу. - Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві 36. 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)
18. 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>
19. 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>
20. Архів погоди <https://meteoport.com/>

REFERENCES

1. Davenport, A. G. The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1961. –Vol.19 – p.449-472.
2. Simiu E., Scanlan R.H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York: John Wiley, 1996, 704 p.
3. Giosan, I. and Eng, P. (2007) Vortex Shedding Induced Loads on Free Standing Structures, Structural Vortex Shedding Response Estimation Methodology and Finite Element Estimation. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.582.3179>
4. Scruton, C.: An Introduction to Wind Effects on Structures – Oxford University Press, Oxford, UK, 1981
5. Galemann, T., Ruscheweyh, H.: Untersuchung winderregter Schwingungen an Stahlschornsteinen. Forschungsbericht Projekt 163 - Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 1992.
6. Holmes, J.D.: Response of cylindrical structures to vortex shedding in the natural wind - 13th Australian Fluid Mechanics Conference Monash University, Melbourne, Australia, 13-18 December 1998.
7. Verboom, V.K., van Koten, H.: Vortex excitation: Three design rules tested on 13 industrial chimneys - Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98 (2010), pp. 145-154.
8. Piccardo, G., Solari, G. – Closed Form Prediction of 3D Wind-excited response of slender structures. Journal of Wind Engineering in Industrial Aerodynamics, 1998; 74-76: 697-708.
9. Solari, G. – The role of analytical methods for evaluating the wind-induced response of structures, Journal of Wind Engineering in Industrial Aerodynamics, 90, 1453-1477, 2002.
10. Rukovodstvo po raschetu zdaniy i sooruzhenij na deistvije vetra (Guide to calculating buildings and structures for wind exposure.). – М., Strojizdat, 1978 – 216с. (in Russian).

11. Zhengliang Li, Zhisong Wang, Jiahong Li and Siyuan Liu. Experimental Study on Vortex-Induced Vibration of Steel Tubes in Transmission Towers at Various Inflow Conditions, Buildings (MDPI) 2023, 13(1), 252; <https://doi.org/10.3390/buildings13010252>.
12. Priyan Mendis, Shiromal Fernando, John Holmes, Tharaka Gunawardena, Yousef Abu-Zidan, Priyan Dias. Wind induced fatigue analysis of Lotus Tower Mast. Nineteenth Australasian Wind Engineering Society Workshop, April 4-6, 2018, Torquay, Victoria.
13. Vieira, D., Barros, R.C. Tubular steel lattice telecommunication towers, subjected to wind loading and vortex shedding (2017) COMPDYN 2017 - Proceedings of the 6th International Conference on Computational. Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2, pp. 3154-3162 https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4_6
14. Rakočević, M., Popović, S.: Calculation procedure for determining wind action from vortex-induced vibration with verification of fatigue strength of steel structures, GRAĐEVINAR, 70 (2018) 9, pp. 793-809, <https://doi.org/10.14256/JCE.2125.2017>
15. Wang, D., Zhao, Z., Liu, Y., Ma, Y., Liu, H., Chen, M. Study on vortex induced resonance mechanism between tower and blade of large wind turbine (2023) Taiyangneng Xuebao/Acta Energeiae Solaris Sinica, 44 (10), pp. 306-312. <http://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-084>.
16. Krishnappa, L., Sander, A., Thoben, K.-D. Aerodynamic Devices to Reduce/Suppress Vortex Induced Vibrations on a Wind Turbine Tower: A Review. (2022) Journal of Physics: Conference Series, 2265 (3), art. No. 032053 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2265/3/032053>
17. Nuzhnyj V.V. Vykhrove vitrove zbudzhennia u bashtovykh sporudakh sutsilnogo pererizu (Eddy wind excitation in tower structures of continuous section). - Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi Zb. nauk. prats. Vyp. 21. – Lutsk: Luts. NTU, 2024. – s. 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) (in Ukrainian).
18. V. Nuzhnyj, M. Daurov. (2024) Rozrakhunok bashtovoi sporudy na vytryvalist z vrakhuvanniam vykhrovoho zbudzhennia (Calculation of the tower structure for endurance, taking into account vortex excitation). - Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka (14).- s. 102-113. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.102-113> (in Ukrainian).
19. 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>
20. Weather archive <https://meteopost.com/>

Стаття надійшла 29.10.2024

Нужний В.В.

Розрахунки сталевих баштових споруд на витривалість з врахуванням впливу вітрового вихрового збудження

В даній праці розглянуті аспекти розрахунку баштових споруд суцільного перерізу на витривалість із врахуванням вітрового збудження. В науковій і нормативній літературі щодо проектування будівельних конструкцій, як власне і в практиці проектування, прийнято враховувати вплив фронтального вітру на будівлі і споруди в цілому а також їх конструктивні елементи. В той же час для баштових споруд характерний особливий феномен – вихрове збудження, коли при дії фронтального вітру внаслідок послідовного зриву вихорів відбувається коливання споруди в площині, перпендикулярній до дії вітру. Коливання від вихрового збудження відбуваються за власними частотами коливань при швидкостях вітру вищих за критичні значення, які як буде показано можуть знаходитися в діапазоні вже помірних вітрів і вище. Постає питання в оцінці кількості коливальних циклів та напружено-деформованого стану конструкцій споруд та їх деталей за весь період експлуатації з метою визначення їх витривалості. Були проведені аналітичні дослідження дії вихрового вітрового збудження в чотирьох баштових спорудах суцільного перерізу висотою від 12 м до 48 м, які показали що найчастіше в спорудах при вихровому збудженні проявляються коливання за першою власною частотою коливань і вплив вихрового збудження істотно зростає із збільшенням висоти споруди. Був визначений час дії вітрів зі швидкістю, вищою за критичну в один випадковो взятій рік для м. Києва з опублікованого на інтернет-ресурсі архіву погоду, який показав що кількість коливальних циклів на рік для досліджуваних споруд перевищує 1 млн. Це свідчить про необхідність обмеження напружень в системах до межі витривалості. Також розглянутий аспект впливу форми поперечного перерізу споруд на напружено-деформований стан з врахуванням вихрового збудження.

Ключові слова: вихрове збудження, баштові споруди, витривалість, вітрове навантаження, власна частота, форма коливань.

Nuzhnyj V.V.

STEEL TOWER STRUCTURES FATIGUE ANALYSIS TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF WIND VORTEX SHEDDING

In this work, the aspects of solid cross-section steel tower structures fatigue analysis, taking into account vortex shedding, are considered. In scientific and regulatory literature on the design of building structures, as well as in design practice, it is customary to take into account the influence of frontal wind on buildings and structures as a whole, as well as their structural elements. At the same time, tower structures are characterized by a special phenomenon - vortex shedding, when under the action of a frontal wind due to the successive breakdown of vortices, the structure oscillates in a plane perpendicular to the wind. Oscillations from vortex shedding occur according to their own oscillation frequencies at wind speeds higher than critical values, which, as will be shown, can be in the range of already moderate winds and higher. There is a question of assessing the number of oscillation cycles and the stress-deformation state of construction structures and their details for the entire period of operation in order to determine their durability. Analytical studies of the effect of vortex wind shedding were conducted in four tower structures with a continuous cross-section from 12 m to 48 m in height, which showed that most often in structures with vortex excitation, oscillations at the first natural frequency of oscillations are manifested, and the effect of vortex shedding increases significantly with an increase in the height of the structure. The time of winds with a speed higher than the critical speed was determined in one randomly selected year for the city of Kyiv from the weather archive published on the Internet resource, which showed that the number of oscillating cycles per year for the structures under study exceeds 1 million. This indicates the need to limit stresses in systems to the limit of endurance. Also considered is the aspect of the influence of the shape of the cross-section of structures on the stress-strain state, taking into account vortex shedding.

Keywords: vortex shedding, tower structures, fatigue, wind load, natural frequency, oscillation mode.

УДК 624.9

Нужний В.В. Розрахунки сталевих баштових споруд на витривалість з врахуванням впливу вітрового вихрового збудження // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – Київ: КНУБА, 2024. – Вип. 113. – С. 275-284.

Робота присвячена питанням впливу вихрового збудження на сталеві баштові споруди суцільного перерізу, що широко застосовуються в сучасній інфраструктурі. Визначений характер впливу вихрового збудження на споруди, визначена усереднена кількість коливальних циклів на рік та розроблені рекомендації щодо розрахунку споруд на витривалість.

Табл. 6. Іл. 4. Бібліогр. 20 назв.

UDC 624.9

Nuzhnyj V.V. Steel tower structures fatigue analysis taking into account the influence of wind vortex shedding // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – Kyiv: KNUBA, 2024. – Issue 113. – P. 275-284.

The work is devoted to the issues of the influence of vortex shedding on steel tower structures of solid section, which are widely used in modern infrastructure. The nature of the influence of vortex excitation on structures was determined, the average number of oscillation cycles per year was determined, and recommendations were developed for calculating the fatigue of structures.

Tabl. 6. Fig. 4. Ref. 20

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): здобувач ступеня кандидата технічних наук, кафедра металевих і дерев'яних конструкцій Нужний Валерій Вікторович

Адреса робоча: 03035 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра металевих і дерев'яних конструкцій

Робочий тел.: +38(044) 241-54-89

E-mail: Nuzhnyy@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0400-3204>