

**131 ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА**

УДК 624.04

doi: 10.32782/2225-6733.43.2021.3

© Голобоков В.С.\*

**АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
СТАЛЕВОЇ ОБОЛОНКОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ В НЕСУЧИХ СИСТЕМАХ  
КАРКАСІВ НАДВИСОКИХ БУДІВЕЛЬ**

На основі аналізу конструктивних систем каркасу надвисоких будівель запропонована узагальнена розрахункова схема хмарочоса, яка складається з зовнішньої оболонки, що опирається вітровому навантаженню, та внутрішніх конструкцій, визначаючих корисний об'єм будівлі. Такий підхід спрощує можливість аналізу численних конструктивних систем надвисоких будівель щодо до їх впливу на горизонтальну жорсткість хмарочосів. Проведені теоретичні дослідження напружено-деформованого стану оболонки під дією основних зовнішніх навантажень показали, що виконання умови горизонтальної жорсткості будівель незалежно від їх висоти веде до значного збільшення маси оболонки, витратам конструкційних матеріалів, потенціал міцності яких використовується не більш ніж на чверть.

**Ключові слова:** каркас надвисоких будівель, горизонтальна жорсткість, міцність, моделювання, напружено-деформований стан.

*V.S. Golobokov. Analysis of the stress-strain state of the steel shell structure in the bearing systems of the frames of ultra-high buildings. Based on the analysis of the structural systems of high-rise building frames, as well as the conditions of their external loading, a design scheme for the frame of skyscrapers is proposed, in which, subject to the rational placement of materials, those structures that resist horizontal impact are placed in the frame shell, and structures that perceive vertical load, form a stem. The selected calculation scheme reflects the maximum rational design of the frame in terms of the use of structural material. On the other hand, such a model makes it possible to apply simple methods for calculating the stress-strain state of the shell in the study of the strength and rigidity of the structure as a whole. The aim of the study was to determine the minimum consumption of structural materials in shell structures that provide the required conditions for the horizontal rigidity of the building for a comfortable stay of people on its upper floors. A high-rise building in the city of New York, known as 432 Park Avenue, was taken as a prototype for choosing the geometric parameters of the test sample. At the same time, the components of the stress state of the shell in its dangerous sections from the action of horizontal and vertical loads were determined, as well as the influence of the building height on the required parameters. The studies performed have shown that with an increase in the height of a building from 200 to 400 meters, even with the rational use of structural materials, their consumption increases by 16 times, which, with a further increase in the height of the building, deprives its construction of any economic, energy and environmental feasibility, and the implementation of projects at a super- and mega-talls goes exclusively into the category of prestigious ones. At the same time, it was found that the strength potential of the structural materials of the shell, regardless of the height of the building, is used only by a quarter. The performed studies clearly show that the direction of constructive improvement of skyscraper frames in order to ensure their required horizontal rigidity has practically exhausted itself. The search for fundamentally new systems of load-bearing*

\* канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [yiktorgolobokov252@gmail.com](mailto:yiktorgolobokov252@gmail.com)

*structures of tall and ultra-tall buildings at the level of modern economic, energy and environmental standards is becoming relevant.*

**Key words:** *frame of ultra-tall buildings, horizontal stiffness, strength, modeling, stress-strain state.*

**Постановка проблеми.** За останні 20 років в світовій практиці містобудування спостерігається безпрецедентний ріст кількості будівель, що відносяться до категорії високих та надвисоких. В умовах щільної забудови центральних кварталів світових мегаполісів, коли площа будівельних майданчиків знаходиться в межах майже  $1000 \text{ м}^2$ , відношення висоти будівлі до його ширини досягає позначки 20 [1, 2]. І тенденції у появі подібних «будівель-сірників» мають перспективу.

В той же час зростання висоти хмарочосів супроводжується посиленням вимог до умов комфортного перебування людей на верхніх поверхах будівель через горизонтальні переміщення будівельних конструкцій під дією вітрового навантаження. Для забезпечення необхідної жорсткості будівельники змушені використовувати більш раціональні конструктивні системи каркасів, що включають в роботу всі їх елементи. Однак, незалежно від ступеня конструктивного вдосконалення, існує межа витрати конструкційних матеріалів, нижче за яку необхідна жорсткість будівель не може бути забезпечена взагалі. Визначення цих величин може бути виконано на підставі аналізу напружено-деформованого стану, в першу чергу, оболонкових елементів каркасів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні в залежності від висоти будівлі використовуються чотири основні конструктивні системи: рамно-каркасна, рамно-зв'язкова, ствольна та оболонкова (коробчаста) [3].

Низька жорсткість рамно-каркасної системи в зварених вузлах рам при горизонтальних навантаженнях обмежує її застосування в будинках заввишки трохи більше 30 поверхів [4]. Збільшення горизонтальної жорсткості в рамно-зв'язковій системі забезпечується за рахунок застосування стін-діафрагм, що утворюють в каркасах жорсткі пояси. Подальше підвищення ефективності зв'язкових конструкцій досягли їх об'єднання в центральний стовбур, що взаємодіє з периферійними колонами каркасу за допомогою аутригерів [5]. Проте ствольні системи не є раціональними з точки зору опору деформаціям вигину. У зв'язку з цим було запропоновано оболонкову (коробчасту) систему, у якій горизонтальна жорсткість забезпечується багатосекційною зовнішньою оболонкою [6]. Зі зростанням висоти будівлі перевагу віддають поєднанню ствольної і оболонкової систем в ствольно-оболонкову («труба в трубі»), де внутрішній ствол об'єднаний з зовнішньою оболонкою завдяки аутригерним конструкціям [7], або каркасно-оболонковою систему [8], в якій жорсткість оболонки настільки велика, що горизонтальні навантаження вона приймає як консольна балка.

**Мета статті** – розробка аналітичного способу визначення мінімального розходу конструкційних матеріалів, який забезпечує необхідну жорсткість каркасів надвисоких будівель, в залежності від їх висоти, та оцінка міри використання потенціалу їх міцності.

**Виклад основного матеріалу.** Згідно з визначенням міжнародної організації СТБУН будь-яка висотна будівля, що підпадає під поняття «хмарочос», є вежею, розміри поперечного перерізу якої значно менші за його висоту [9].

Тобто, у класичному розумінні курсу «Опір матеріалів» хмарочоси, як штучно створені об'єкти, за основною формою підпадають під визначення стрижня (бруса) [10]. І хоча «Опір матеріалів» є, безсумнівно, занадто грубим інструментом для досить точних досліджень роботи висотних будівель, проте використання у першому наближенні основних принципів цього розділу науки про інженерні методи розрахунку на міцність, жорсткість та стійкість цілком справедливо, що доводить аналіз останніх публікацій.

По загальноприйнятому уявленню висотний будинок відчуває два роду зовнішнього навантаження (рис. 1): вертикальне та горизонтальне навантаження.

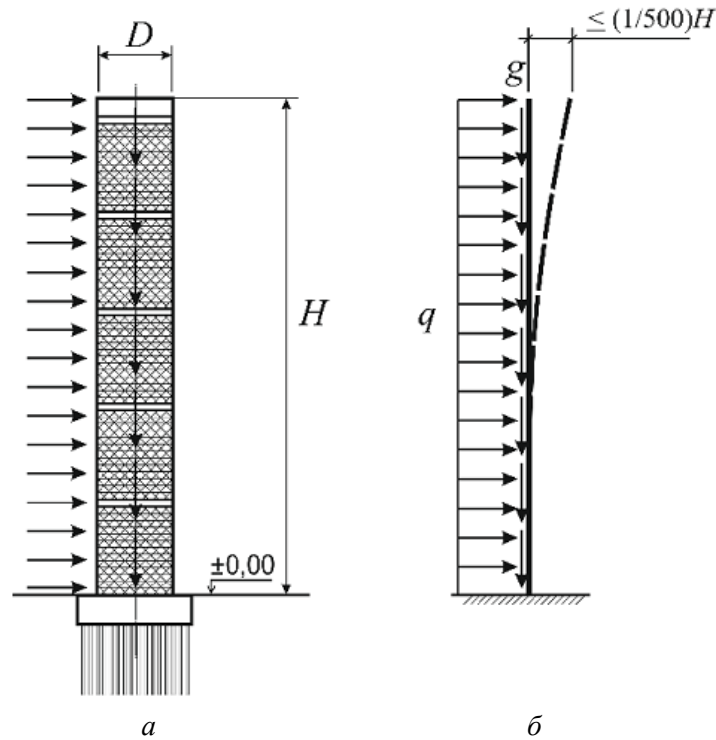


Рис. 1 – Конструктивна (а) та розрахункова (б) схема навантаження каркаса надвисокої будівлі

Вертикальне навантаження викликане власною вагою конструкцій, а також вагою всього того, що складає технологічне навантаження. Горизонтальне навантаження – вітрове навантаження, обумовлене натиском та розрядженням повітряних мас при їх огинанні висотної будівлі. Дещо ідеалізуючи реальні впливи цих навантажень на будівлю, пов'язані з різноманітністю конструкцій хмарочосів, а також неоднаковістю швидкостей повітряних потоків на різних висотах, припустимо рівномірний характер їхнього розподілу по висоті будівлі.

Особливі навантаження, а саме сейсмічні, ударно-вибухові та навантаження, пов'язані з осадкою ґрунту, ми поки що не розглядаємо як такі, що мають суто випадковий або регіональний характер.

На підставі вищевикладеного розрахункову схему хмарочоса уявимо, як вертикальну стійку висотою  $H$  (рис. 1, б), жорстко защемлену в опорі, яка відчуває рівномірно розподілене осьове (вертикальне) навантаження з інтенсивністю  $g$  і рівномірно розподілене горизонтальне навантаження з інтенсивністю  $q = D \cdot p$  (де  $p$  – розрахунковий вітровий тиск,  $D$  – ширина будівлі). Оскільки дію вітрового навантаження вважатимемо рівноймовірною з будь-якого напрямку, у подальших розрахунках надаємо стійці циліндричну форму.

Вибір поперечного перерізу стійки у розрахунковій схемі хмарочоса зробимо з урахуванням оптимального розміщення несучих елементів в його конструктивній системі.

Як свідчить аналіз конструктивних систем хмарочосів, в кожній конструкції можна виділити несучі елементи оболонки і несучі елементи внутрішньої частини каркаса, які одночасно сприймають (різною мірою) як горизонтальне, так і вертикальне навантаження. З точки зору раціонального розміщення, конструкції, що сприймають горизонтальне навантаження (тобто опір вигину), помістимо в оболонку зовнішнім діаметром  $D$  і товщиною  $\delta_0$  (рис. 2) і назвемо їх конструкціями оболонки або оболонкою. Конструкції, що зазнають вертикального навантаження (тобто працюють на стиск), рівномірно розподілимо по площі решти перерізу (коло діаметром  $d$ , куди входить також корисна площа будівлі) і назвемо їх конструкціями стовбура або стовбуром.

Таким чином, запропонована розрахункова схема хмарочоса є вертикальною стійкою постійного поперечного перерізу у складі трубчастої оболонки, що щільно охоплює стовбур.

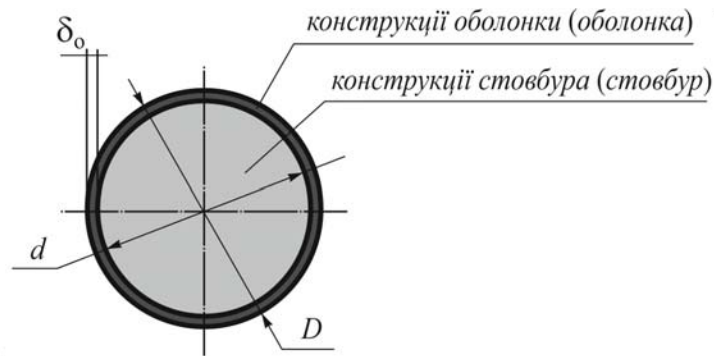


Рис. 2 – Поперечний переріз каркасу в розрахунковій схемі хмарочоса

Однією з головних умов вибору конструктивної схеми хмарочоса є комфортне перебування людей на верхніх поверхах, яке визначається величиною горизонтального переміщення будівлі під дією вітрового навантаження на величину не більше  $1/500$  його висоти (рис. 3), а також прискоренням перекриттів верхніх поверхів при дії пульсаційної складової вітрового потоку, що не перевищує  $0,08 \text{ м/с}^2$  [11]. Іншими словами, умова горизонтальної жорсткості є вирішальною вимогою до вибору конструктивної схеми хмарочосів. При цьому умова міцності залишається базовою вимогою на рівні конструктивних елементів, що забезпечують жорсткість всієї системи.

На підставі обраної розрахункової схеми (рис. 3) визначимо витрату матеріалів, потрібну для забезпечення заданої горизонтальної жорсткості будівлі, тобто масу оболонки.

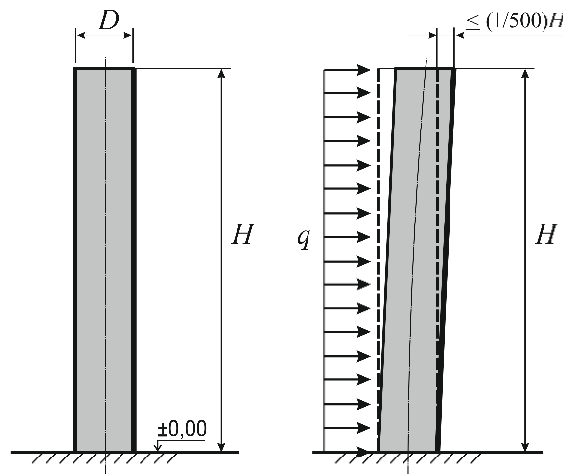


Рис. 3 – Розрахункова схема висотної будівлі

В даний час несучі конструкції в надвисоких будинках виконують з двох видів матеріалів – конструкційних будівельних сталей та залізобетону. Використовуються також різноманітні поєднання цих матеріалів в конструктивних схемах – так звані композитні матеріали. Не вдаючись в аналіз їх переваг та недоліків, позначимо використовувані матеріали двома характеристиками: модулем поздовжньої пружності  $E$  [МПа] та щільністю (питомою масою)  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>]. Тоді витрата будівельних матеріалів визначається формулою:

$$m = \pi D \cdot \delta_0 \cdot H \cdot \rho .$$

У цьому виразі необхідно визначити товщину оболонки  $\delta_0$ , що забезпечує необхідну жорсткість  $(1/500) H$ . Для розрахунків замінимо числовий коефіцієнт  $1/500$  більш універсальною величиною – коефіцієнтом горизонтальної жорсткості  $k$ .

Складемо розрахункову схему стійки «оболонка-ствол» як консольну балку, розташувачи її в системі координат  $x - y$  (рис. 4).

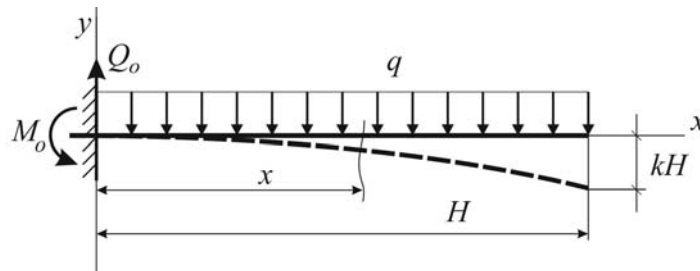


Рис. 4 – Розрахункова схема стійки «оболонка-ствол» при поперечному згині

Універсальне рівняння пружної лінії балки для довільного поперечного перерізу з координатою  $x$  за умови заданої жорсткості  $kH$  має вигляд:

$$y = -\frac{M_0 x^2}{2EJ_z} + \frac{Q_0 x^3}{6EJ_z} - \frac{qx^4}{24EJ_z} \leq kH, \quad (1)$$

де  $M_0 = \frac{qH^2}{2}$  – згинальний момент в опорному перерізі;

$Q_0 = qH$  – поперечна сила в опорному перерізі;

$J_z = \frac{\pi [D^4 - (D - 2\delta_0)^4]}{64}$  – осьовий момент інерції поперечного перерізу. (2)

Підставивши в рівняння (1) координату максимального переміщення  $x = H$ , значення  $M_0$ ,  $Q_0$ , та виставивши за дужки величину жорсткості балки  $\frac{1}{EJ_z}$ , отримаємо

$$kH = \frac{1}{EJ_z} \left( -\frac{1}{2} \cdot \frac{qH^4}{2} + \frac{1}{6} \cdot qH^4 - \frac{1}{24} \cdot qH^4 \right) = -\frac{1}{EJ_z} \cdot \frac{qH^4}{8}.$$

Оскільки нас цікавлять геометричні параметри поперечного перерізу ( $D$  і  $\delta_0$ ), знайдемо з цього рівняння величину  $J_z$ , замінивши її виразом (2) з урахуванням того, що горизонтальні переміщення стійки у будь-якому напрямку позитивні.

$$\frac{\pi [D^4 - (D - 2\delta_0)^4]}{64} = \frac{1}{kHE} \cdot \frac{qH^4}{8}.$$

Замінивши інтенсивність  $q$  вітрового навантаження, вітровим тиском  $p$ , отримаємо *робоче рівняння для визначення товщини оболонки*:

$$D^4 - (D - 2\delta_0)^4 = \frac{8pDH^3}{\pi Ek}. \quad (3)$$

Для того, щоб перевірити наскільки ефективно використовується потенціал міцності будівельних матеріалів, визначимо *найбільшу напругу, що виникає в опорному перерізі оболонки*:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{6 p D^2 H^2}{\pi [D^4 - (D - 2\delta_0)^4]}, \quad (4)$$

де  $M_{\max} = \frac{qH^2}{2} = \frac{pDH^2}{2}$  – найбільший згинальний момент;  
 $W_z = \frac{\pi [D^4 - (D - 2\delta_0)^4]}{12D}$  – момент опору поперечного перерізу.

Пам'ятаючи про те, що в опорному перерізі оболонки виникають також нормальні напруження від її власної ваги  $\sigma_m$  і дотичні напруження при зсуві від вітрового навантаження  $\tau_\sigma$ , їх значення стосовно обраної схеми хмарочоса, відповідно, рівні:

$$\sigma_m = \frac{mg}{\pi D \delta_0}; \quad \tau_\sigma = \frac{pDH}{\pi D \delta_0},$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

Як приклад, визначимо витрату матеріалу і ефективність використання його потенціалу міцності в оболонці хмарочоса висотою 400 метрів, діаметром поперечного перерізу 20 метрів, виконаної з конструкційної маловуглецевої сталі звичайної якості при розрахунковій величині вітрового тиску  $1 \text{ кН/м}^2$ . Геометричні параметри цього умовного хмарочоса приблизно відповідають параметрам споруди у місті Нью-Йорк (США), відомому як 432 Park Avenue (рис. 5).



Рис. 5 – 432 Park Avenue

Для розрахунків використовуємо величини  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $k = 1/500$  і  $\rho = 7,8$  т/м<sup>3</sup>. Товщину оболонки визначимо з формули (3) після підстановки до неї заданих величин:

$$(20 \cdot 10^3)^4 - (20 \cdot 10^3 - 2\delta_0)^4 = \frac{8 \cdot (1 \cdot 10^{-3})(20 \cdot 10^3)(400 \cdot 10^3)^3}{3,14 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1}{500}\right)}.$$

Звідси  $\delta_0 = 130$  мм.

Витрата конструкційної сталі дорівнює:

$$m = \pi D \cdot \delta_0 \cdot H \cdot \rho = 3,14 \cdot 20 \cdot 0,13 \cdot 400 \cdot 7,8 = 25472 \text{ тони.}$$

При цьому найбільша напруга від вигину (вітрового навантаження), що виникає в опорному перерізі оболонки, становить (формула 4):

$$\sigma_{виз} = \frac{6 p D^2 H^2}{\pi [D^4 - (D - 2\delta_0)^4]} = \frac{6 \cdot (1 \cdot 10^{-3})(20 \cdot 10^3)^2 (400 \cdot 10^3)^2}{3,14 \cdot [(20 \cdot 10^3)^4 - (20 \cdot 10^3 - 2 \cdot 130)^4]} = 15,0 \text{ МПа.}$$

Напруга від власної ваги оболонки в тому ж перерізі:

$$\sigma_m = \frac{m g}{\pi D \delta_0} = \frac{(25472 \cdot 10^3) \cdot 10}{3,14 \cdot (20 \cdot 10^3) \cdot 130} = 31,2 \text{ МПа.}$$

Дотичні напруги в опорному перерізі оболонки:

$$\tau_s = \frac{p D H}{\pi D \delta_0} = \frac{(1 \cdot 10^{-3}) \cdot (20 \cdot 10^3) \cdot (400 \cdot 10^3)}{3,14 \cdot (20 \cdot 10^3) \cdot 130} = 0,98 \text{ МПа.}$$

Таким чином, напружений стан конструкцій оболонки визначається дією згинального моменту від горизонтального (вітрового) навантаження, а також власною вагою оболонки. Впливом горизонтального зсуву оболонки можна знехтувати через незначність результатів його дії.

Найбільша розрахункова напруга в опорному перерізі оболонки:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{виз} + \sigma_m = 15,0 + 31,2 = 46,2 \text{ (МПа).}$$

Якщо врахувати, що розрахунковий опір за межею текучості ( $R_y$ ) застосовуваних конструкційних марок сталей для таких споруд становить 160-200 МПа [12], оцінимо використання потенціалу міцності будівельних матеріалів *коефіцієнтом корисності*:

$$\beta_n = \frac{\sigma_{\max}}{R_y} \cdot 100\%.$$

Для цих параметрів хмарочоса при  $R_y = 180$  МПа:  $\beta_n = \frac{46,2}{180} \cdot 100\% = 25,6\%$ , тобто потенціал міцності матеріалу конструкцій оболонки використовується лише на чверть.

Розглянутий випадок є свого роду екстремальним з практики будівництва за параметром відношення висоти будівлі до його ширини. З'ясуємо, що відбувається у хмарочосах при менших відношеннях висоти до ширини.

Для цього, зберігаючи обрані параметри розглянутої будівлі, за вказаною методикою визначимо витрату матеріалів і ступінь використання їх потенціалу міцності при зниженні висоти хмарочоса з 400 м до 350, 300, 250, 200 і 150 м (табл. 1).

Таблиця 1

Витрата конструкційних матеріалів (сталь маловуглецева,  $R_y = 200$  МПа)  
для оболонкових конструкцій хмарочосів висотою  $H$ ,

діаметром у поперечному перерізі  $D = 20$  м при вітровому натиску  $p = 1$  кН/м<sup>2</sup>

Висота будівлі $H, м$	Товщина оболонки каркаса $\delta_0, мм$	Маса оболонки каркаса, $m, т$	Напруга, МПа			Коефіцієнт корисності матеріалу $\beta_n, \%$
			від вітрового навантаження $\sigma_{изг}$	від власної ваги $\sigma_m$	Сумарне $\sigma_{max}$	
400	130	25 472	15,0	31,2	46,2	25,6
350	88	15 087	16,8	27,3	44,1	24,5
300	54	7 935	20,1	23,3	43,4	24,1
250	31	3 796	24,1	19,4	43,5	24,1
200	16	1 567	29,9	15,6	45,5	25,3
150	7	514	38,2	11,6	49,8	27,7

### Висновки

Проведені дослідження напруженого стану сталевих оболонкових конструкцій надвисоких будівель дозволяє зробити висновки:

1. Напрямок конструктивного вдосконалення каркасів надвисоких будівель з метою забезпечення їх необхідної горизонтальної жорсткості практично досягло межі раціонального використання будівельних матеріалів і, взагалі, вичерпало себе.

2. Зі зростанням висоти будівлі з 200 до 400 метрів, навіть при раціональному використанні конструкційних матеріалів, їх витрата зростає у 16 разів, що при подальшому зростанні висоти будівлі позбавляє його зведення будь-якої економічної, енергетичної та екологічної доцільності, а реалізація проектів на рівні супер- та мега-талів переходить виключно в розряд престижних.

3. Потенціал міцності конструктивних матеріалів оболонки, які забезпечують горизонтальну жорсткість, незалежно від висоти будівлі використовується тільки на чверть.

4. Актуальним стає пошук принципово нових систем несучих конструкцій високих та надвисоких будівель на рівні сучасних економічних, енергетичних та екологічних норм.

### Перелік використаних джерел:

- 111 West 57th Street [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.skyscraper-center.com/building/111-west-57th-street/14320>.
- 432 Park Avenue [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.skyscrapercenter.com/building/432-park-avenue/13227>.
- Щукина М.Н. Современное высотное строительство: монография / М.Н. Щукина. – М. : ГУП «ИТЦ Моском-архитектуры», 2007. – 400 с.
- Дыховичный Ю.А. Конструирование и расчёт жилых и общественных зданий повышенной этажности / Ю.А. Дыховичный. – М. : Стройиздат, 1970. – 248 с.
- Katz P. Case Study: Shanghai World Financial Center / P. Katz, L. Robertson // CTBUH Journal. – 2008. – Iss. 2. – Pp. 10-14.
- Sev A. Integrating Architecture and Structural Form in Tall Steel Building Design / A. Sev // CTBUH Journal. – 2001. – Iss. 2. – Pp. 23-31.



7. Gunel M.H. Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form / M.H. Gunel, H.E. Ilgin. – New York: Routledge, 2014. – 214 p. – Mode of access: <https://doi.org/10.13140/2.1.2658.4002>.
8. Sarkisian M. Designing tall buildings: structure as architecture / M. Sarkisian. – London: Taylor & Francis Ltd, 2011. – 224 p.
9. Tall Building Criteria [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.ctbuh.org/resource/height#>.
10. Справочник по сопротивлению материалов / Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев; отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Наукова думка, 1988. – 734 с.
11. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ // Парламентская газета. – 2005. – № 5-6.
12. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. – Введен. 2015-01-01. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 206 с.

#### References:

1. 111 West 57th Street Available at: [www.skyscrapercenter.com/building/111-west-57th-street/14320](http://www.skyscrapercenter.com/building/111-west-57th-street/14320) (accessed 05 March 2021).
2. 432 Park Avenue Available at: [www.skyscrapercenter.com/building/432-park-avenue/13227/](http://www.skyscrapercenter.com/building/432-park-avenue/13227/) (accessed 12 April 2021).
3. Shchukina M.N. *Sovremennoe vysotnoe stroitel'stvo: monografiia* [Modern high-rise construction: monograph]. Moscow, GUP «ITTs Moskom-arkhitektury» Publ., 2007. 400 p. (Rus.)
4. Dykhovichnyi Iu.A. *Konstruirovaniye i raschet zhilykh i obshchestvennykh zdaniy povyshennoi etazhnosti* [Design and calculation of high-rise residential and public buildings]. Moscow, Stroizdat Publ., 1970. 248 p. (Rus.)
5. Katz P., Robertson L. Case Study: Shanghai World Financial Center. *CTBUH Journal*, 2008, iss. 2, pp. 10-14.
6. Sev A. Integrating Architecture and Structural Form in Tall Steel Building Design. *CTBUH Journal*, 2001, iss. 2, pp. 23-31.
7. Gunel M.H., Ilgin H.E. Tall Buildings: Structural Systems and Aerodynamic Form. New York, Routledge Publ, 2014. 214 p. doi: 10.13140/2.1.2658.4002.
8. Sarkisian M. Designing tall buildings: structure as architecture. London, Taylor & Francis Ltd Publ., 2011. 224 p.
9. Tall Building Criteria Available at: <https://www.ctbuh.org/resource/height#> (accessed 05 March 2021).
10. Pisarenko G.S., Iakovlev A.P. Matveev V.V. *Spravochnik po soprotivleniiu materialov* [Handbook of Strength of Materials]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1988. 734 p. (Rus.)
11. Gradostroitel'nyi kodeks Rossiiskoi Federatsii ot 29.12.2004 № 190-FZ [Urban Planning Code of the Russian Federation dated December 29, 2004 No. 190-FZ]. *Parlamentskaia gazeta – Parliamentary Gazette*, 2005, № 5-6. (Rus.)
12. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normi proektuvannia* [State building codes B.2.6-198: 2014. Steel structures. Design standards]. Kyiv, Minregion Ukraïni Publ., 2014. 206 p.

Рецензент: В.В. Суглобов  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.09.2021