

А.М. Шостачук, к.т.н., доц.

Д.М. Шостачук, к.т.н., доц.

Житомирський державний технологічний університет

## АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ КОЛИВАННЯМИ ВИСОТНИХ СПОРУД ЗА ДОПОМОГОЮ МАЯТНИКОВОЇ СИСТЕМИ

*Дано аналіз заходів для зменшення коливань висотної споруди. Розглянуто можливість управління коливаннями за допомогою маятникової системи. Запропоновано модель взаємодії маятника і висотної споруди з метою зменшення її коливань.*

**Вступ.** Висотні споруди є об'єктами підвищеного ризику [1], пов'язаного зі збільшеними тисками на опори, вразливістю висотної споруди від дії вітрового та сейсмічного навантажень, пожеж та терористичних дій. До проблем, що виникають при зведенні висотних споруд, також відносять: значне збільшення транспортного й інженерного навантаження на територію, безпосередньо прилеглу до будівлі; необхідність детального і точно вивіреного конструктивного рішення, тобто вибору моделі й методу будівництва висотної споруди, що повинні задовольняти не лише функціональній складовій, але і довкіллю; підвищена значущість дії ряду техногенних чинників (вібрація, шуми, локальні руйнування) на безпеку експлуатації; використання дорогих будівельних матеріалів; складність інженерних систем і комунікацій, обумовлена висотою будівлі, що вимагає створення додаткових інженерних вузлів (технічних поверхів); споживання надмірної кількості енергії; візуальна дія, що виражається через радикальну зміну силуету прилеглої території; проблеми збору і вивезення сміття; велика капіталоемність будівництва, складність організаційних і технологічних рішень в процесі зведення і експлуатації будівель; затінення великої території; погіршення якості життя в прилеглих районах; негативна дія на здоров'я людей, які працюють у будівлі та ряд інших. Вирішення зазначених проблем потребує комплексного підходу, що полягає у створенні автоматизованих систем по забезпеченню комфорту та безпеки перебування людей у висотних спорудах [2].

**Актуальність проблеми.** Одне з навантажень, що діє на висотну споруду і в той же час найскладніше піддається моделюванню – вітрове [3, 4]. На сьогодні є сформованим комплекс вимірювальної апаратури для дослідження поведінки висотних споруд при вітровому навантаженні [5], що дає можливість реєструвати власні та наведені коливання в напрямках вздовж та поперек будівлі, а також пульсації атмосферного тиску. Власні частоти коливань сучасних висотних споруд можуть знаходитися в тому ж інтервалі, що і середні частоти повторення інтенсивних поривів вітру. Отже, при розрахунках необхідно враховувати резонансні явища, до яких може призвести дія вітру. Якщо точка прикладення рівнодійного вітрового навантаження не співпадає з центром жорсткості споруди, то виникають круті моменти. Зменшення коливань висотної споруди є важливою і в той же час складною задачею, оскільки важливо задовольнити нормативні вимоги до допустимих величин прогинів верхньої частини будівлі (1/500 без урахування деформацій основи) і прискорення горизонтальних коливань споруди від динамічної складової вітрових впливів не більше  $0,1 \text{ м/с}^2$ .

Підвищення опору будівлі вітровим навантаженням можна досягти також і шляхом надання певної форми в плані. Численні зарубіжні та вітчизняні дослідження, виконані продуванням моделей в аеродинамічних трубах і комп'ютерною симуляцією за допомогою програмного забезпечення, показали, що оптимальною формою плану висотної будівлі є круг або фігура, близька за формою до круга [6]. Еліптична і квадратна форми хоча і поступаються круглій, але також забезпечують достатню опірність будівлі горизонтальним навантаженням. Як приклад можна навести будівлі Marina City (США), Petronas Towers (Малайзія), Tairei 101 (Тайвань). Інші висотні будівлі близької поверховості мають аналогічні контури в плані.

Для усунення вказаних протиріч в особливо високих будівлях (300 м і більше) на верхніх поверхах влаштовують пасивні маятникові демпфери. Зокрема, такий демпфер встановлений у вежі Tairei 101. Він має вагу близько 800 т, підвішений за допомогою тросів на 92-му поверсі і призначений для гасіння інерційних коливань. У звичайних умовах експлуатації демпфер забезпечує відхилення верха будівлі в межах до 10 см, а при діях катастрофічного характеру (тайфуни, землетруси та ін.) сам розгойдується з амплітудою до 150 см, гарантуючи коливання будівлі у безпечних межах.

До ефективних засобів зменшення коливань висотних споруд відносять [7]: зменшення поверхневої маси по висоті споруди, так звані аутригерні структури, аеродинамічну модифікацію, збільшення власної частоти коливань, збільшення масової густини, застосування демпферів, зокрема гідравлічних.

Маятникова система, як механізм зменшення коливань висотної споруди є однією з найбільш ефективних, оскільки є активним захистом висотних споруд від динамічного впливу вітрового навантаження або сейсмічних поштовхів. Маятникова система дозволяє уникнути руйнувань висотної

споруди в тих умовах, коли пасивний захист буде недостатньо ефективним. Але маятникові системи мають і деякі недоліки, що можуть дещо обмежити їх використання у висотних спорудах. Це, в першу чергу, значні розмір та маса маятника, необхідність забезпечення надійних систем кріплення та утримання маятника в необхідному положенні, відповідного простору висотної споруди, який повинен бути зарезервованим на стадії проектування висотної споруди, суворого і безумовного дотримання правил техніки безпеки, систем фіксації кінематичних та динамічних характеристик руху маятника.

Використання маяткової системи знайшло місце лише у висотній споруді Таіреї 101, що, можливо, свідчить, в першу чергу, про складність даної системи, її унікальність для кожної висотної споруди та високу вартість. Однак її можливості і результати застосування свідчать про сприятливі перспективи подальшого використання маяткової системи у висотних спорудах, особливо якщо враховувати вартість останніх та необхідність створення безпечних та комфортних умов перебування для великої кількості людей. В той же час є апробованими методики застосування динамічних гасителів коливань спеціальних споруд, зокрема коливань масивних споруд, які взаємодіють з ґрунтом [8].

На сьогоднішній день практично відсутні публікації, в яких би було досліджено загальні підходи до використання маятникових систем у висотних спорудах, зокрема обґрунтування їх доцільності, визначення параметрів, структура та функціонування автоматизованих систем управління маятниковими системами тощо. В той же час, очевидно, що при збільшенні поверховості висотних споруд потреба в маятникових системах, як ефективних системах захисту буде зростати, оскільки на перший план виходить не вартість розробки та функціонування таких систем, а їх здатність убезпечити висотну споруду від руйнування.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо структуру маяткової системи та її взаємодію з висотною спорудою. Очевидно, що призначенням маяткової системи є отримання характеристик, що визначають стійкість висотної споруди, в певних (допустимих) межах. Оскільки висотна споруда є механічною системою, яку, наближено можна представити у вигляді балки (стрижня), такими характеристиками є: відхилення верхівки споруди від вертикалі, швидкість її руху та прискорення. Маяткова система складається (рис. 1) з трьох підсистем – власне самого маятника (блок 2 на рис. 1), інформаційної та механічної (блоки відповідно 3 і 4 на рис. 1). Механічні пристрої забезпечують кріплення маятника (блок 4.3), утримання його в певному положенні (блок 4.1) та гальмування (блок 4.2). Інформаційна система представляє собою сукупність датчиків, які надають дані про кінематичні характеристики руху маятника (блок 3.1.), власне висотної споруди (блок 3.2) та датчики аналізу працездатності всієї маяткової системи (блок 3.3). При цьому роль нерухомої системи координат виконує земля або прилеглі будівлі невеликої поверховості.

Інформація від датчиків кінематичних характеристик передається на механічні підсистеми маятника, що здійснюють пуск маятника в необхідний момент. Після зменшення амплітуди до коливань мінімальних значень здійснюється зупинка (гальмування).

Розглянемо вплив особливостей висотної споруди на вибір маятника. Можна виділити три групи характеристик, за якими необхідно узгоджувати маятник і висотну споруду. Перша група характеристик – кінематичні, до яких відносяться кутова швидкість і кутове прискорення маятника при русі, період коливань.

Ці характеристики впливають на час введення маятника у взаємодію з висотною спорудою та час зупинки (гальмування маятника). Силкові характеристики – це вага маятника та тиск, який він здійснює при русі на висотну споруду. Вага маятника та амплітуда його коливань безпосередньо визначає швидкість затухання коливань висотної споруди. Геометричні характеристики – довжина маятника, розмір сфери та момент інерції. Геометричні характеристики визначають можливість розташування маятника в границях виділених поверхів, тип і розміри відповідних систем управління.

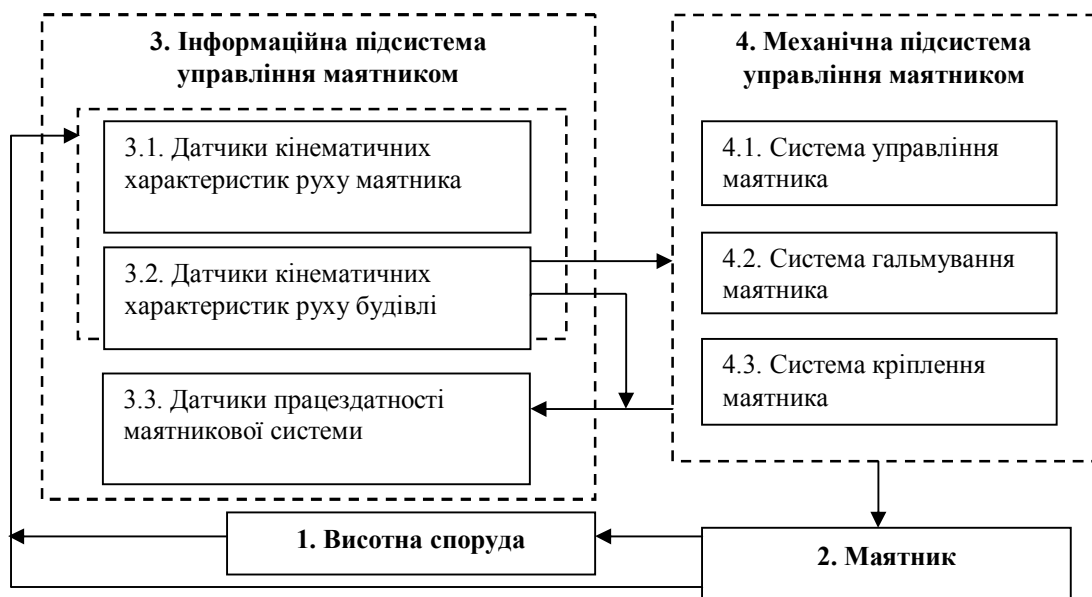


Рис. 1. Взаємозв'язок систем "висотна споруда" і "маятник" та їхніх підсистем

Метою застосування маятника є зменшення амплітуди коливання висотної споруди. Це досягається включенням маятника в коливальний процес таким чином, щоб коливання споруди і маятника знаходились у протифазі, тоді сумарне значення відхилення верхівки висотної споруди буде визначатись:

$$f_{\Sigma} = f_a - f_i, \tag{1}$$

де  $f_a$  – відхилення верхівки висотної споруди від вертикалі, викликане дією вітрового навантаження або сейсмічного поштовху;  $f_i$  – відхилення маятника.

Закон розподілення швидкостей вітрового потоку має вигляд ступеневої або логарифмічної залежності відповідно до [8]:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^{\alpha}, \text{ або } \frac{V_2}{V_1} = \frac{\ln(h_2/l_0)}{\ln(h_1/l_0)}, \tag{2}$$

де  $V_2$  і  $V_1$  – відповідно швидкості вітру на висотах  $h_2$  і  $h_1$ ;  $\alpha$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від швидкості вітру, стійкості атмосфери і шорсткості поверхні;  $l_0$  – висота елементів шорсткості.

Далі, потужність вітрового потоку, який проходить через елементарний переріз  $dS$  бічної поверхні висотної споруди, визначається залежністю [9]:

$$dP = \frac{\rho(V(h))^3}{2} dS, \tag{3}$$

де  $\rho$  – густина повітря.

Оскільки швидкість повітряного потоку залежить від висоти  $h$ , то, вираз (3) буде мати вигляд:

$$dP = \frac{\rho(V(h))^3 a}{2} dh, \tag{4}$$

де  $a$  – горизонтальний розмір бічної поверхні висотної споруди.

Для довільної ділянки  $\Delta h$  фігура, обмежена віссю  $h$ , двома перпендикулярними до неї прямими та графіком функції  $V=V(h)$  буде представляти собою криволінійну трапецію.

Нормативне значення середнього вітрового тиску на висоті ( $y$ ) від поверхні землі також можна визначити за формулою [4]:

$$W(y) = W_0 k_1(y) k_2 k_3, \tag{5}$$

де  $W_0$  – нормативне значення середнього вітрового тиску на висоті  $y = 10$  м для даного вітрового району при 10-ти хвилинному інтервалі осереднення і тривалості спостережень 5 років;  $k_1(y)$  – коефіцієнт, який враховує зміну вітрового тиску по висоті;  $k_2$  – коефіцієнт, який враховує зміну вітрового тиску залежно від часу осереднення при замірах середньої швидкості;  $k_3$  – коефіцієнт, який враховує зміну вітрового тиску залежно від кількості років спостережень.

Наприклад [4], якщо вибрати величину  $k_2$  за умови осереднення  $t = 3$  с, що відповідає тривалості дії поривів вітру з максимальною енергетикою, а коефіцієнт  $k_3$  за умови спостережень 50 років, то для II вітрового району Росії на висоті 100 м можна отримати розрахункове значення  $W = 182 \text{ кгс/м}^2 = 1,82 \text{ кПа}$ , що відповідає швидкості вітру 54 м/с (в американських стандартах швидкість на висоті 100 м приймається 63 м/с).

Розглянемо процес коливання висотної споруди. Вільні коливання, що не затухають, будуть описуватись рівнянням:

$$x = a \sin(\omega t + \alpha), \quad (6)$$

де  $a$  – максимальна амплітуда коливань;  $t$  – час;  $\alpha$  – початкова фаза;  $\omega$  – кутова швидкість коливань, з розв'язку відповідного диференціального рівняння 2-го порядку маємо [10]:

$$\omega = \sqrt{\frac{EF}{ml}}, \quad (7)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $F$  – площа поперечного перерізу стрижня;  $l$  – довжина стрижня;  $m$  – маса стрижня.

Далі розглянемо процес коливань фізичного маятника. Частота його коливань визначається за відомою формулою як корінь квадратний з відношення довжини маятника до прискорення вільного падіння [11].

Визначені за наведеними вище формулами власні частоти коливань висотної споруди і маятника свідчать про суттєву, практично на порядок, їх різницю (відповідно 0,059 і 0,443), звідки можна зробити такий важливий висновок: під час коливань висотної споруди для їх зменшення необхідно тільки періодично запускати маятник у напрямку, протилежному коливанню висотної споруди. Особливістю оцінки поточного стану висотної споруди є те, що необхідно піддавати аналізу 3 величини: переміщення деякої точки висотної споруди, наприклад, її верхівки, швидкість її руху та прискорення. Для прикладу розглянемо дві ситуації. У першій – висотна споруда відхиляється на значну величину під дією вітрового навантаження. Якщо дія вітрового навантаження зменшується поступово, то висотна споруда буде повертатись у початковий стан з порівняно невеликими швидкістю і прискоренням, тобто такий процес не буде вимагати задіяти маятникову систему. Якщо ж висотна споруда, після відхилення рухається в напрямку рівноважного стану зі збільшенням швидкості, або якщо висотна споруда, що мала практично нульове відхилення від вертикалі, починає через різкий порив вітру або підземний поштовх коливальний рух, очевидно, дана ситуація вимагає використання маятникової системи з метою зменшення коливань.

Таким чином, пріоритет врахування вхідних величини для використання маятникової системи з метою зменшення коливань висотної споруди пропонується такий:

- 1) прискорення, яке за напрямком співпадає з вектором швидкості; якщо споруда рухається в бік збільшення відхилення верхівки споруди від вертикалі:  $a > 0, V > 0, df > 0$ ;
- 2) якщо має місце значне прискорення при початкових нульових значеннях відхилення і швидкості:  $a = a_{\max}, V = 0, df = 0$ ;
- 3) прискорення, яке за напрямком співпадає з вектором швидкості; якщо споруда рухається в бік зменшення відхилення верхівки споруди від вертикалі:  $a > 0, V > 0, df < 0$ ;
- 4) якщо вектори швидкості і прискорення спрямовані в протилежні боки і споруда рухається в бік збільшення відхилення:  $a < 0, V > 0, df > 0$ .

На рисунку 2 представлено алгоритм, який використовується при прийнятті рішення про включення маятника.

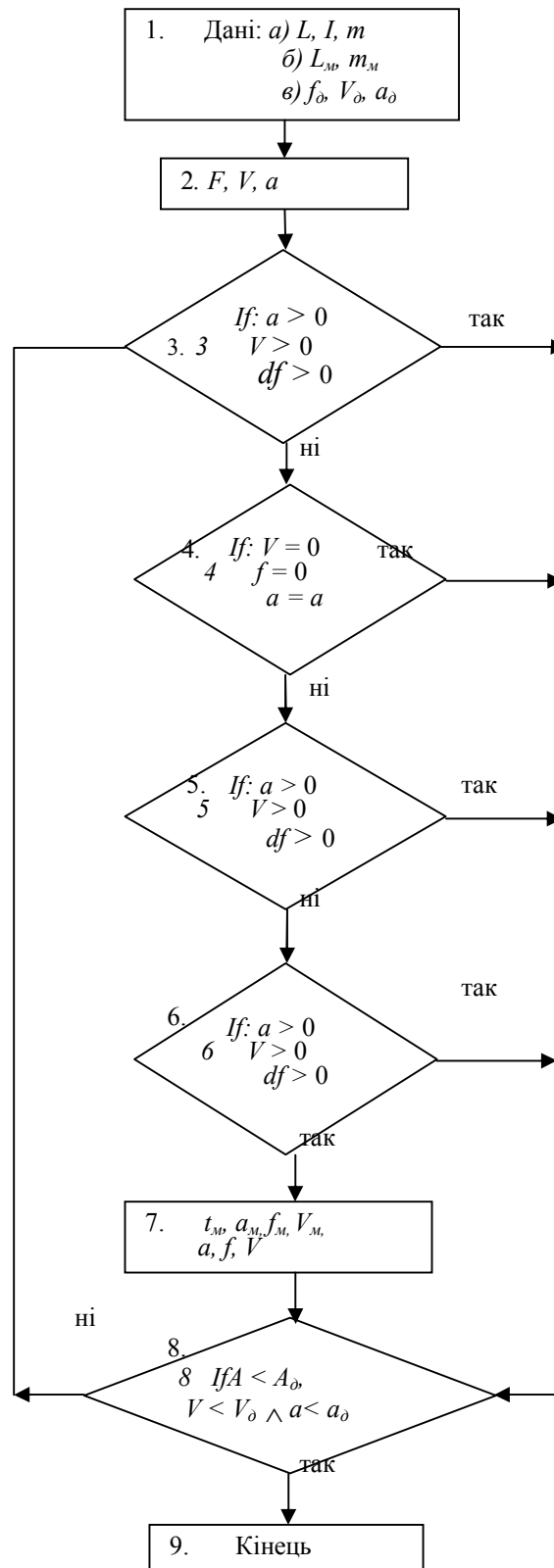


Рис. 2. Блок-схема програми для управління коливаннями висотної споруди

У блоці 1 задаються геометричні характеристики висотної будівлі, маятника і допустимі значення відхилення значень кінематичних характеристик. У блоці 2 розраховуються значення амплітуди, кутових швидкості та прискорення коливального руху висотної споруди. У блоках 3–6 здійснюється порівняння кінематичних характеристик руху будівлі з нулем і допустимими значеннями для даної споруди. За

необхідності дається команда про початок руху маятника (блок 7). У блоці 8 здійснюється порівняння поточних значень кінематичних характеристик руху висотної споруди з допустимими і, якщо умови не виконуються, подається нова команда в систему управління маятником.

На рисунку 3 зображено графіки коливань висотної споруди без керування маятником та коливання за наявності у висотній споруді маятника (графіки відповідно  $f_j$  та  $f_{sum_j}$ ). Розрахунок коливань було зроблено за таких допусків: висотна споруда представлена у вигляді стрижня з матеріалу конструкції висотної споруди, що несуть основне навантаження, закріплення стрижня – консольне, вітрове навантаження (силовий фактор) направлено перпендикулярно до осі стрижня, деформації матеріалу стрижня – пружні, вплив вітрового навантаження припиняється після відхилення висотної будівлі на максимальну величину, дисипація, обумовлена опором повітряного середовища та внутрішнім тертям у матеріалі конструкції, відсутня.

Кінцева розрахункова формула для отримання графіка на рисунку 3 має вигляд:

$$f_{sum_j} = f_j - f_i, \quad (8)$$

де  $f_j$  – відхилення висотної будівлі, викликане вітровим навантаженням;  $f_m$  – відхилення висотної будівлі, викликане рухом маятника.

Як видно, період коливань висотної споруди (довжин – 300 м, розміри в плані: 40 x 40 м<sup>2</sup>) становить 106 с. При використанні маятника останній починає рух на 7-й секунді, причому він рухається в напрямку, протилежному напрямку руху будівлі.

Протягом приблизно 5 с відбувається зменшення амплітуди коливань на 0,12 м, після чого маятник є нерухомим, а амплітуда коливань споруди становить:

$$f_{sum_j} = f_j - 0,12. \quad (9)$$

Спостерігається також деяке  $\approx 10\%$  зменшення першого півперіоду коливань. Під час наступного півперіоду відбувається запуск маятника в протихід руху будівлі і відповідне зменшення амплітуди на ту ж саму величину, яка буде становити 0,185 м. Застосування маятника на початку третього півперіоду зменшує амплітуду коливань маятника до нуля і коливання припиняються.

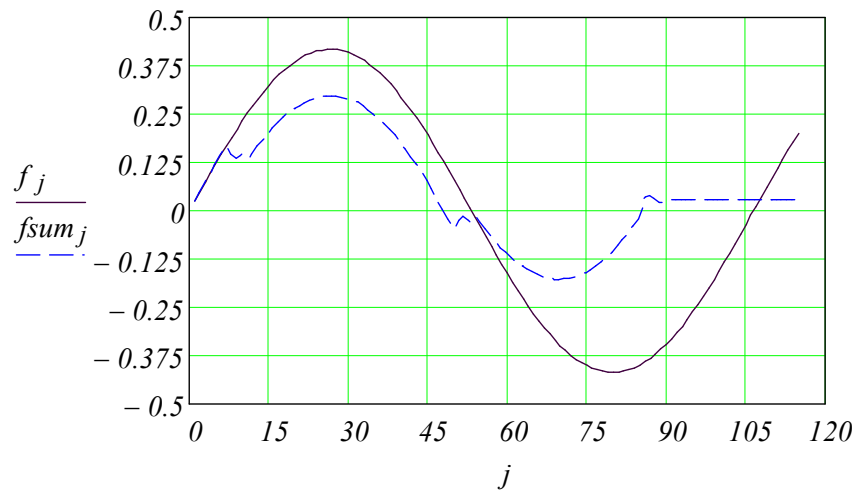


Рис. 3. Управління коливаннями висотної споруди маятником: графіки коливань висотної споруди без маятника та з маятником, відповідно  $f_j$  та  $f_{sum_j}$ ,  $j$  – секунди

#### Висновки:

1. Коливання притаманні висотним спорудам і є в той же час небезпечним явищем, яке погіршує умови перебування людей у висотних спорудах і може спричинити руйнування самих висотних споруд.

2. Обов'язковою складовою висотних споруд є заходи або системи, призначені для зменшення коливань висотної споруди. До таких заходів належать: особливості геометричної форми, аутригерні та маятникові системи.

4. Одним з найбільш дієвих заходів по захисту висотної споруди від небезпечних коливань є маятникова система, за допомогою якої, як показали розрахунки, є можливість досить швидко припинити коливальний процес, викликаний одноразовою дією вітрового навантаження або підземним поштовхом. Це свідчить про хороші перспективи використання маятників у конструкціях висотних і, особливо, надвисоких споруд, враховуючи високу вартість останніх.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Шостачук А.М. Виникнення екологічних небезпек при зведенні висотних споруд в умовах міської забудови / А.М. Шостачук // тези VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Практична космонавтика і високі технології», присвяченої 100-річчю з дня народження академіка С.П. Корольова, м. Житомир, 9–11 січня, 2007. – С. 92–93.
2. Шостачук Д.М. Комплексна система безпеки перебування людей у висотних спорудах: системний підхід / Д.М. Шостачук, А.М. Шостачук // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – 2010. – № 3 (54). – С. 128–134.
3. Гончарова А.Г. Небезпечні коливання висотних споруд / А.Г. Гончарова, В.С. Сорочинський, А.М. Шостачук // Тези VII Міжнар. наук. конф. студентів, магістрів та аспірантів «Сучасні проблеми екології та геотехнологій», Т. 2, 24–26 березня 2010 року. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – С. 206207.
4. О воздействии ветра на высотные монолитные здания / С.М. Ганин, А.С. Гузев, А.О. Лебедев и др. // «СтройПРОФИль». – 8 (54) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.spf.ccr.ru/archive/2427>.
5. Инструментальное измерение ветровых колебаний высотных зданий / В.М. Острецов, Л.Б. Гендельман, А.Б. Вознюк, Н.К. Капустян [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.stroinauka.ru/d18dr5250m2.html>.
6. Копилов О.С. Аеродинамічна інтерференція систем висотних будівель і споруд циліндричної форми : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / О.С. Копилов // Національний ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2005.
7. Stoyan Stoyanoff Ветровые загрузки: проблемы и решения / Stoyan Stoyanoff, Jmiming Xie // Высотные здания / Tall Buildings. – № 2. – 2007. – С. 82–85.
8. Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций. – М. : Стройиздат, 1986. – 464 с.
9. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Резо : пер. с англ. ; под ред. Я.И. Штефтера. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
10. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев. – К. : Наук. думка, 1988. – 736 с.
11. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. – М. : Наука, 1972. – 480 с.

ШОСТАЧУК Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- екологія міста;
- стійкість висотних споруд;
- інженерна геологія.

ШОСТАЧУК Дмитро Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації і комп'ютеризованих технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи оптимізації;
- системний аналіз складних об'єктів управління;
- математичне моделювання на ЕОМ.

Подано 22.09.2011