

УДК 624.014.2:624.042.4

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.108.1247

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ КАРКАСУ КАПСУЛЬНОГО БУДИНКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

КУШНІР І. О.^{1*}, асп.,

ВОЛКОВА В. Є.², докт. техн. наук, проф.

^{1*}Кафедра будівельної механіки та металевих конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: kushnir27@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3844-6261>

² Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: drvev09@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1883-1385>

Анотація. Постановка проблеми. Зростання попиту на мобільні житлові рішення, особливо в контексті післявоєнної відбудови України, зумовлює необхідність розвитку вітчизняного виробництва капсульних будинків. Несучим елементом таких споруд є сталевий каркас, розрахунок якого потребує застосування сучасних методів чисельного моделювання для забезпечення міцності, стійкості, жорсткості при дії експлуатаційних навантажень. Актуальним є питання пошуку раціональних форм та розмірів перерізів несучих елементів з метою зниження металоємності без втрати необхідного рівня надійності. **Мета** полягає у дослідженні напружено-деформованого стану каркасу капсульного будинку за допомогою методу скінчених елементів при експлуатаційних навантаженнях, дослідженні збіжності результатів чисельного розрахунку та обґрунтуванні можливості уточнення профілів несучих елементів. **Методика.** Виконано тривимірне моделювання просторового каркасу габаритами 11452×3140×3230 мм та масою 3,1 т у програмному комплексі Autodesk Inventor 2024 із застосуванням модуля Simulation 2020. Проведено аналіз збіжності результатів шляхом послідовного подрібнення скінченно-елементної сітки. Переміщення контролювались у 12 характерних точках вздовж поздовжньої осі каркасу. Досліджено експлуатаційне навантаження інтенсивністю 4 кПа. **Результати.** Встановлено коефіцієнт запасу міцності $n = 2,75$, що свідчить про надлишкову металоємність конструкції. Максимальні переміщення становлять 7,8 мм, що значно менше граничних $L/200 = 57$ мм. Збіжність результатів підтверджена при зменшенні розміру елементів сітки з 20 мм до 10 мм з відхиленням менше 2 %. Обґрунтовано можливість заміни вертикальних стійок перерізом 100×100×4 мм на профілі 100×100×3 мм із зменшенням маси на 12 %. **Наукова новизна** полягає в комплексному підході до дослідження напружено-деформованого стану легкого металевих каркасу з гнучо-зварних профілів замкнутого перерізу. **Практична значущість.** Результати можуть бути використані при проектуванні та серійному виробництві мобільних житлових модулів в Україні, а запропонована методика верифікації - при розрахунку аналогічних тонкостінних каркасних конструкцій.

Ключові слова: капсульний будинок; метод скінчених елементів; легкі сталеві конструкції; напружено-деформований стан; збіжність розрахунку; уточнення профілю; раціоналізація

NUMERICAL MODELING OF STRESS-STRAIN STATE OF CAPSULE HOUSE FRAME UNDER OPERATIONAL LOADS AND SUBSTANTIATION OF PROFILE THINNING

KUSHNIR I.O.^{1*}, Postgrad. Stud.,

VOLKOVA V.Yev.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Department of Structural Mechanics and Metal Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: kushnir27@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-3844-6261>

² Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, S. Yefremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: drvev09@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1883-1385>

Abstract. Statement of the problem. The growing demand for mobile housing solutions, particularly in the context of post-war reconstruction of Ukraine, necessitates the development of domestic production of capsule houses. The load-bearing element of such structures is a steel frame, the design of which requires the application of modern numerical modeling methods to ensure strength, stability, and stiffness under operational loads. The search for rational shapes and

cross-sectional dimensions of load-bearing elements to reduce steel consumption without compromising the required level of reliability is a relevant issue. The objective is to investigate the stress-strain state of a capsule house frame using the finite element method under operational loads, to study the convergence of numerical results, and to substantiate the feasibility of profile thinning for load-bearing elements. **Methodology.** Three-dimensional modeling of a spatial frame with overall dimensions of 11452×3140×3230 mm and a mass of 3.1 t was performed using Autodesk Inventor 2024 with the Simulation 2020 module. Convergence analysis was carried out through successive refinement of the finite element mesh. Displacements were monitored at 12 characteristic points along the longitudinal axis of the frame. An operational load with an intensity of 4 kPa was investigated. **Results.** A strength safety factor of $n = 2.75$ was determined, indicating excessive steel consumption of the structure. Maximum displacements were 7.8 mm, which is significantly below the allowable limit of $L/200 = 57$ mm. Convergence of results was confirmed when the mesh element size was reduced from 20 mm to 10 mm, with a deviation of less than 2 %. The feasibility of replacing vertical posts with a 100×100×4 mm cross-section with 100×100×3 mm profiles was substantiated, resulting in a 12 % mass reduction. **The scientific novelty** lies in the comprehensive approach to investigating the stress-strain state of a lightweight steel frame made of cold-formed welded hollow sections. **Practical significance.** The results can be used in the design and serial production of mobile housing modules in Ukraine, and the proposed verification methodology can be applied to the analysis of similar thin-walled framed structures.

Keywords: capsule house; finite element method; lightweight steel structures; stress-strain state; calculation convergence; profile thinning; rationalization

Постановка проблеми. Потреба у мобільних та швидкокомтованих житлових конструкціях непинно зростає на світовому будівельному ринку. За даними Modular Building Institute [1], обсяг встановлених модульних будівель у США у 2024 р. зріс на 31 % порівняно з попереднім роком, що свідчить про глобальну тенденцію переходу до індустріальних методів будівництва.

Для України розвиток капсульного будівництва набуває особливого значення з огляду на потребу оперативного відновлення зруйнованого житлового фонду. Традиційний імпорт готових модулів обмежується логістичними труднощами, тривалими термінами постачання та невідповідністю місцевим кліматичним умовам експлуатації.

Несучим елементом капсульного будинку є сталевий каркас, який повинен забезпечувати міцність, жорсткість та стійкість при дії комплексу навантажень: експлуатаційних, снігових, вітрових, а також динамічних впливів при транспортуванні та монтажі. Верифікація несучої здатності такого каркасу потребує застосування сучасних методів чисельного моделювання.

Аналіз публікацій. Основні проблеми проектування модульних сталевих конструкцій висвітлена у роботах Lawson R. M. та Ogden R. G. [2], які обґрунтували принципи оптимізації маси та забезпечення транспортабельності. Автори

зазначають, що несучі елементи модулів нерідко мають надлишкову металоємність, оскільки їх розміри визначаються переважно вимогами стійкості при підніманні та транспортуванні, а не лише експлуатаційними навантаженнями. На основі досвіду реалізованих проєктів у Великобританії обґрунтовано ефективність гібридного підходу, що поєднує тривимірні модулі з двовимірними панельними системами для оптимізації матеріалоємності та функціональної гнучкості будівель.

Yu C. та Schafer B. W. [3] дослідили особливості втрати стійкості холодногнутих профілів під дією згинальних навантажень. Авторами виконано серії експериментальних випробувань стандартних C- та Z-подібних перерізів, що дозволило встановити верхні та нижні межі несучої здатності при різних формах втрати місцевої та дисторсійної стійкості. На основі отриманих результатів розроблено скінченно-елементні моделі в програмному комплексі ABAQUS та запропоновано вдосконалення методу прямої міцності (Direct Strength Method) для проєктування тонкостінних сталевих елементів.

Pan W. та Gibb A. G. F. [4] проаналізували переваги позамайданчикowego виробництва будівельних конструкцій з позиції швидкості зведення та контролю якості. Автори довели, що традиційні методи оцінки ефективності позамайданчикowego виробництва є

недостатніми, оскільки враховують лише прямі витрати на матеріали та робочу силу, ігноруючи такі суттєві фактори як охорона праці, управлінські та процесні переваги. На основі серії виробничих кейсів обґрунтовано необхідність переходу від витратного до ціннісного підходу при порівнянні заводського та традиційного будівництва.

Jaillon L. та Poon C. S. [5] дослідили вплив префабрикації на обсяги будівельних відходів на прикладі висотних житлових будівель у Гонконзі. За результатами анкетування фахівців та аналізу реалізованих проєктів встановлено середнє зменшення будівельних відходів на 52 % при застосуванні збірних конструкцій порівняно з традиційним будівництвом. Отримані дані підтверджують екологічну ефективність заводського виготовлення конструкцій та доцільність розширення сфери застосування модульних технологій.

Методи розрахунку тонкостінних елементів систематизовані Dubina D. [6] та Rhodes J. [7]. Dubina D. [6] у фундаментальній роботі з проєктування холодногнутих сталевих конструкцій за Єврокодом 3 систематизував форми втрати стійкості тонкостінних елементів - місцеву, дисторсійну та загальну - та навів методики їх урахування при розрахунку за методом ефективних ширин. Особливу увагу приділено впливу холодного формування на механічні властивості сталі та взаємодії різних форм втрати стійкості у складених перерізах.

Rhodes J. [7] дослідив поведінку тонкостінних конструкцій з позиції закритикальної роботи пластинчастих елементів після втрати місцевої стійкості. У його роботах розглянуто взаємодію місцевої та загальної форм втрати стійкості, а також застосування методу скінчених смуг для аналізу тонкостінних елементів у будівельних та інженерних конструкціях.

Вітчизняні напрацювання представлені дослідженнями Білика С. І. [8] щодо просторової роботи стержневих систем. Білик С. І. [8], доктор технічних наук, завідувач кафедри металевих і дерев'яних конструкцій КНУБА, розробив підходи до

проєктування раціональних сталевих каркасів будівель зі змінними перерізами елементів, що дозволяють знизити металоємність конструкцій. Його дослідження охоплюють аналіз просторової жорсткості та стійкості каркасних систем з урахуванням реальних умов експлуатації.

Перельмутер А. В. [9] розглянув питання надійності каркасних конструкцій та розрахункових моделей споруд. У його працях обґрунтовано підходи до формування адекватних розрахункових схем, застосування часткових коефіцієнтів надійності та аналізу напружено-деформованого стану конструкцій з використанням сучасних програмних комплексів, зокрема SCAD Office.

Юрченко В. В. [10] запропонувала методику удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів шляхом розв'язання задач оптимального проєктування. Її дослідження спрямовані на зниження металоємності стрижневих конструкцій за рахунок параметричної оптимізації поперечних перерізів елементів з одночасним дотриманням вимог міцності, стійкості та жорсткості за нормами Єврокоду.

Проте комплексний аналіз напружено-деформованого стану каркасів капсульних будинків з урахуванням монтажних операцій залишається недостатньо вивченим.

Мета статті – дослідження напружено-деформованого стану сталевих просторових каркасів капсульного будинку методом скінчених елементів при експлуатаційних навантаженнях, дослідження збіжності чисельного розв'язку, виявлення зон концентрації напружень та обґрунтування можливості утончення профілів несучих елементів.

Виклад матеріалу. Об'єктом дослідження є капсульний будинок (рис. 1), призначений для тимчасового або постійного проживання. Конструктивна схема передбачає просторовий каркас із холодногнутих замкнених профілів.



Рис. 1. Загальний вигляд капсульного будинку

Просторовий каркас (рис. 2) має габаритні розміри 11452×3140×3230 мм та масу 3,1 т. Конструкція складається з верхньої та нижньої обв'язок, вертикальних стійок, поперечних розпірок, фланцевих з'єднань та підсилювальних елементів (косинок і ребер жорсткості).

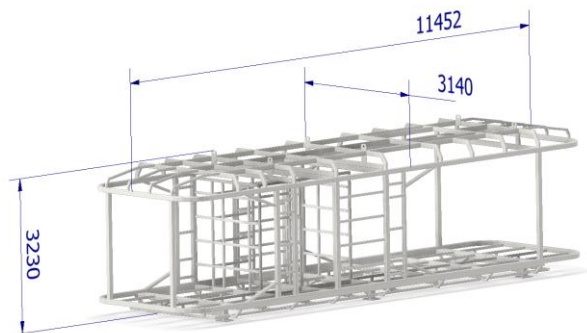


Рис. 2. Просторовий каркас капсульного будинку

З метою уніфікації виробництва прийнято 5 типорозмірів гнutoзварних профілів: 120×120×4, 150×100×4, 100×100×4, 100×50×3 та 50×50×2 мм. Матеріал - сталь С245 (ДСТУ 8539:2015) з межею текучості $\sigma_y = 245$ МПа.

Додатково використовуються сталеві пластини для виготовлення монтажних фланців, та елементів вузлів і з'єднань. Товщина та форма пластин розраховуються для забезпечення міцності та надійності з'єднань. Загальна маса елементів каркасу з урахуванням технологічних та транспортних вимог становить близько 2,65 т.

Чисельне моделювання виконано методом скінчених елементів (МСЕ) у програмному комплексі Autodesk Inventor 2024 із застосуванням модуля Simulation

2020 (рис. 3). Вибір МСЕ обумовлений необхідністю врахування складної просторової геометрії каркасу, нерівномірного розподілу жорсткості елементів та локальних особливостей вузлових з'єднань, що унеможливорює застосування аналітичних методів розрахунку [9; 11].

Серед підходів до розрахунку каркасних конструкцій слід відзначити метод переміщень (метод жорсткостей), метод сил та метод граничної рівноваги [9]. Метод переміщень є основою більшості сучасних програмних комплексів для розрахунку конструкцій, проте його класична реалізація у стержневій постановці не дозволяє врахувати місцеві ефекти в тонкостінних перерізах - локальну та дисторсійну втрату стійкості стінок профілів [3; 6]. Об'ємне моделювання засобами МСЕ у поєднанні з оболонковими або тетраедричними елементами дозволяє виявити зазначені ефекти та отримати детальну картину розподілу напружень у всіх перерізах конструкції.

Дискретизація геометричної моделі каркасу виконана із застосуванням тетраедричних скінчених елементів другого порядку (параболічних) з 10 вузлами та 3 ступенями вільності у кожному вузлі (переміщення u, v, w за осями X, Y, Z відповідно). Тетраедричні елементи другого порядку обрано з огляду на їх здатність точніше апроксимувати криволінійні поверхні замкнених профілів порівняно з лінійними елементами першого порядку, а також забезпечувати вищу точність при меншій кількості елементів [13]. Кожний параболічний тетраедр має квадратичні функції форми, що дозволяє адекватно відтворювати лінійний розподіл деформацій всередині елемента.

Загальна кількість вузлів скінченно-елементної моделі становить приблизно 285 000, кількість елементів - близько 165 000. У зонах концентрації напружень (кутові з'єднання, місця приварювання косинок та ребер жорсткості) застосовано локальне подрібнення сітки до 5 мм.

Розв'язання задачі статичної рівноваги зводиться до системи алгебраїчних рівнянь [12]:

$$[K]\{U\} = \{F\}, \quad (1)$$

де $[K]$ - глобальна матриця жорсткості системи; $\{U\}$ - вектор вузлових переміщень; $\{F\}$ - вектор вузлових навантажень.

Матрицю жорсткості всієї системи отримано шляхом ансамблювання матриць окремих елементів:

$$[K] = \sum [k_e], \quad (2)$$

де $[k_e]$ - матриця жорсткості e -го скінченного елемента, що визначається інтегруванням по об'єму елемента:

$$[k_e] = \int [B]^T [D] [B] dV, \quad (3)$$

де $[B]$ - матриця градієнтів (зв'язок деформацій з вузловими переміщеннями); $[D]$ - матриця пружності матеріалу; V - об'єм елемента.

При моделюванні були використані наступні характеристики матеріалу елементів каркасу - сталь С245 (ДСТУ 8539:2015) з такими фізико-механічними характеристиками: масова густина $\rho = 7,85 \text{ г/см}^3$, межа текучості $\sigma_y = 207 \text{ МПа}$, тимчасовий опір розриву $\sigma_b = 345 \text{ МПа}$, модуль пружності $E = 220 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,275$, модуль зсуву $G = 86,3 \text{ ГПа}$. Розрахунок виконано в пружній стадії роботи матеріалу.

Перевірку міцності здійснено із застосуванням критерію еквівалентних напружень Мізеса:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{0,5 \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)}, \quad (4)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - головні напруження. Коефіцієнт запасу міцності визначено як:

$$n = \sigma_y / \sigma_{eq,max}, \quad (5)$$

де σ_y - межа текучості матеріалу (245 МПа для сталі С245).

Розрахунок виконано для експлуатаційного навантаження інтенсивністю $q = 4 \text{ кПа}$, з урахуванням власної ваги конструкції, масу обладнання (системи опалення, водопостачання, електричне обладнання), корисне навантаження від меблів та людей відповідно

до ДБН В.1.2-2:2006 [14]. Навантаження прикладено у вигляді рівномірно розподіленого тиску на верхню обв'язку каркасу та передається через поперечні ригелі на вертикальні стійки.

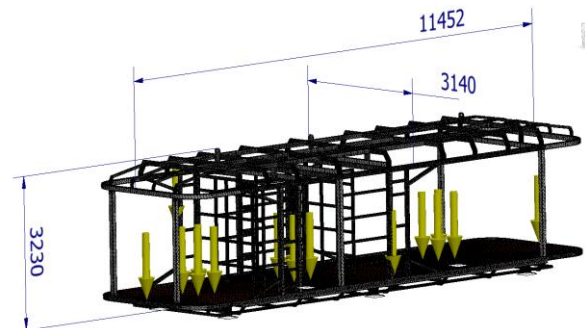


Рис. 3. Скінчено-елементна модель каркасу

Граничні умови прийнято у вигляді шарнірно-нерухомого закріплення опорних вузлів нижньої обв'язки, що моделює встановлення каркасу на фундаментні опори. Снігове та вітрове навантаження в даному дослідженні не враховувались, оскільки обтічна форма сприяє самоочищенню від снігу.

Для контролю достовірності результатів чисельного моделювання виконано аналіз збіжності розв'язку шляхом послідовного подрібнення скінченно-елементної сітки. Збіжність оцінювалась за зміною максимальних переміщень та напружень при зменшенні характерного розміру елемента h від 20 мм до 10 мм. Критерієм досягнення збіжності прийнято відносну зміну контрольованого параметра менше 2 % при подрібненні сітки:

$$\delta = |f_h - f_{h/2}| / f_{h/2} \times 100\% \leq 2\%, \quad (6)$$

де f_h - значення контрольованого параметра при розмірі елемента h ; $f_{h/2}$ - значення при подрібненій сітці з розміром $h/2$. Слід зазначити, що надмірне подрібнення сітки (елементи менше 3 мм) може призводити до накопичення обчислювальних похибок, тому оптимальний розмір елемента обирався з урахуванням балансу між точністю та обчислювальними витратами [13].

Переміщення контролювались у 12 характерних точках, розташованих

рівномірно вздовж поздовжньої осі каркасу з кроком 1000 мм. Контрольні точки розміщено на верхній обв'язці каркасу у площині симетрії конструкції, що дозволяє побудувати криву прогинів по довжині каркасу та ідентифікувати зони максимальних деформацій.

Таблиця 1

**Результати розрахунку
при експлуатаційному навантаженні**

Параметр	Мін.	Макс.
Маса, кг	3089,23	–
σ Мізеса, МПа	0,0007	753,0
Переміщення, мм	0	7,80
Коеф. запасу n	2,75	15,0

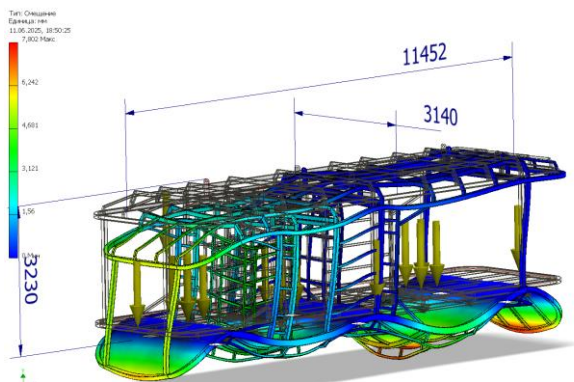


Рис. 4. Поле напружень при експлуатаційному навантаженні

Аналіз результатів (табл. 1, рис. 4) свідчить про значний запас несучої здатності конструкції. Напруження в контрольних точках нижче границі плинності матеріалу у 2,75 рази. Максимальні переміщення $f_{\max} = 7,8$ мм не перевищують граничних $[f] = L/200 = 11452/200 = 57$ мм, що відповідає вимогам жорсткості за ДБН В.1.2-2:2006 [14]. Максимальне еквівалентне напруження за Мізесом $\sigma_{\text{eq,max}} = 89,1$ МПа зафіксовано в зоні з'єднання вертикальної стійки з нижньою обв'язкою у середній частині каркасу.

Розподіл переміщень вздовж поздовжньої осі каркасу у 12 контрольних точках свідчить про параболічний характер прогинової кривої з максимумом у середній третині прольоту. Переміщення в крайніх точках (вузли опирання) близькі до нуля, у точках 5–8 (середня частина) становлять 6,2–7,8 мм, у точках 3–4 та 9–10 – 3,1–4,7 мм.

Отриманий характер розподілу відповідає роботі балкової системи під рівномірним навантаженням, що підтверджує адекватність прийнятих граничних умов.

Результати аналізу збіжності чисельного розв'язку наведено у таблиці 2. При зменшенні розміру елемента сітки від 20 мм до 10 мм відносна зміна максимальних переміщень становила 3,8 %, а при подальшому подрібненні до 5 мм – лише 1,4 %, що задовольняє прийнятий критерій збіжності (6). Для максимальних напружень відхилення між сітками 10 мм та 5 мм не перевищує 1,9 %. Це підтверджує достатню точність прийнятої дискретизації з базовим розміром елемента 10 мм.

Таблиця 2

Результати аналізу збіжності

h , мм	f_{\max} , мм	σ_{\max} , МПа	δ , %
20	7,51	85,3	–
10	7,80	89,1	3,8
5	7,91	90,8	1,4

Значний запас міцності вказує на можливість раціоналізації перерізів окремих елементів каркасу. Найбільш доцільним є утончення вертикальних стійок, виконаних з профілю 100×100×4 мм, оскільки рівень напружень у цих елементах не перевищує 45–60 МПа, що становить лише 18–24 % від межі текучості.

Для обґрунтування утончення виконано додатковий розрахунок із заміною профілю стійок на 100×100×3 мм. Площа поперечного перерізу при цьому зменшується з 14,44 см² до 11,04 см² (на 23,5 %), а момент інерції – з 254,7 см⁴ до 199,1 см⁴ (на 21,8 %). Маса стійок зменшується з 11,34 кг/м до 8,66 кг/м, що при загальній довжині стійок забезпечує зниження маси каркасу на 12 %.

Результати розрахунку з утонченими стійками показали збільшення максимальних напружень до 112,4 МПа та переміщень до 9,3 мм, що не перевищує межу текучості матеріалу. Максимальні переміщення 9,3 мм становлять лише 16 % від граничних $[f] = 57$ мм, що задовольняє вимоги жорсткості. Таким чином, заміна профілю 100×100×4 мм на 100×100×3 мм є обґрунтованою з точки

зору несучої здатності та жорсткості при експлуатаційних навантаженнях.

Слід зазначити, що при утонченні профілю необхідно додатково перевірити місцеву стійкість стінок перерізу. Для профілю $100 \times 100 \times 3$ мм відношення ширини стінки до товщини становить $b/t = (100 - 2 \times 3) / 3 = 31,3$, що не перевищує граничне значення $42\epsilon = 42 \times \sqrt{(235/245)} = 41,1$ відповідно до Eurocode 3 (EN 1993-1-1) [15] та ДБН В.2.6-198:2014 [11]. Отже, переріз належить до класу 3 й може працювати в пружній стадії без обмежень.

Висновки

1. Побудовано просторову скінченно-елементну модель каркасу капсульного будинку з використанням параболических тетраєдрів та досліджено його роботу під експлуатаційним навантаженням 4 кПа.

2. Встановлено достатній запас міцності обраних перерізів при максимальних еквівалентних напруженнях за Мізесом

89,1 МПа. Максимальні переміщення 7,8 мм становлять лише 14 % від граничних $L/200 = 57$ мм.

3. Підтверджено збіжність чисельного розв'язку: при подрібненні сітки від 20 мм до 5 мм відносна зміна контрольованих параметрів не перевищує 2 %, що підтверджує достовірність отриманих результатів.

4. Обґрунтовано можливість зменшення товщини стінок перерізу для вертикальних стійок з профілю $100 \times 100 \times 4$ мм на $100 \times 100 \times 3$ мм зі зменшенням маси каркасу на 12 % та виконанні вимог місцевої стійкості стінок перерізу.

5. Результати підтверджують придатність каркасу до серійного виробництва за умови впровадження запропонованих рекомендацій щодо раціоналізації перерізів. Перспективним напрямком подальших досліджень є аналіз монтажних та транспортних навантажень, а також оцінка аварійних режимів роботи конструкції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Modular Building Institute. 2024 Permanent Modular Construction Report. Charlottesville : MBI, 2024. 48 p.
2. Lawson R. M., Ogden R. G. Modular construction using light steel framing: an architect's guide. Ascot : SCI, 2008. 92 p.
3. Yu C., Schafer B. W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*, 2006. Vol. 132, № 4. Pp. 515–528.
4. Pan W., Gibb A. G. F. Perspective of UK housebuilders on the use of offsite modern methods of construction. *Construction Management and Economics*. 2008. Vol. 26, № 6. Pp. 656–675.
5. Jaillon L., Poon C. S. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment. *Construction Management and Economics*. 2008. Vol. 26, № 9. Pp. 953–966.
6. Dubina D. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures. *Thin-Walled Structures*. 2008. Vol. 46, № 7–9. Pp. 741–764.
7. Rhodes J. Design of cold formed steel members. London : Elsevier Applied Science, 1991. 302 p.
8. Білик С. І. Просторова робота тонкостінних стержневих систем. Київ : НАУ, 2013. 348 с.
9. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчётные модели сооружений и возможность их анализа. Київ : Сталь, 2007. 600 с.
10. Юрченко В. В. Удосконалення конструктивної форми легких каркасів будівель із холодногнутих профілів на базі рішення задачі оптимального проектування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01. Київ : КНУБА, 2019. 44 с.
11. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
12. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. 1975. 541 с.
13. Bathe K. J. Finite Element Procedures. 2nd ed. Watertown : Klaus-Jürgen Bathe, 2014. 1043 p.
14. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. Київ : Мінбуд України, 2006. 78 с.
15. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels : CEN, 2005. 91 p.

REFERENCES

1. Modular Building Institute. 2024 Permanent Modular Construction Report. Charlottesville : MBI, 2024, 48 p.
2. Lawson R.M. and Ogden R.G. Modular construction using light steel framing : an architect's guide. Ascot : SCI, 2008, 92 p.

3. Yu C. and Schafer B.W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*. 2006, vol. 132, no. 4, pp. 515–528.
4. Pan W. and Gibb A.G.F. Perspective of UK housebuilders on the use of offsite modern methods of construction. *Construction Management and Economics*. 2008, vol. 26, no. 6, pp. 656–675.
5. Jaillon L. and Poon C.S. Sustainable construction aspects of using prefabrication in dense urban environment. *Construction Management and Economics*. 2008, vol. 26, no. 9, pp. 953–966.
6. Dubina D. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures. *Thin-Walled Structures*. 2008, vol. 46, no. 7–9, pp. 741–764.
7. Rhodes J. *Design of cold formed steel members*. London : Elsevier Applied Science, 1991, 302 p.
8. Bilyk S.I. *Prostorova robota tonkostinnykh strzhnevnykh system* [Spatial behavior of thin-walled rod systems]. Kyiv : NAU, 2013, 348 p. (in Ukrainian).
9. Perelmuter A.V. and Slivker V.I. *Raschetnye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Calculation models of structures and possibility of their analysis]. Kyiv : Stal, 2007, 600 p. (in Russian).
10. Yurchenko V.V. *Udoskonalennia konstruktyvnoi formy lehkykh karkasiv budivel iz kholodnohnutykh profiliv na bazi rishennia zadachi optimalnoho proektuvannia : avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk : 05.23.01* [Improvement of structural form of lightweight building frames from cold-formed profiles based on optimal design : Dr. Sc. thesis abstract : 05.23.01]. Kyiv : KNUCEA, 2019, 44 p. (in Ukrainian).
11. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards]. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2014, 199 p. (in Ukrainian).
12. Zienkiewicz O.C. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [The finite element method in engineering science]. 1975, 541 p. (in Russian).
13. Bathe K.J. *Finite Element Procedures*. 2nd ed. Watertown : Klaus-Jürgen Bathe, 2014, 1043 p.
14. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia* [DBN V.1.2-2:2006. Loads and effects. Design standards]. Kyiv : Minbud Ukrainy, 2006, 78 p. (in Ukrainian).
15. EN 1993-1-1:2005. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1 : General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2005, 91 p.

Надійшла до редакції: 01.04.2026.

Прийнято після рецензування: 24.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.