

DOI: 10.32347/2076-815x.2024.86.388-396

УДК 528.48

к.т.н., доцент Дем'яненко Р.А.,

legend.geodesy@gmail.com, ORCID 0000-0002-5405-3840,

д.т.н., професор Анненков А.О.,

annenkov.ao@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0002-3618-5399,

Бондар С.А.,

bondar.sa@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0002-9378-6588,

к.т.н., професор Кузьмич О.Й.,

kuzmych.oy@knuba.edu.u, ORCID 0000-0003-1762-6344,

Циколенко О.В.,

tsykolenko.ov@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0001-9231-8400,

Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ДЕФОРМАЦІЇ ВИСОТНИХ СПОРУД В ПРОЦЕСІ ЇХ БУДІВНИЦТВА ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

При будівництві та експлуатації висотних споруд їх вертикальна вісь змінює своє положення в просторі. Чим вища споруда, тим більша амплітуда коливання. Це викликає проблеми геодезичного забезпечення будівництва та необхідність моніторингу деформацій під час експлуатації висотних споруд. В статті розглянуто та проаналізовано вплив зовнішніх сил на зміну геометрії висотної споруди та акцентовано увагу на вирішенні наукової проблеми геодезичного забезпечення будівництва та експлуатації сучасних висотних споруд в умовах динамічних навантажень.

Ключові слова: висотне будівництво; вертикальна вісь споруди; деформації висотної споруди; осідання; крен; вигин; сила вітру; сонячна радіація; температурні деформації.

Постановка проблеми. В сучасних умовах розвитку мегаполісів широке застосування має будівництво висотних будівель які використовуються для громадських потреб. Сучасне місто повинно мати своє унікальне обличчя, одним з елементів якого є сучасна архітектура, яка вже не існує без висотних будівель. Сучасні висотні будівлі сягають висот в сотні метрів. По мірі їх зведення, а в подальшому і експлуатації на споруду діють температурні коливання, які виникають в результаті нерівномірного прогрівання конструкцій сонячними променями та сила вітру, що в результаті викликають відхилення вертикальної осі висотної споруди від вертикальної лінії вздовж якої діє сила тяжіння. Дослідження впливу зовнішніх факторів на геометрію висотної

споруди дозволить вирішити наукову проблему геодезичного забезпечення будівництва та експлуатації висотних споруд. Тому, актуальним є розробка сучасних технологій та методів геодезичного забезпечення будівництва і моніторингу за деформаційними процесами, які можуть виникати під час експлуатації висотних споруд.

Аналіз досліджень і публікацій. Згідно з [1] приведено класифікацію висотних споруд, яка використовується в Світі, окрім того, в [2] наводяться типи баштових споруд та їх конструктивні особливості. Слід зазначити, що в [2] абсолютно відсутні висотні споруди громадського призначення, так звані «небосхили». Автором детально розглянуто вплив зовнішніх факторів на зміну геометрії баштових споруд, наведено формули з теоретичної механіки для моделювання зміни їх геометрії але, на жаль, не достатньо приділено увагу сучасним методам та технологіям геодезичного забезпечення при будівництві та моніторингу геометричних параметрів висотних споруд, а саме технологіям з використанням електронних тахеометрів та ГНСС. Автор згадує лише методи геометричного нівелювання для визначення осідань та кутові вимірювання за допомогою теодолітів. Питання геодезичного контролю зведення споруд розглядаються багатьма науковцями, зокрема в [3, 4, 5, 6].

Формулювання цілей. Традиційно, під час будівництва, висотну споруду вважали статичним об'єктом і коли мова йшла про відхилення геометрії споруди від проектних значень, то мали на увазі відхилення викликані похибками виконання геодезичних робіт, точності виготовлення конструкцій та точності монтажних робіт. Але висотні будівлі і споруди - це динамічні об'єкти, які під впливом таких зовнішніх сил, як сонячна радіація (температурні коливання) та вітрові навантаження, змінюють своє положення в просторі, тобто їх вертикальна вісь відхиляється від вертикальної лінії вздовж якої направлена сила тяжіння. Таким чином, висотна споруда має не просто крен, який традиційно визначався, а ще й вигин вертикальної осі споруди та кручення. Ці деформації ніяким чином не пов'язані з похибками виконання геодезичних чи монтажних робіт. Тому, як на стадії будівництва, так і на стадії експлуатації потрібно знати всі зміни в геометрії споруди, розуміти причини їх виникнення та їх природу.

Основна частина. Висотні споруди або будівлі – це вільно встановлені конструкції, закріплені в основі засобами власного фундаменту. Особливістю таких споруд є значне перевищення їх висоти над розмірами в плані.

Будь-які споруди, в процесі експлуатації, піддаються впливу зовнішніх сил, які викликають їх деформацію. Як правило, якщо мова йде про будівлі чи споруди, які не є висотними, то основні деформації пов'язані із зміною

положення по висоті або в плані, наслідком чого є поява тріщин в будівельних конструкціях.

Для кращого розуміння процесу деформації, яка виникає під дією сил, слід дати визначення цієї фізичної величини та привести перелік сил, які можуть діяти на висотну споруду та викликати її деформацію.

Отже, сила – це міра взаємодії двох тіл. В нашому випадку за перше тіло ми беремо висотну будівлю, а друге тіло – це зовнішнє середовище.

Подивимось на висотну будівлю через призму теоретичної механіки. Якщо висотну будівлю прийняти за тверде тіло, а згідно з механікою твердих тіл, твердими тілами називають тіла, які не змінюють своїх розмірів та форми, то така будівля не повинна змінювати свої розміри та форму. Але абсолютно твердих тіл в природі не існує, тому під дією сили в тілах виникають деформації. В залежності від напрямку дії сили та точки її прикладання і маємо виникнення змін в геометричних параметрах цих споруд.

Традиційно, в геодезії, відхилення геометрії споруд від проектних розмірів ми пов'язували з точністю геодезичних розмічувальних робіт, монтажних робіт та точності виготовлення конструкцій. Але в цій системі не вистачає впливу зовнішніх сил таких як вітер, температура. Які при збільшенні висоти суттєво впливають на зміну геометричних параметрів висотних будівель.

Отже, слід розібрати сили та деформації які виникають у висотних спорудах під їх дією. Деформація – це переміщення точок тіла в просторі. Згідно з [2] в будівельній механіці під переміщенням розуміють лінійні відхилення точок конструкції, кути повороту перерізів і їх комбінації під впливом силових навантажень. Тобто, переміщення – це вектор, який з'єднує положення точки на початку та в кінці переміщення протягом певного проміжку часу, напрямком якого співпадає з хордою траєкторії точки.

Наша задача - розділити поняття «відхилення» на дві складові частини, а саме: перша – це відхилення під час зведення споруд, які пов'язані з точністю, про що згадувалось вище; друга – вплив зовнішніх сил.

Таким чином, якщо уявити, що споруда будується з абсолютною точністю, то вона не матиме відхилень, але в процесі будівництва на споруду буде діяти наприклад, сила вітру, яка буде викликати відхилення осі споруди від вертикалі, що не можна не враховувати від час виконання детальних розмічувальних робіт.

Тому важливим є вивчення та детальний аналіз зовнішніх сил які діють на споруду в процесі як її зведення, так і експлуатації для визначення деформацій для попередження аварійних станів та руйнування висотних споруд.

Традиційно, щодо висотних споруд, при визначенні їх деформацій ми говорили про осідання і крен. Осідання могло бути рівномірним або

нерівномірним. Результатом нерівномірного осідання є крен. Тобто, в даному випадку мова іде про поведінку абсолютно твердого тіла але, як було зазначено раніше, в природі не буває абсолютно твердих тіл, тому додатково в споруді може виникати прогин осі споруди.

За даних умов ми розділяємо поняття крену та прогину висотної споруди. Під креном ми розуміємо процес деформації ґрунтової основи викликаний нерівномірністю осідання фундаментів і, як наслідок, нахилу вертикальної осі споруди.

Отже, як ми бачимо, зовнішні сили які діють на споруду викликають і різні види деформацій. Таким чином, ми виділяємо наступні основні сили які необхідно враховувати під час будівництва і експлуатації висотних споруд для визначення їх деформації: температура; сила вітру; сила тяжіння.

Вплив температури. Згідно молекулярно-кінетичної теорії будови речовин, будь-яка речовина складається з молекул, які знаходяться на певній відстані одна від одної. Молекули перебувають в хаотичному русі (тепловий рух) та постійно взаємодіють між собою притягуючись та відштовхуючись. Чим вища температура тіла, тим швидше рухаються молекули, тим самим збільшується середня відстань між ними і, відповідно, збільшується об'єм тіла. І навпаки, зі зниженням температури тіла рух частинок стає повільнішим, міжмолекулярні проміжки зменшуються і, відповідно, зменшується об'єм тіла. Таким чином, маємо залежність розмірів тіл від зміни температури.

Тепер слід розібрати як зміна температури впливає на зміну геометричних розмірів висотної споруди. Якщо висотну споруду змодельовати у вигляді прямокутника, то при зміні температури його розміри будуть змінюватись пропорційно, як по вертикалі, так і в плані (рис. 1).

$$\Delta h = H' - H = \alpha_t \cdot H \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$\Delta s = S' - S = \alpha_t \cdot S \cdot \Delta t, \quad (2)$$

де Δh , Δs – зміна розмірів споруди по висоті та в плані,

α_t – коефіцієнт пропорційності (тепловий коефіцієнт розширення матеріалу).

$\Delta t = t_2 - t_1$ – різниця початкової та кінцевої температур.

При будівництві висотних споруд несучі конструкції, в основному, виготовляються з залізобетону.

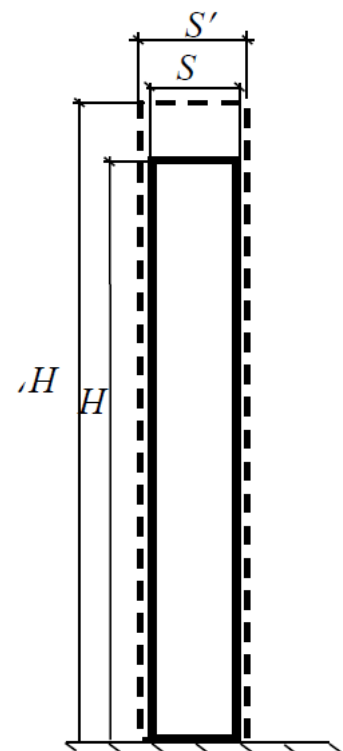


Рис. 1. Зміна розмірів споруди при зміні температур

Згідно з таблицею значень коефіцієнтів теплового розширення деяких матеріалів маємо:

- бетон $\alpha_t = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- залізо $\alpha_t = 11.1 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Як бачимо, коефіцієнти теплового розширення для заліза та бетону майже рівні. Тому, виконаємо розрахунок теплового розширення висотної споруди виготовленої з залізобетонних конструкцій у відповідності з формулами (1), (2), дані розмістимо в таблиці 1 та представимо у вигляді графіку (рис. 2).

Таблиця 1

матеріал	$\alpha_t \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$t_2, \text{ } ^\circ\text{C}$	$t_1, \text{ } ^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$Dh, \text{ мм}$
залізобетон	1.20E-05	50	20	100	36
	1.20E-05	50	20	200	72
	1.20E-05	50	20	300	108
	1.20E-05	50	20	400	144
	1.20E-05	50	20	500	180

При розрахунку температурного розширення було взято $t_2=50^\circ\text{C}$ $t_1=20^\circ\text{C}$, що цілком реально з точки зору умов експлуатації споруди.

З розрахунків видно, що при висоті споруди в 100 м при перепаді температур в $30 \text{ } ^\circ\text{C}$ теплове розширення складатиме 36 мм, а при висоті споруди в 500 м теплове розширення складатиме 180 мм, що значно перевищує допустиму точність передачі відмітки на монтажний горизонт згідно з ДБН В.1.3-2:2010 «Геодезичні роботи в будівництві», що для першого класу точності споруд складає $m=(2 + 10 \text{ Н})\text{мм} = 2+10 \cdot 1=12\text{мм}$ для висоти 100 м та 52 мм для висоти в 500м.

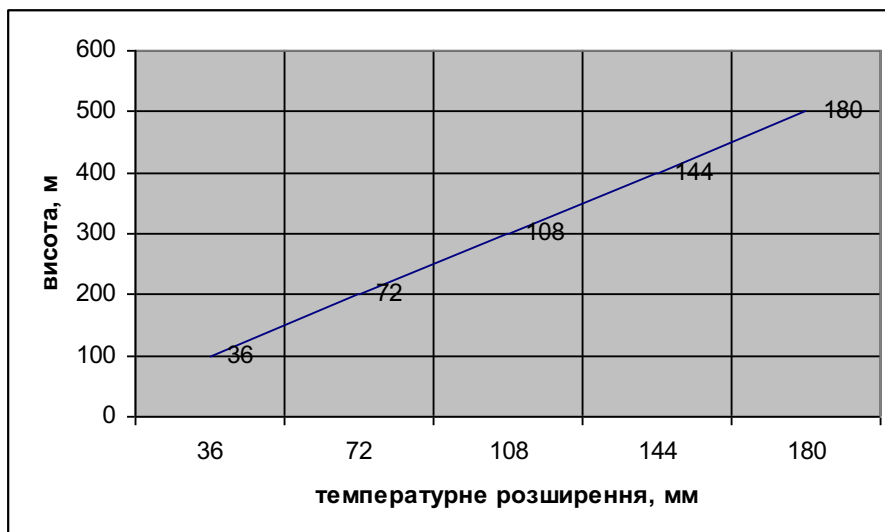


Рис. 2. Температурне розширення залізобетону в залежності від висоти.

При цьому, все вище викладене стосується рівномірного температурного розширення всієї будівлі, що викликає її рівномірне збільшення у розмірах.

А тепер, на вплив температури, слід поглянути з точки зору реальних умов експлуатації або будівництва, при яких, відбувається нерівномірний прогрів будівельних конструкцій. Тобто, частина конструкцій буде знаходитись в тіні і їх температура буде нижча за конструкції, які будуть знаходитись під впливом сонячного опромінення, температура яких буде значно вищою. Таким чином, споруда буде деформуватись в результаті нерівномірного теплового розширення, тобто буде вигинатись.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що при геодезичному забезпеченні будівництва та експлуатації висотних споруд слід враховувати зміни температурного режиму будівельних конструкцій в зв'язку із значними абсолютними величинами змін геометричних розмірів споруди в результаті теплового розширення, які значно перевищують точність регламентовану нормативним документом .

Вплив сили вітру. Аналогічно до впливу сонячної радіації на висотну споруду буде діяти і сила вітру, яка також викликатиме прогин осі споруди. Як відомо, сила вітру порівняно з температурним впливом матиме значно більший вплив на споруду.

Під дією сили вітру вісь споруди матиме прогин, абсолютне значення якого, буде залежати від швидкості вітру, висоти та форми споруди на яку він буде діяти спричиняючи тиск на її поверхню.

В [2] приведено таблицю зі шкалою Бофорта. Швидкість вітру визначена на висоту 10 м, що використовується для потреб будівництва (табл.2).

Таблиця 2

Характер вітру	Відмінна ознака	Сила вітру в балах	Тиск, Па	Швидкість вітру, м/с
Штиль	Дим піднімається вертикально	0	0	0
Тихий	Дим відхиляється	1	0,61	0,6-1,7
Легкий	Рух вітру відчувається обличчям	2	2,5-5,6	1,8-3,3
Слабкий	Рухаються листя	3	10-15	3,4-5,2
Помірний	Рухаються тоненькі гілки	4	22-40	5,3-7,4
Свіжий	Коливаються середні гілки	5	50-62	7,5-9,8
Сильний	Коливаються великі гілки	6	75-105	9,9-14,4
Міцний	Коливаються стовбури невеликих дерев	7	123-180	14,5-15,2
Дуже міцний	Ламає гілки, затримує людей	8	200-250	15,3-18,2
Шторм	Зриває дах, ламає дерева	9	276-306	18,3-21,5

Згідно з [2], швидкість вітру змінюється з висотою, тому до висоти 500-800 м вона збільшується на 70-100% відносно швидкості вітру безпосередньо біля поверхні землі. Окрім того, змінюється і його напрямок.

В [2] приведено формули з теоретичної механіки для розрахунку переміщення вільного кінця баштової споруди (в загальному випадку – стрижня консольного типу) від вітрового навантаження. В даному випадку приведені формули дозволяють визначити прогин осі висотної споруди від вітрового навантаження, тим самим демонструючи, що висотна споруда не є абсолютно твердим тілом і має декілька ступенів свободи. Таким чином, як під час будівництва, так і під час експлуатації таких споруд цей фактор потрібно враховувати, а не обмежуватись лише осіданням та креном. При цьому, автор говорячи про комплекс геодезичних робіт по визначенню просторового положення осі споруди зазначає лише про комплекс кутових вимірювань.

Висновки. Сучасні тенденції розвитку мегаполісів вимагають застосування нестандартних архітектурних та технічних рішень при проектуванні та будівництві будівель та споруд. Невід’ємною складовою сучасного міста є висотні будівлі та споруди. Висота в сотні метрів та вплив зовнішніх сил викликають зміни в геометрії висотних споруд, що ускладнює технології будівництва, унеможлиблює застосування класичних методів геодезичного забезпечення їх зведення. Тому, актуальним є дослідження факторів які впливають на зміни в геометрії висотної споруди та розробку сучасних технологій та методів геодезичного контролю, що дозволить вирішити наукову проблему геодезичного забезпечення зведення висотних споруд в сучасних умовах.

Список літератури:

1. Анненков А.О., Дем’яненко Р.А., Куліченко Н. Геодезичний моніторинг будівель, пошкоджених внаслідок військових дій, з використанням BIM-технологій. *Збірник наукових праць “Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва”* Випуск 2(46), 2023, стор.85-94 www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-46-85-94.
2. Бикташев М.Д. Башенные сооружения. Инженерный анализ осадки, крена и общей устойчивости положения / Учебное пособие: М. Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 376 с.
3. Shults, R., Annenkov, A. BIM and UAV photogrammetry for spatial structures sustainability inventory. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS*, 2023, 48(5/W2-2023), P. 99–104. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-99-2023>.

4. Медведський Ю.В., Анненков А.О., Ісаєв О.П., Дем'яненко Р.А. Автоматизація геодезичного моніторингу висотних споруд. *Містобудування та територіальне планування*. 2022. Вип. 57. С. 244-253. DOI: 10.32347/2076-815x.2022.81.244-253.

5. Анненков А.О., Дем'яненко Р.А., Ісаєв О.П., Бондар С.А. Сучасний стан проблеми геодезичного моніторингу будівель та споруд із застосуванням ГНСС-технологій. *II Международная научно-практическая конференция «MODERN TRENDS OF SCIENTIFIC DEVELOPMENT»*, Ванкувер, Канада 18-21 января. С. 447-450. DOI: 10.46299/ISG.2022.I.II.

6. Кузьмич О.Й., Лапицький І.В., Анненков А.О., Дем'яненко Р.А. Вдосконалення точності визначення подовженого зсуву мостових переходів/ *Society and science. Problems and prospects. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference*. London, England. 2022. Pp. 593-597. Available at: DOI: 10.46299/ISG.2022.I.III.

Ph.D., Associate Professor. **Demyanenko Roman**

Dr. of Engineering, Professor **Annenkov Andriy**,

Assistant **Bondar Svitlana**

Ph.D., Professor **Kuzmych Oleksandr**,

Assistant **Tsykolenko Olena**,

Kyiv National University of Construction and Architecture

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE DEFORMATION OF HIGH-RISE BUILDINGS IN THE PROCESS OF THEIR CONSTRUCTION AND OPERATION

During the construction and operation of high-rise buildings, their vertical axis changes its position in space. The greater the height of the structure, the greater the amplitude of oscillations. This causes problems of geodetic construction support and the need to monitor deformations during the operation of high-rise structures. In real conditions, part of the structures will be in the shade and their temperature will be lower than the structures that will be under the influence of solar radiation, the temperature of which will be much higher. Thus, the building will deform as a result of uneven thermal expansion, that is, it will bend. From DBN B.1.3-2:2010 "Geodesic works in construction". Also, during the geodetic provision of the construction and operation of high-rise buildings, changes in the temperature regime of building structures should be taken into account in connection with significant absolute values of changes in the geometric dimensions of the building as a result of thermal expansion, which significantly exceed the accuracy regulated by the

regulatory document. The article examines and analyzes the influence of external forces on changes in the geometry of high-rise structures and focuses attention on solving the scientific problem of geodetic support for the construction and operation of modern high-rise structures under dynamic loads.

Keywords: high-rise construction; vertical axis of the structure; deformation of the high-rise structure; subsidence; tilt; bending; wind force; solar radiation; temperature deformations.

REFERENCES

1. Annenkov A.O., Demianenko R.A., Kulichenko N. Heodezychnyi monitorynh budivel, poshkodzhenykh vnaslidok viiskovykh dii, z vykorystanniam VIM-tekhnologii. Zbirnyk naukovykh prats "Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva" Vypusk 2(46), 2023, stor.85-94 www.doi.org/10.33841/1819-1339-2-46-85-94. {in Ukrainian}
2. Byktashev M.D. Bashennyye sooruzheniya. Ynzhenernyyi analiz osadky, krena y obshchei ustoichyvosty polozheniya / Uchebnoe posobyе: M. Yzdatelstvo Assotsyatsyy stroitelnykh vuzov, 2006 – 376 s. {in Russia}
3. Shults, R., Annenkov, A. BIM and UAV photogrammetry for spatial structures sustainability inventory. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS*, 2023, 48(5/W2-2023), P. 99–104. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-W2-2023-99-2023>. {in English}.
4. Medvedskyi Yu.V., Annenkov A.O., Isaiev O.P., Demianenko R.A. Avtomatyzatsiia heodezychnoho monitorynhu vysotnykh sporud. Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia. 2022. Vyp. 57. S. 244-253. DOI: 10.32347/2076-815x.2022.81.244-253. {in Ukrainian}
5. Annenkov A.O., Demianenko R.A., Isaiev O.P., Bondar S.A. Suchasnyi stan problemy heodezychnoho monitorynhu budivel ta sporud iz zastosuvanniam HNSS-tekhnologii. II Mezhdunarodnaia nauchno-praktycheskaia konferentsyia «MODERN TRENDS OF SCIENTIFIC DEVELOPMENT», Vankuver, Kanada 18-21 yanvaria. S. 447-450. DOI: 10.46299/ISG.2022.I.II. {in Ukrainian}
6. Kuzmych O.I., Lapytskyi I.V., Annenkov A.O., Demianenko R.A. Vdoskonalennia tochnosti vyznachennia podovzhenoho zsuvu mostovykh perekhodiv/ Society and science. Problems and prospects. Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference. London, England. 2022. Pp. 593-597. Available at: DOI: 10.46299/ISG.2022.I.III. {in Ukrainian}