

УДК 624.011.1:624.074.4:620.179.1

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЇ ДЕРЕВ'ЯНОГО КАРКАСУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ СТАНДАРТУ NZEB

І.І. Назаренко¹,

д-р техн. наук

І.І. Перегінєць²,

канд. техн. наук

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31²Академія будівництва України, вул. Освіти 4, м. Київ, Україна, 03680

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.76-84

У роботі досліджено напружено-деформаційний стан елементів дерев'яного каркасу будівель з близьким до нульового споживанням енергії. Обґрунтовано, що дерев'яні каркасні конструкції широко розглядаються як ефективна альтернатива традиційним (бетону, сталі) з точки зору екології та енергоефективності. Здійснено аналіз архітектурно-планувальних та конструктивних рішень малоповерхового житлового енергоефективного будинку Start ТМ "Business House" стандарту NZEB для індустріального виробництва з типових конструктивних елементів. Застосуванням моделі просторової розрахункової схеми будівлі та програмного комплексу «ЛІРА» досліджено напружено-деформований стан прийнятих конструктивних рішень будівлі. Створено просторову модель із використанням стержневих KE10 та оболонкових KE42 елементів. Застосовано жорсткість обшивки як зсувну діафрагму. Навантаження на будівлю, що враховуються в розрахунках задавалися з урахуванням коефіцієнтом надійності по граничному навантаженню. Виконаний аналіз рівня використання несучих властивостей елементів каркаса (стійок першого і другого поверху) і ферми перекриття (нижнього поясу, розкосів) при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантажень.

Проведено перевірочний розрахунок елементів каркаса: стійок першого і другого поверху, елементів ферми перекриття на міцність перерізів по нормальній до осі навантаження, на сколювання, стійкість, а також на виконання вимог щодо граничної гнучкості. Приведені аналітичні залежності для визначення навантаження на будівлю з урахуванням коефіцієнта надійності по граничному навантаженню. Дані розрахунків свідчать про раціональне використання обраного поперечного перерізу стійок першого поверху і елементів ферми перекриття. Доведено, що дерев'яний каркас забезпечує як вимоги до енергоефективності стандарту NZEB, так і високий рівень експлуатаційної надійності. Запропоновано методи розрахунку подібного класу будинків.

Ключові слова: дерев'яний каркас, енергоефективність, NZEB, напруження, деформація, рефлексивність, чисельне моделювання, ПК ЛІРА.

Вступ. Сучасна практика будівництва дедалі більше орієнтується на концепцію сталого розвитку, що зумовлює перехід до нових типів житлових і громадських будівель з мінімальним вуглецевим слідом. Однією з ключових тенденцій у цьому контексті є впровадження технологій NZEB (Nearly Zero Energy Buildings), що передбачають зведення будівель з майже нульовим споживанням енергії. У світі щороку зростає кількість реалізованих проєктів таких будівель, зокрема в Скандинавських країнах, Канаді, Німеччині та Японії, де набувають поширення дерев'яні каркасні будівлі висотою 5-10 поверхів. В умовах глобального потепління і зростаючих цін на енергоносії, важливість впровадження NZEB-концепцій зростає і в Україні. Одним із перспективних рішень є будівництво дерев'яних каркасних споруд, які поєднують низьку теплопровідність матеріалу з достатніми механічними характеристиками. Окрему увагу дослідників і проєктувальників останнім часом привертає питання рефлексивності конструкцій - здатності до зворотного відгуку при циклічних або непередбачених навантаженнях, включаючи вітер, сніг, сейсмічні впливи.

У цьому контексті особливе значення мають розрахунки напружено-деформаційного стану ключових елементів каркасу - стійок, ферм, балок перекриття з урахуванням дії комбінованих навантажень та впливу обшивальних матеріалів на загальну просторову жорсткість.

Таким чином, актуальність дослідження визначається потребою у науково обґрунтованих підходах до проєктування дерев'яних каркасів будівель класу NZEB з урахуванням сучасних вимог до енергоефективності, конструктивної безпеки, прокладки інженерних комунікацій відновлюваних джерел енергії та адаптивної поведінки конструкцій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останніми роками дерев'яні каркасні конструкції широко розглядаються як ефективна альтернатива традиційним (бетону, сталі) з точки зору екології та енергоефективності. Методичні основи розрахунку дерев'яних елементів детально узагальнені в алгоритмах розрахунку механічної поведінки дерев'яних ферм під умовними навантаженнями [1]. Проте в огляді не було враховано вплив OSB-плит на підвищення просторової жорсткості вузлів, що важливо для NZEB-каркасів. В роботі [2] автор проаналізував NZEB-проекти в Україні, акцентувавши увагу на проектних рішеннях з урахуванням вітрових, снігових та експлуатаційних навантажень. Однак його підхід обмежується статичним аналізом, без використання чисельного моделювання напружень з урахуванням рефлексивності.

В праці [3] продемонстровано розрахунок дерев'яних ферм в реальних умовах, обґрунтувавши міцнісні та стійкісні показники каркасу. Проте трапеція навантажень не враховує динамічної взаємодії в просторі, необхідної для NZEB. Енергетично-екологічний аналіз заміщення деревини вперше визначив, що використання деревини замість мінеральних матеріалів може зменшити CO₂-викиди на 30–40% [4]. Однак у статті обмежено досліджена тема рефлексивності та поведінки при циклічних навантаженнях. Аналіз кліматичних ефектів стратегій управління лісами у Швеції показав, що висока інтенсивність експлуатації та утилізації відходів дає більше зменшення радіаційного форсингу, ніж охоронні заходи [5]. Наукова література вказує на значення рефлексивності – здатності дерев'яних конструкцій гасити коливання і адаптуватися до циклічних навантажень. Разом з цим розрахунки конструкцій мають відповідати вимогам нормативної документації щодо проектування [6]. Встановлено, що застосування обшивки OSB значно підвищує поперечну жорсткість каркасних стін і зменшує їх зсувні переміщення на 30–50%, що підтверджує ефективність використання оболонкових елементів у каркасах NZEB [8]. Цей елемент дерев'яного каркасу будинку зміцнює аргументацію щодо ролі OSB-обшивки в міцності та жорсткості конструкцій. Дослідження автора даної статті [9] зосереджено на організації процесів будівництва будівель з позитивним енергетичним балансом, зокрема за критеріями вартості товарної одиниці. Обґрунтовано підхід до стандартизації будівництва в умовах постіндустріальної моделі розвитку України, що має пряму відповідність концепціям NZEB, мінімізації невизначеностей будівельного процесу в термінах, вартості, трудових та матеріальних ресурсах, експлуатаційних та споживчих характеристиках житла. Зважаючи на попередні наукові праці, потребі в інтегральному підході до проектування та індустріального будівництва споруд з дерев'яним каркасом, що поєднує чисельний аналіз (напруження, жорсткість), екологічну оцінку (CO₂-аналіз, життєвий цикл будівлі), надійність (рефлексивність, циклічна стійкість) – є необхідність в дослідженні напружено-деформаційного стану елементів дерев'яного каркасу будівель енергоефективного стандарту NZEB (будівлі з близьким до нульового споживанням енергії).

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення основних показників напружено-деформованого стану конструктивних рішень малоповерхового житлового будинку для оцінки їх енергоефективності. Для досягнення означеної мети в роботі сформульовані та вирішені наступні задачі.

1. Проаналізовано архітектурно-планувальні та конструктивні рішення малоповерхового житлового енергоефективного будинку Start TM “Business House” стандарту NZEB для індустріального виробництва з типових конструктивних елементів універсальних пиломатеріалів з розмірами поперечного перерізу 38×90 мм та 38×140 мм. Конструктивні рішення стінових елементів, перекриття та покриття мають бути виконані з можливістю прокладки інженерних мереж відновлюваної енергетики та повітропроводів системи припливно-витяжної вентиляції в тілі конструкції.

2. Проведена перевірка прийнятих конструктивних рішень будівлі з аналізом напружено-деформованого стану з використанням моделі просторової розрахункової схеми будівлі та програмного комплексу «ЛІРА».

3. Здійснено розрахунок елементів каркасу: стійок першого і другого поверху, елементів ферми перекриття на міцність перерізів по нормальній до осі навантаження, на сколювання, стійкість, а також на виконання вимог щодо граничної гнучкості.

Дослідження напружено-деформованого стану конструкцій дерев'яного каркасу. Для дослідження обрано каркасні елементи будинку Start TM “Business House” (рис. 1) з

дерев'яними стійками (140×38 мм - перший поверх, 90×38 мм - другий поверх), фермами перекриття висотою 400 мм та обшивкою з OSB-плит. Проект розроблено відповідно до вимог будівель класу NZEB. Моделювання напружено-деформаційного стану виконано в ПК «ЛІРА». Створено просторову модель із використанням стержневих KE10 та оболонкових KE42 елементів. Застосовано жорсткість обшивки як зсувну діафрагму.

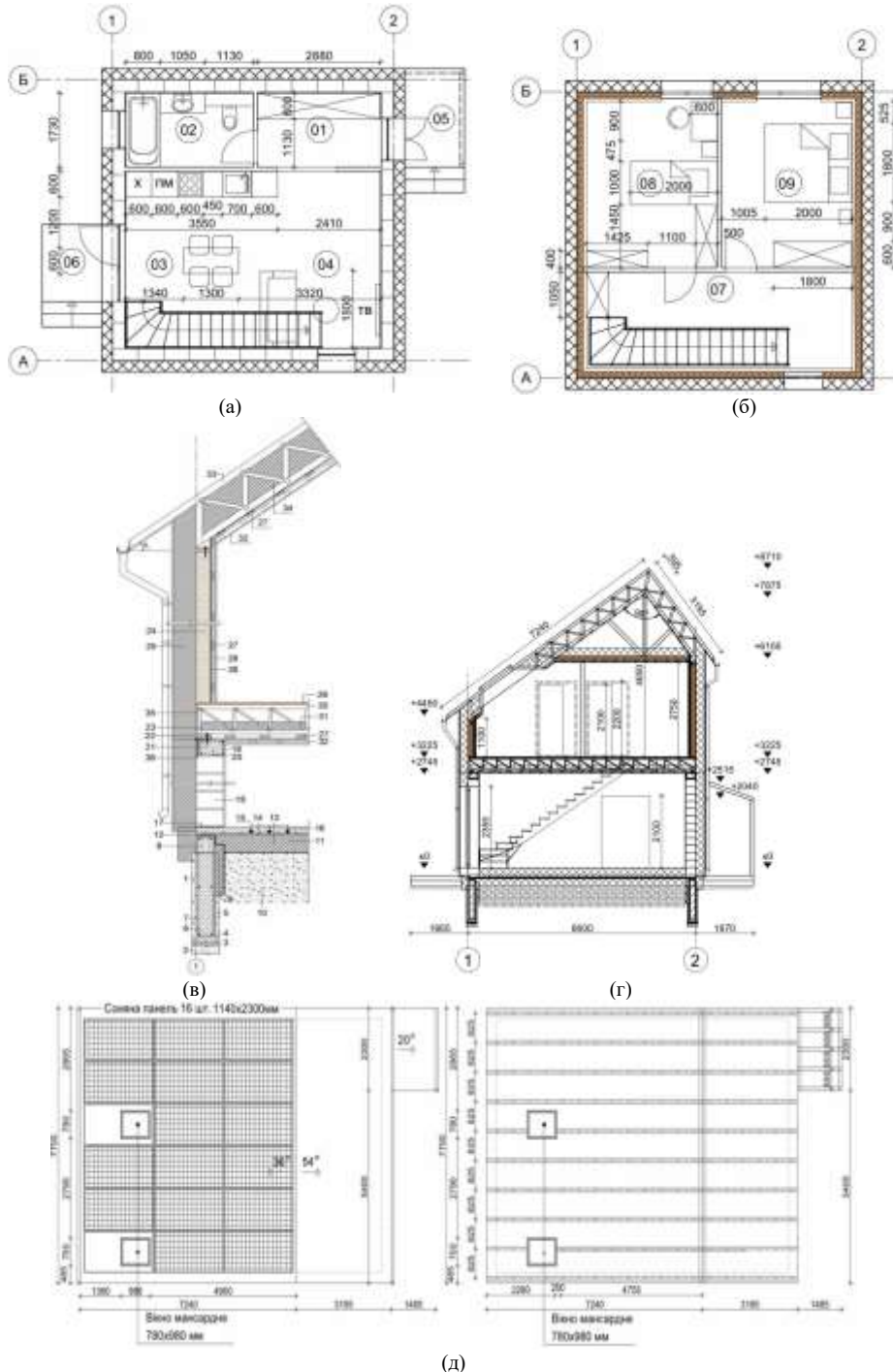


Рис. 1. Архітектурно-планувальне рішення будинку Start ТМ “Business House” за стандартом NZEB:
 (а) план першого поверху; (б) план другого поверху; (в) розріз по стіні; (г) розріз будинку;
 (д) план кроквяних ферм та покрівлі з фотопанелями сонячної електростанції

Навантаження на будівлю, що враховуються в розрахунках, задаються з урахуванням коефіцієнта надійності по граничному навантаженню $\gamma_{fm}=1.1$.

Навантаження на 1 м.п. покриття: $g_{пок} = 0,026 \text{ кПа} \cdot 0,8 \text{ м} = 0,021 \text{ кН/м.п.}$

Навантаження на 1 м.п. перекриття: постійна - $g_{пер} = 0,4162 \text{ кПа} \cdot 0,406 \text{ м} = 0,169 \text{ кН/м.п.}$; тривале навантаження - $V_{пер} = 1,95 \cdot 0,406 = 0,79 \text{ кН/м.п.}$

Снігове навантаження. Граничне розрахункове значення снігового навантаження на горизонтальну проекцію покриття (конструкції) визначається за формулою:

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C,$$

де γ_{fm} - коефіцієнт надійності за граничним значенням снігового навантаження ($\gamma_{fm} = 1.14$);

S_0 - характеристичне значення снігового навантаження (Па), визначається відповідно до п. 8.5 ($S_0 = 1.34 \text{ кПа}$); C - коефіцієнт, що визначається за формулою:

$$C = \mu \cdot C_e \cdot C_{alt},$$

де μ - коефіцієнт переходу від ваги снігового покриву на поверхні землі до снігового навантаження на покриття ($\mu = 0.9$); C_e - коефіцієнт, що враховує режим експлуатації покрівлі ($C_e = 1$); C_{alt} - коефіцієнт географічної висоти ($C_{alt} = 1$).

Для будівель з двосхилим покриттям при куті нахилу покрівлі $\alpha = 36^\circ$ (оптимальний кут встановлення сонячних електродпанелей для переважної території України), навантаження на 1 м.п. покриття: $V_{пок2} = 1.14 \cdot 1.34 \text{ кПа} \cdot 1.25 \cdot 0.7 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.8 \text{ м} = 1.47 \text{ кН/м.п.}$

Вітрове навантаження. Граничне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за формулою:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C,$$

де γ_{fm} - коефіцієнт надійності за граничним значенням снігового навантаження ($\gamma_{fm} = 1.14$);

W_0 - характеристичне значення вітрового тиску ($W_0 = 0,47 \text{ кПа}$). Коефіцієнт C визначається за формулою:

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d,$$

де C_{aer} - аеродинамічний коефіцієнт [8], що визначається за табл. 1; C_h - коефіцієнт висоти споруди, ($h=8,71+0,5=9,21\text{м}$, $C_h=1,15$); C_{alt} - коефіцієнт географічної висоти ($C_{alt}=1$); C_{rel} - коефіцієнт рельєфу ($C_{rel}=1$); C_{dir} - коефіцієнт напрямлення ($C_{dir}=1$); C_d - коефіцієнт динамічності ($C_d=1$).

Таблиця 1

Типові значення аеродинамічних коефіцієнтів

Елемент будівлі	Положення	Аеродинамічний коефіцієнт, C_{aer}	Примітки
Плоский дах	Загальна поверхня	-0.7 до -1.3	Залежить від кута атаки вітру
Скатний дах ($\theta = 30^\circ$)	Навітряна сторона	-0.5 до -0.9	При нормальному напрямі вітру
Скатний дах ($\theta = 30^\circ$)	Підвітряна сторона	-0.3 до -0.5	
Фронтон (стіна з боку вітру)	Центр	+0.8	Найвищий тиск
Бічні стіни	Вздовж довгої сторони	-0.7 до -0.9	Відсмоктування
Тильна стіна (з підвітряного боку)	Центр	-0.5 до -0.8	
Карниз, кут будівлі	Навітряний край даху	-1.2 до -1.8	Локальні підвищення всмоктуючого тиску
Кут стіни	Вітровий напрям на 45°	-1.3 до -1.6	Найнебезпечніші точки
Парапет/огорожа даху	Назовні	-0.8 до -1.5	Вплив відриву потоку

Виконання статичного розрахунку елементів дерево-каркасного будинку Start TM “Business House” програмному комплексі «ЛІРА» здійснювалось за моделлю просторової розрахункової схеми (рис. 2).

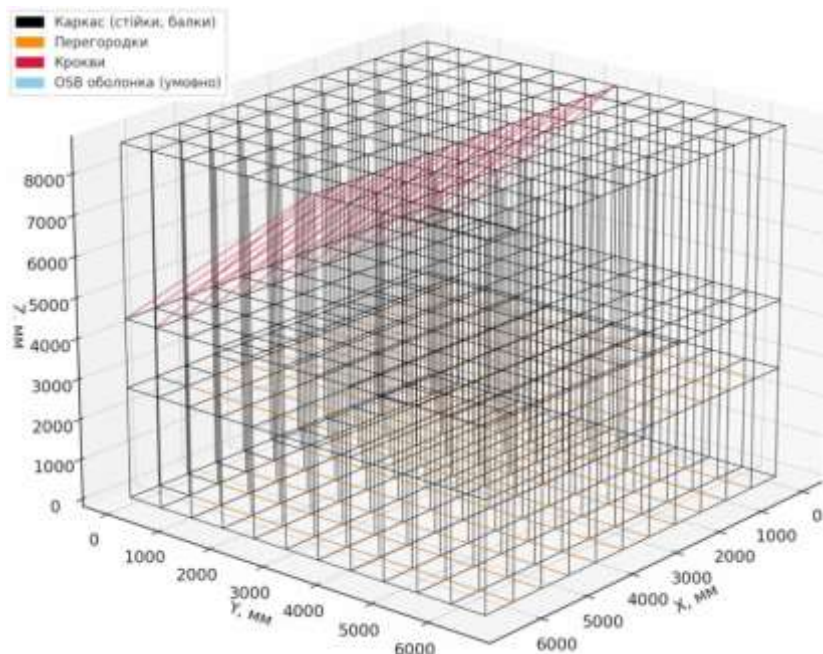


Рис. 2. Модель просторової розрахункової схеми дерево-каркасного будинку Start TM “Business House”

Стойки каркаса, елементи балок перекриття (ферми з паралельними поясами) та ферм покриття задавались стержневими кінцевими елементами типу KE 10. Обшивка каркасу плитами OSB задавалась універсальними трикутними кінцевими елементами KE 42.

Розрахунок позацинрово розтягнутих та розтягнуто-згинальних елементів здійснюється за формулою

$$\frac{N}{F_p} + \frac{MR_p}{W_{роз} R_i} \leq R_p,$$

де $W_{роз}$ – розрахунковий момент опору перерізу; F_p – площа розрахункового перетину.

Вихідні дані для розрахунку стійок першого та другого поверхів приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку стійок першого та другого поверхів

№ з/п	Параметр	Значення
1	Тип елемента	Колона
2	Розміри перерізу	$h = 3.8$ см; $b = 14$ см – першого поверху; $h = 3.8$ см; $b = 8,9$ см – другого поверху;
3	Розрахункова довжина	$L_{ou} = 0.82$ м; $L_{oz} = 0.82$ м – першого поверху; $L_{ou} = 0.84$ м; $L_{oz} = 0.84$ м – другого поверху.
4	Сорт деревини	2
5	Тип деревини	Сосна, крім веймутової
6	Закріплення елемента з площини рами	У двох місцях
7	Температурно-вологісні умови експлуатації	A1: Внутрішні опалювані приміщення при температурі до 35°C , відносній вологості повітря до 60%

Максимальні розрахункові зусилля в стійках першого поверху приведені в табл.3.

Таблиця 3

Рівень використання несучих властивостей стійок першого поверху по осях «А, Б» при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантажень

№ РКН	Міцність, % використання	Сколювання, % використання	Стійкість, % використання	Гнучкість (1), % використання	Гнучкість (2), % використання
1	40.032	3.965		13.526	49.834
2	48.598	4.0905	26.22	16.908	62.293
3	24.766	2.433	2.345	16.908	62.293
4	29.824	5.6633	10.63	16.908	62.293
5	48.771	5.2415		13.526	49.834
6	61.688	5.4013	17.284	16.908	62.293
7	66.788	5.4013	19.705	16.908	62.293
8	8.4965	4.6292	2.323	16.908	62.293
9	12.861	4.6292	7.1086	16.908	62.293
10	20.138	5.6532	5.8532	16.908	62.293
11	29.073	5.6532	9.5751	16.908	62.293

Максимальні розрахункові зусилля в стійках другого поверху приведені в табл. 4.

Таблиця 4

Рівень використання несучих властивостей стійок другого поверху по осях «А, Б» при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантаження

№ РКН	Міцність, % використання	Сколювання, % використання	Стійкість, % використання	Гнучкість (1), % використання	Гнучкість (2), % використання
1	16.29	1.766		21.797	51.05
2	18.027	0.296	31.447	27.246	63.812
3	94.075		30.931	27.246	63.812
4	65.197	4.857	22.665	27.246	63.812
5	37.574	3.748		27.246	63.812
6	48.018	2.960	24.797	27.246	63.812
7	48.018			27.246	63.812
8	35.747	5.587		21.797	51.05
9	38.307	5.587		21.797	51.05
10	19.192	15.6	7.5543	27.246	63.812
11	31.549	3.748	7.7306	27.246	63.812
12	14.965	1.392	7.7055	27.246	63.812
13	19.258	1.392		27.246	63.812

Вихідні дані для розрахунку елементів ферми перекриття з паралельними поясами приведені в табл. 5.

Таблиця 5

Вихідні дані для розрахунку елементів ферми перекриття

№ з/п	Параметр	Значення
1	Тип елемента	Колона
2	Розміри перерізу	$h = 8.9$ см; $b = 3.8$ см
3	Розрахункова довжина	Верхнього і нижнього пояса: $L_{0y} = 0.512$ м; $L_{0z} = 0.512$ м; Розкосів: $L_{0y} = 0.403$ м; $L_{0z} = 0.403$ м
4	Сорт деревини	2
5	Тип деревини	Сосна, крім веймутової
6	Закріплення елемента з площини рами	У двох місцях
7	Температурно-вологісні умови	A1: Внутрішні опалювані приміщення при температурі до 35°C, відносній вологості повітря до 60%

Максимальні розрахункові зусилля елементів нижнього поясу ферми перекриття приведені в табл. 6. Розташування ферм перекриття та геометрія розкосів дозволяє прокладку інженерних комунікацій та системи вентиляції в двох напрямках площі перекриття.

Таблиця 6

Рівень використання несучих властивостей елементів нижнього поясу ферми перекриття при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантажень

№ РКН	Міцність, % використання	Сколювання, % використання	Стійкість, % використання	Гнучкість (1), % використання	Гнучкість (2), % використання
1	15.312			13.26	31.055
2	37.634		18.025	16.574	38.819
3	50.998			13.26	31.055
4	87.862			13.26	31.055
5	46.237			13.26	31.055
6	47.454		11.109	16.574	38.819
7			72.766		
8			51.986		
9			55.571		
10			4.2296		

Максимальні розрахункові зусилля елементів нижнього поясу ферми перекриття приведені в табл. 7.

Таблиця 7

Рівень використання несучих властивостей розкосів ферми перекриття при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантажень

№ РКН	Міцність, % використання	Сколювання, % використання	Стійкість, % використання	Гнучкість (1), % використання	Гнучкість (2), % використання
1	15.312			10.457	24.492
2	17.836		5.8995	13.071	30.615
3	34.612		2.6393	13.071	30.615
4	66.252		6.4067	13.071	30.615
5	25.303		0.68487	13.071	30.615
6		4.713		13.071	30.615
7			22.201	13.071	30.615

Розрахунки свідчать про раціональне використання вибраного поперечного перерізу елементів ферми. Так, для елементів нижнього поясу визначальним є РКН-4, при цьому запас по міцності становить близько 12%, а для розкосів визначальним також є РСУ-4, при цьому запас міцності становить близько 34%.

Висновки

1. Здійснено аналіз архітектурно-планувальних та конструктивних рішень малоповерхового житлового енергоефективного будинку Start ТМ “Business House” стандарту NZEB для індустріального виробництва з типових конструктивних елементів. Для конструктивних елементів будівлі прийнято універсальні пиломатеріали з розмірами поперечного перерізу 38×90 мм та 38×140 мм, з можливістю прокладки інженерних комунікацій відновлюваних джерел енергії та системи рекуперації повітря.

2. Застосуванням моделі просторової розрахункової схеми будівлі та програмного комплексу «ЛІРА» досліджено напружено-деформований стан прийнятих конструктивних рішень будівлі. Виконаний аналіз рівня використання несучих властивостей елементів каркаса (стійок першого і другого поверху) і ферми перекриття (нижнього поясу, розкосів) при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантажень.

3. Проведено перевіорний розрахунок елементів каркаса: стійок першого і другого поверху, елементів ферми перекриття на міцність перерізів по нормальній до осі навантаження, на сколювання, стійкість, а також на виконання вимог щодо граничної гнучкості. Розрахунок використання поперечного перерізу стійок другого поверху 38x90 мм є достатнім, але

критичним при РКН 3 - 94.075%, де запас міцності складає лише 5,025 %. Таким чином стійки першого і другого поверхів будинку необхідно застосовувати з поперечним перерізом 38x140 мм. Дані розрахунків свідчать про раціональне використання обраного поперечного перерізу стійок першого поверху і елементів ферми перекриття.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кісіль М.І. Розрахунок дерев'яних конструкцій: методи і нормативна база. – Київ: ЛіраСофт, 2018. – 220 с.
2. Глущко В. І. Будівлі класу NZEB в умовах України: проєктні рішення // Наукові праці ОДАБА. – 2023. – №97. – С. 88–94.
3. Журавльов А.В., Саленко І.С. Розрахунок дерев'яних ферм в умовах реальної експлуатації // Будівельні конструкції. – 2020. – №5. – С. 102–109.
4. Gustavsson L., Sathre R. Energy and CO₂ analysis of wood substitution in construction // Climatic Change. – 2011. – Vol. 105. – P. 129–153. DOI: 10.1007/s10584-010-9876-8.
5. Gustavsson L., Pingoud K., Sathre R. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 67. – P. 612–624. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.056.
6. ДБН В.2.6-161:2017. Дерев'яні конструкції. – Київ: Мінрегіон України, 2017. – 85 с.
7. ДСТУ Б В.1.2-2:2006. Навантаження та впливи. Навантаження від вітру (аналог EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions).
8. Leskovaar V. Ž., Premrov M. Influence of sheathing stiffness on timber frame walls // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 98. – P. 853–861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.108.
9. Перегінєць І.І. Основи організації будівництва будівель з позитивним енергобалансом за критеріями товарних одиниць // Просторовий розвиток. – 2025. – №11. – С. 489. – К.: КНУБА. DOI: 10.32347/2786-7269. 2025. 11. 489–509

REFERENCES

1. Kisil M. I. Rozrakhunok derev'nykh konstrukttsii: metody i normatyvna baza (Calculation of wooden structures: methods and regulatory framework). – Kyiv: LiraSoft, 2018. – 220 p.
2. Glushko V. I. Budivli klasu NZEB v umovakh Ukrainy: proiektni rishennia (NZEB class buildings in the conditions of Ukraine: design solutions) // Scientific works of ODABA. – 2023. – No. 97. – P. 88–94.
3. Zhuravlev A. V., Salenko I. S. Rozrakhunok derev'nykh ferm v umovakh realnoi ekspluatatsii (Calculation of wooden trusses in conditions of real operation) // Building structures. – 2020. – No. 5. – P. 102–109.
4. Gustavsson L., Sathre R. Energy and CO₂ analysis of wood substitution in construction // Climatic Change. – 2011. – Vol. 105. – P. 129–153. DOI: 10.1007/s10584-010-9876-8.
5. Gustavsson L., Pingoud K., Sathre R. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 67. – P. 612–624. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.056.
6. DBN V.2.6-161:2017. Wooden structures. – Kyiv: Minregion of Ukraine, 2017. – 85 p.
7. DSTU B V.1.2-2:2006. Loads and impacts. Wind loads (analog of EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions).
8. Leskovaar V. Ž., Premrov M. Influence of sheathing stiffness on timber frame walls // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 98. – P. 853–861. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.108.
9. Pereginets I.I. Osnovy orhanizatsii budivnytstva budivel z pozytyvnyim enerhobalansom za kryteriiamy tovarnykh odyntys (Fundamentals of the organization of construction of buildings with a positive energy balance based on the criteria of commodity units) // Spatial development. – 2025. – No. 11. – P. 489. – K.: KNUBA. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.489-509.

Стаття надійшла 07.07.2025

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКЦІЇ ДЕРЕВ'ЯНОГО КАРКАСУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ СТАНДАРТУ NZEB

У роботі досліджено напружено-деформаційний стан елементів дерев'яного каркасу будівель з близьким до нульового споживанням енергії. Обґрунтовано, що дерев'яні каркасні конструкції широко розглядаються як ефективна альтернатива традиційним (бетону, сталі) з точки зору екології та енергоефективності. Здійснено аналіз архітектурно-планувальних та конструктивних рішень малоповерхового житлового енергоефективного будинку Start TM "Business House" стандарту NZEB для індустріального виробництва з типових конструктивних елементів. Застосуванням моделі просторової розрахункової схеми будівлі та програмного комплексу «ЛІРА» досліджено напружено-деформований стан прийнятих конструктивних рішень будівлі. Створено просторову модель із використанням стержневих KE10 та оболонкових KE42 елементів. Застосовано жорсткість обшивки як зсуву діафрагму. Навантаження на будівлю, що враховуються в розрахунках задавалися з урахуванням коефіцієнтом надійності по граничному навантаженню Виконаний аналіз рівня використання несучих властивостей елементів каркаса (стійок першого і другого поверху) і ферми перекриття (нижнього поясу, розкосів) при максимальних зусиллях від розрахункових комбінацій навантажень.

Проведено перевірочний розрахунок елементів каркаса: стійок першого і другого поверху, елементів ферми перекриття на міцність перерізів по нормальній до осі навантаження, на сколювання, стійкість, а також на виконання вимог щодо граничної гнучкості. Приведені аналітичні залежності для визначення навантаження на будівлю з урахуванням коефіцієнта надійності по граничному навантаженню. Дані розрахунків свідчать про раціональне використання обраного поперечного перерізу стійок першого поверху і елементів ферми перекриття. Доведено, що дерев'яний каркас забезпечує як вимоги до енергоефективності стандарту NZEB, так і високий рівень експлуатаційної надійності. Запропоновано методи розрахунку подібного класу будинків.

Ключові слова: дерев'яний каркас, енергоефективність, NZEB, напруження, деформація, рефлексивність, чисельне моделювання, ПК ЛІРА.

Nazarenko I.I., Pereginets I.I.

STRESS-STRENGTH STATE OF THE WOODEN FRAME STRUCTURE OF ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS OF THE NZEB STANDARD

The work investigates the stress-strain state of wooden frame elements of buildings with close to zero energy consumption. It is substantiated that wooden frame structures are widely considered as an effective alternative to traditional ones (concrete, steel) from the point of view of ecology and energy efficiency. An analysis of architectural, planning and structural solutions of a low-rise residential energy-efficient building Start TM "Business House" of the NZEB standard for industrial production from typical structural elements was carried out. Using the model of the spatial calculation scheme of the building and the "LIRA" software complex, the stress-strain state of the adopted structural solutions of the building was investigated. An analysis of the level of use of the load-bearing properties of the frame elements (stairs of the first and second floors) and the floor truss (lower belt, braces) at maximum forces from calculated load combinations was carried out. A verification calculation of the frame elements: the first and second floor racks, the floor truss elements for the strength of the sections along the normal to the axis of the load, for chipping, stability, as well as for fulfilling the requirements for ultimate flexibility. The calculation data indicate the rational use of the selected cross-section of the first floor racks and floor truss elements. It is proven that the wooden frame provides both the energy efficiency requirements of the NZEB standard and a high level of operational reliability.

Keywords: wooden frame, energy efficiency, NZEB, stress, deformation, reflectivity, numerical modeling, LIRA PC.

УДК 624.011.1:624.074.4:620.179.1

Назаренко І.І., Перегінєць І.І. **Напружено-деформований стан конструкції дерев'яного каркасу енергоефективних будівель стандарту NZEB** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн., К.: КНУБА, 2025. – Вип. 115. – С. 76-84.

Табл. 7. Рис. 2. Бібліогр. 9 назв.

UDC 624.011.1:624.074.4:620.179.1

Nazarenko I.I., Pereginets I.I. **Stress-strength state of the wooden frame structure of energy-efficient buildings of the NZEB standard** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. 2025. – Issue 115. – P. 76-84.

Tabl. 7. Fig. 2. Ref. 9.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, професоркафедри машин і обладнання технологічних процесів Київського національного університету будівництва і архітектури НАЗАРЕНКО Іван Іванович

Адреса: 03037, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, к.603

Тел.: +38(044) 251-55-48

E-mail: nazarenko.ii@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-1888-3687>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, директор науково-технічного центру Академії будівництва України ПЕРЕГІНЕЦЬ Іван Іванович

Адреса: 03037, м.Київ, вул. Освіти 4, к.324

Тел.: +38(050) 788-61-96

E-mail: iintcabu@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3812-6509>