

ВИХРОВЕ ВІТРОВЕ ЗБУДЖЕННЯ У БАШТОВИХ СПОРУДАХ СУЦІЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ

WIND VORTEX SHEDDING IN TOWER BUILDINGS WITH SOLID- WEB CROSS-SECTION

**Нужний В.В., ст. викладач (Київський національний університет
будівництва і архітектури)**

**Nuzhnyj V.V., Senior Lecturer (Kyiv National University of
Construction and Architecture)**

Явище вихрового вітрового збудження є неодмінним проявом дії вітру для баштових споруд. Воно проявляється у вигляді коливань споруди у напрямку, перпендикулярному до дії вітру. В даній статті наведена коротка історія вивчення питання, які розрахункові положення і моделі використовуються на практиці. Наведені результати розрахунку чотирьох реальних конструкцій на вихрове збудження. Означені додаткові питання, які з'являються при розрахунку і проектуванні баштових конструкцій із врахуванням вихрового збудження, які потребують подальших досліджень, зокрема, для визначення параметрів розрахунку споруд на витривалість.

Manifestation of wind action for tower structures that have close cross-section width and depth dimensions in plan. It manifests itself in the form of oscillations of the building in the direction perpendicular to the wind. Vortex shedding occurs under the action of successive disruption of vortices from the edges of the structure, which causes damping oscillations under the action of inertial masses with the natural frequency of oscillations of the structure in one of three forms of natural oscillations, depending on the frequency and critical speed. The paradox is that engineering practice in Ukraine was first required to perform calculations on vortex excitation with the introduction of change 2 to DBN B.1.2-2:2006 in 2020, and the phenomenon itself remains little known to the general public of design engineers. This article provides a brief history of the study of the issue of which calculation provisions and models are used in practice. The theory of the process and the method of calculation of structures for vortex shedding are represented, as well as the results of the calculation of four real structures. For these structures, the level of forces is determined and the regularities of the simultaneous consideration of forces from the action of frontal wind and vortex excitation are indicated. Additional questions that arise in the calculation and design of tower structures taking into account vortex shedding are identified, which require further research, in particular, to determine the parameters of the calculation of structures for endurance. It was found that the influence of vortex shedding increases with the height and mass of buildings. For tower structures with a height of up to 15 m, the vortex excitation gives insignificant forces, only up to 3..5% of the forces of the frontal wind, with an increase in height up to 50 m, the forces increase to 40..50%. When several factors coincide, the manifestation of vortex excitation in the second and third forms of natural frequencies is possible, which can cause resonant forces.

Ключові слова: баштові споруди, квазистатична дія, вітрові пульсації, вихрове збудження, власна частота коливань

Keywords: tower buildings quasi-static action, wind pulsations, vortex shedding, natural oscillation frequency

Вступ

Явище вихрового збудження виникає у баштових спорудах при дії вітру і внаслідок послідовного зриву вихорів з кромek споруди спричиняє коливання споруди в напрямку, перпендикулярному до дії вітру. Коливання споруд відбувається за власними формами коливань, виникають при дії вітрів, швидкість яких перевищує певну критичну швидкість, характерну для кожної власної частоти і форми коливань. Коливання за першою власною частотою можуть відбуватися при дії вже помірних вітрів і є такими, що найбільш часто проявляються і можуть призводити до накопичення втоми в конструкціях. Коливання за другою і третьою власними частотами можуть призводити до появи резонансних зусиль. Саме вихрове збудження не є самостійним явищем і проявляється одночасно з дією фронтального вітру. Вперше в нормативних документах України пряме посилання на розрахунок конструкцій на вихрове збудження з'явився у зміні 2 до ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» у 2020 р, де вказано що це явище є достатньо часто повторюваним, вимагає оцінки впливу на стійкість конструкцій проти втоми. Загалом явище вихрового збудження, його вплив на споруди є недостатньо висвітленим в Україні і залишається невідомим в інженерній практиці та потребує досліджень і систематизації. Також періодично трапляються аварії димових труб, зведених у 1960-х роках на теренах колишнього СРСР внаслідок проявів вихрового збудження. Тому дана тема є актуальною.

Аналіз останніх досліджень

Сучасні теорії визначення вітрового навантаження, аеродинаміки споруд базуються на дослідженнях, що проводилися з 1950-1960-х років [1,2,3,4] На рівні різних національних норм були розроблені розрахункові моделі, які полягають у квазистатичній дії вітру на споруду та динамічній реакції, коли випадкова частота пульсаційного пориву співпадає з власною частотою споруди і викликає резонансну динамічну реакцію.

Однак окрім динамічної реакції при дії фронтального вітру спостерігаються інші явища, які можуть носити небезпечний характер і їх аналіз впливів із розрахунковими схемами і методиками розрахунку додався пізніше. До таких явищ відносять вихрове збудження, флатер, галопування залежно від видів конструкцій, в яких це проявляється.

Темою даної статі є явище вихрового збудження у баштових спорудах, яке пов'язане нерозривно з явищем, відкритим Теодором фон Карманом у 1911 р., яке отримало визначення, як вихрова доріжка Кармана.

При дії вітру відбувається зрив вихорів то зліва то справа, який спричиняє коливання конструкції з частотою, близькою до власної (див. рис.1) у напрямку, перпендикулярному до дії вітру. Це відбувається із швидкістю, вищою за критичну для певної форми власних коливань.

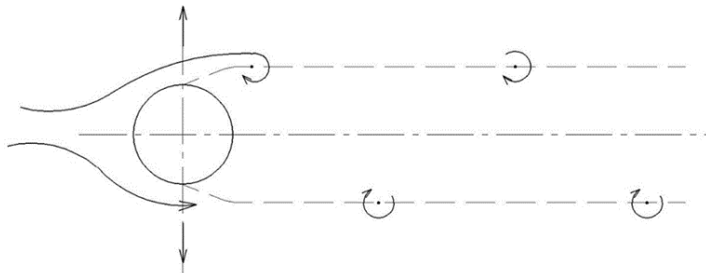


Рисунок 1 – Зрив вихорів з конструкції

Фактично для будь-якої баштової конструкції при дії вітру відбуваються коливання по одній із трьох форм власних частот у напрямку, перпендикулярному до дії вітру (див. рис. 2 і 3).

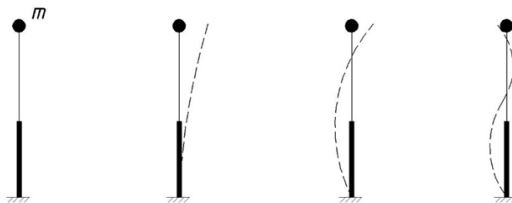


Рисунок 2 – Розрахункова схема і перші три власні форми коливань для баштових споруд



Рисунок 3 – Характер коливань споруди із проявом вихрового збудження за першою формою власних коливань

При вивченні вихрового збудження зазвичай модель споруди обдували в аеродинамічній трубці, визначали відхилення верхньої точки споруди у напрямку, перпендикулярному до дії вітру, і складали диференціальне рівняння автоколивань стержня. Таке рівняння має достатньо громіздкий розв'язок.

На теренах колишнього СРСР питанням вивчення ефекту вихрового збудження займалися з 1950-х рр. і у 1978 р. був виданий посібник «Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра», в якому міститься інформація про аеродинамічні дослідження в ЦНИИСК та ЦАГИ щодо вихрового збудження в циліндричних стрижнях при числі Рейнольдса $Re > 50$. В тому ж посібнику наведений аналіз, в яких випадках буде визначальною для розрахунку конструкцій дія фронтального вітру, а в яких – резонансного вихрового збудження і, зокрема, наведений розв'язок диференціального рівняння для другої форми власних коливань конічної залізобетонної димової труби. Було показано, що при прояві вихрового збудження за другою формою власних коливань зусилля в системі перевищують зусилля від дії фронтального вітру і є визначальними в системі. Але найбільш часті і найбільш чисельні за кількістю циклів виникають коливання за першою власною частотою, які в посібнику не розглядалися і було вказано лиш, що зусилля від даного прояву є незначними. При цьому питання циклічності, втомі конструкцій від вихрових збуджень вирішено не було. В СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» в п. 6.8 містилася вказівка розраховувати циліндричні у плані сталеві споруди за умови, що їх власна частота коливань не перевищує вказану граничну в таблиці 8 з прив'язкою до вітрових районів, однак без посилання на методики. При цьому вказівок щодо розрахунку конструкцій,

з перерізом, відмінним від круглого, не містилося. З відміною дії даного СНиП на території України питання розрахунку на вихрове збудження не було жодним чином внормоване тривалий час.

Дослідження вихрового збудження проводилися за кордоном і згідно огляду в праці [5] свій вклад внесли науковці університетів Генуї та Аахена. Зокрема, були розроблені спрощені інженерні методика обчислення вихрового збудження, які реалізовані в Єврокод EN 1991-1-4:2005 «Загальні дії. Вітрові навантаження», де запропоновано виконувати розрахунок за двома наближеними методиками. Одна методика застосовується для суцільностінчастих перерізів, а друга – для решітчастих систем, що продуваються вітром.

Постійно публікуються праці прикладного характеру, де вивчається вплив вихрового збудження на конкретні конструкції та удосконалюються методика розрахунку. Зокрема, в [6] досліджується прояв вихрового збудження на 88-ми метрову залізобетонну вежу «Лотос» в столиці Шрі-Ланки, досліджується її модель в аеродинамічній трубі, виконується аналіз її витривалості з врахуванням розкриття тріщин. У праці [7] досліджується вплив вихрового збудження на освітлювальну опору з врахуванням втрати. В праці [8] виконується аналіз 37.9 метрової вежі освітлення, збудованої в Німеччині, в якій можуть відбуватися вихрові збудження по всіх трьох формах власних коливань. при достатньо реалістичних усереднених швидкостях вітру 11,47 м/с та 19,03 м/с відповідно. Причому, зусилля від вихрового збудження за другою і третьою власними формами коливань є дуже значними і вказано на складнощі і недосконалість розрахунку подібних споруд на витривалість внаслідок важкості визначення кількості циклів подібних проявів. Особливо актуальною проблемою є вплив вихрового збудження на вітроенергетичні установки, в тому числі – з урахуванням турбулентних вітрових потоків, спричинених обертанням лопатей турбін [9, 10].

Мета і задачі дослідження

Баштові споруди широко застосовуються у сучасній інфраструктурі у вигляді опор освітлення, рекламних стел, телекомунікаційних веж, флагштоків, димових труб тощо і в силу регіонального аспекту в Україні вони не розраховувалися на вихрове збудження. Мета дослідження полягає у виявленні закономірностей впливу вихрового збудження на низку реалізованих баштових конструкцій. Конструкції мають різну висоту і

жорсткість, а також відповідають всім вимогам міцності, стійкості і жорсткості на фронтальний вітер згідно чинних норм. Задачами є виявлення власних частот коливань досліджуваних споруд, оцінка критичних швидкостей та потенційних форм власних коливань, розрахунок на вихрове збудження споруд і порівняння визначених зусиль із зусиллями від фронтального вітру, узагальнення і напрацювання рекомендацій щодо врахування одночасної дії фронтального вітру і вихрового збудження.

Методика досліджень

Дослідження споруд виконуються за методикою для розрахунку споруд на вихрове збудження за EN 1991-1-4:2005. Розрахунок на вихрове збудження ґрунтується на закономірностях амплітудного відхилення верху довгого елемента в турбулентному потоці повітря або рідини. Тому першим визначальним етапом є визначення амплітудного значення переміщень верхньої точки споруди з рівняння:

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

де $y_{F,max}$ - амплітуда коливань;

S_t - число Струхалія;

S_c - число Скруттона, що визначає схильність конструкції до коливань в аеродинамічному середовищі і визначається за формулою:

$S_c = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}$ де δ_s - логарифмічний декремент затухань, ρ - густина повітря, $m_{i,e}$ - приведена еквівалентна маса на одиницю довжини споруди.

b - ширина споруди у площині, перпендикулярній дії вітру;

K - коефіцієнт форми коливань;

K_w - коефіцієнт кореляції;

C_{lat} - коефіцієнт дії поперечної сили.

Після визначення амплітуди рекомендується визначати зусилля за формулою:

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

де: $m(s)$ - розподілена маса конструкції;

$n_{i,y}$ - власна частота коливань;

$\Phi_{i,y}(S)$ - функція форми коливань;

$y_{F,max}$ - амплітуда коливань.

Навантаження при цьому необхідно прикладати за спрощеними еквівалентними схемами (див. рис 4).

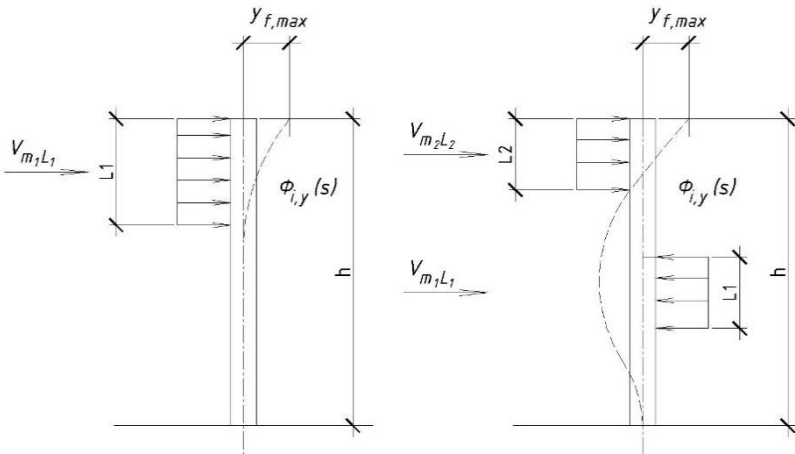


Рисунок 4 – Еквівалентні схеми прикладання інерційних мас для розрахунку баштових споруд на вихрове збудження за 1-ою і 2-ою формами власних коливань

Критична швидкість вітру, при якій відбувається вихрове збудження за і-формою власних коливань, визначається за формулою:

$$V_{cr,i} = \frac{n_i d}{S_t},$$

де n_i – і-та частота власних коливань, d – середній діаметр споруди, S_t – число Струхала, яке для перерізів з гострими кромками приймається 0,11. Навіть при наявності в системі ступінчастих конструкцій секцій круглих перерізів приймаємо число Струхала як для прямокутних перерізів.

У рамках дослідження проведений аналіз чотирьох реально реалізованих споруд – рекламних пілонів «Макдональдз» висотою 12,355

22, 25,575 м та флагштоку висотою 48 м. Креслення і геометрія споруд наведена на рис 5, 6, 7, 8.

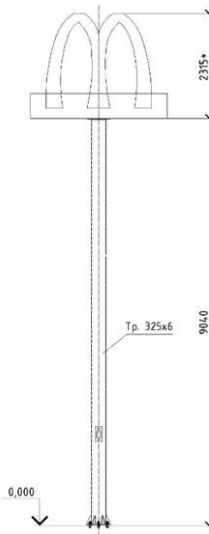


Рисунок 5 – Пілон «Макдональдз» висотою 12.355 м

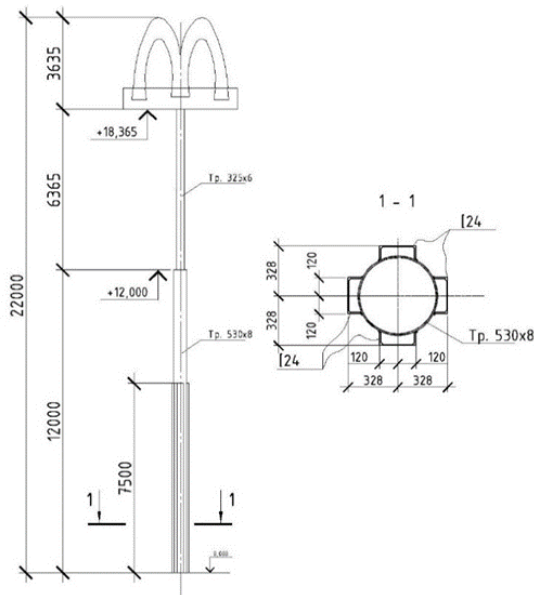


Рисунок 6 – Пілон «Макдональдз» висотою 22 м

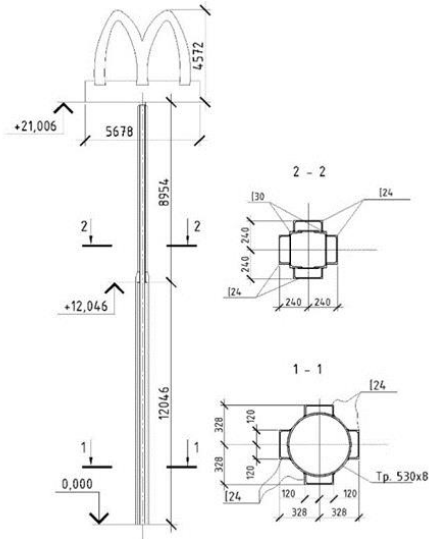


Рисунок 7 – Пілон «Макдональдз» висотою 25,575 м

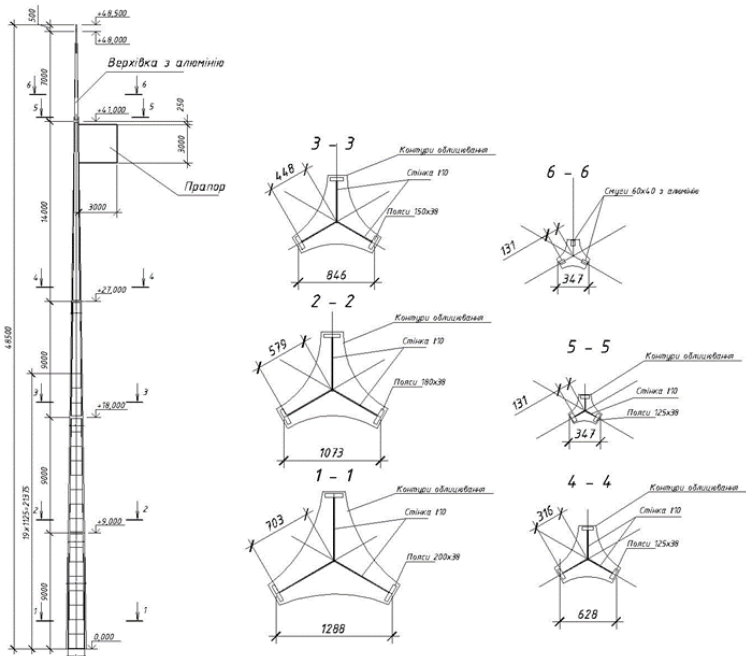


Рисунок 8 – Флагшток висотою 48 м

Результати досліджень баштових споруд на вихрове збудження

Власні періоди коливань по формах 1, 2, 3 розраховані модальним аналізом у програмному комплексі SCAD. Був проведений розрахунок критичної швидкості вихрового збудження, дані якого внесені до таблиць 1, 2, 3, 4. Цей розрахунок показав, що вихрове збудження найбільш ймовірно може відбуватися за першою власною формою коливань. Друга частота може виникати у флагштоці висотою 48 м при усередненій швидкості вітру 17,1 м/с. Третя форма коливань для даних споруд нереалістична в умовах вітру Київщини, де швидкість вітру не перевищує 25 м/с.

Таблиця 1 – Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для пілону 11,355 м

Частота коливань*, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань
1,2	3,54	1 форма

*друга і третя частота виходять за межі резонансних і не враховуються при аналізі в SCAD.

Таблиця 2 – Результати розрахунку на власні частоти коливань і критичні швидкості вихрового збудження для пілону 22 м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань
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 пілону 25,575 м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань
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 флагштоку 48 м

Частота коливань, Гц	Критична швидкість м/с	Форма власних коливань
0,679	5,54	1 форма
2,09	17,1	2 форма
3,71	30,5	Не відбувається

Таким чином, автоколивання від вихрового збудження можуть відбуватися вже при дії слабкого та помірного вітру із швидкостями від 3,54 до 5,82 м/с і саме ці коливання можна визначити на практиці, спостерігаючи за спорудами пілонів і флагштоків. При чому вони обов'язково з'являються за будь-якої швидкості вітру, що вища за критичну, у тому числі при дії максимального за швидкістю вітру, характерного для даної місцевості. Тому вихрове збудження не слід враховувати як окреме явище. Зусилля і напруження від нього в площині, перпендикулярній до напрямку дії вітру, слід враховувати в сумі з зусиллями від фронтального вітру, у тому числі і максимального розрахункового, оскільки при дії пориву будь-якої сили одразу відбувається явище зриву вихорів з доріжкою Кармана і споруда входить в затухаючі коливання під впливом інерційних мас.

Розрахунок споруд на фронтальний вітер та вихрове збудження за першою власною формою за EN 1991-1-4:2005 внесений до таблиці 5. У порівнянні з дією фронтального вітру, зусилля від вихрового збудження складають для досліджуваних конструкцій від 2,9 до 43,5%

Таблиця 5 – Результати розрахунку конструкцій на вихрове збудження

Параметр	Розрахована конструкція			
	Пілон 11,355 м	Пілон 22 м	Пілон 25,572м	Флагшток 48 м
Момент в опорі від фронтального вітру M, кНм	47,4	323,9	483,0	857,7
Момент в опорі від вихрового збудження, M _w , кНм	1,404	43,6	75,4	373,25
$\frac{M_w}{M} \cdot 100\%$	2,9	13,5	15,6	43,5

Висновки

1. Вихрове збудження для баштових конструкцій є доволі серйозним фактором, який виникає незалежно від інтенсивності дії фронтального вітру на споруду за умови, що швидкість цього вітру перевищує критичну для

даної споруди. Рівень додаткових зусиль від вихрового збудження для досліджуваних конструкцій складає від 2,9 до 43,5% від зусиль при розрахунку на фронтальний вітер, однак згинальні моменти з'являються у площині, перпендикулярній до дії вітру. Вплив вихрового збудження збільшується нелінійно з висотою споруди і пояснюється збільшенням маси внаслідок збільшення жорсткості відповідно до зусиль при збільшенні висоти. Для споруд висотою до 15 м він незначний. Результати розрахунку на вихрове збудження слід додавати у вигляді векторної суми до розрахунків на фронтальний вітер, оскільки під час гіпотетичної дії максимального розрахункового пориву відбуваються вихрові зриви та проявляються коливання від вихрового збудження.

2. Інтенсивність коливань від вихрового збудження залежить від аеропружних характеристик системи, що виражені через число Скрутона, її власної частоти коливань, розподілу мас, загальної конфігурації, матеріалу та не залежить від швидкості фронтального вітру. Швидкість вітрового напору при цьому повинна перевищувати критичну.

3. Розраховані критичні швидкості вітрів вказують на те, що вихрові збудження у спорудах за першою формою власних коливань відбуваються вже при незначних вітрах – для досліджуваних споруд від 3,54 до 5,82 м/с, що свідчить про велику кількість коливальних циклів. Це питання потребує подальшого дослідження з точки зору встановлення обмеження напружень за межею витривалості.

4. Прояв вихрового збудження за другою і третьою формами власних частот також можливий при великих швидкостях вітрів і залежить індивідуально від параметрів конструкцій. Так, виявилось, що для досліджуваного флагштоку висотою 48 м можливий прояв вихрового збудження за другою формою власних коливань при рідко повторюваній швидкості вітру для м. Київ 17.1 м/с. Аналогічно в праці наведено, що в спорудах можуть виникати коливання за другою і третьою власними формами і при цьому зусилля перевищують зусилля від фронтального вітру. Оцінка періодичності проявлення таких коливань я з точки зору розрахунків на витривалість на багатоциклову втому ускладнюється тим, що необхідно проводити метеоспостереження для індивідуальних умов майданчика протягом досить тривалого часу, до 50 років. Тому, якщо споруди виключно мають функціональне призначення і їм властивий прояв вихрового збудження за другою і третьою власними формами коливань при реальному діапазоні вітрів для даної місцевості, то доцільно обмежувати прояв

вихрового збудження конструктивними заходами. До таких заходів відносяться маятники, наварювання лопатей і спіралеподібних загашувачів тощо.

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.449-47222.
2. Simiu E., Scanlan R.H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York: John Wiley, 1996, 704 p.;
3. Pichugin S.F., Makhin'ko A.V. Vetrovaya nagruzka na stroitel'nyye konstruksii. Poltava: Izd-vo «ASMI», 2005, 342 s.;
4. Pichuhin S.F. Tendentsii rozvytku norm vitrovoho navantazhennia na budivelni konstruksii / S.F. Pichuhin // Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: Zb. nauk. prats. Vyp. 18. – Lutsk: Luts. NTU, 2022. – S. 98 – 116. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-12)
5. 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>
6. 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
7. 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
8. 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>
9. 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>
10. 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 [Article@大型风力机塔筒与叶片涡激共振机理研究] (2023) Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica, 44 (10), pp. 306-312. <http://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-084>

Література

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.449-4722.
2. Simiu E., Scanlan R.H. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. New York: John Wiley, 1996, 704 p.;
3. Пичугін С. Ф., Махинько А. В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. – Полтава: Изд. АСМІ, 2005. 342 с.;
4. Пічугін С.Ф. Тенденції розвитку норм вітрового навантаження на будівельні конструкції / С.Ф. Пічугін // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: Зб. наук. праць. Вип. 18. – Луцьк: Луц. НТУ, 2022. – С. 98 – 116. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8\(18\)-12](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2022-8(18)-12)
5. 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>
6. 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
7. 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
8. 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>
9. 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>
10. 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 [Article@大型风力机塔筒与叶片涡激共振机理研究] (2023) Taiyangneng Xuebao/Acta Energiæ Solaris Sinica, 44 (10), pp. 306-312. <http://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-084>