Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва

«Допустити до захисту»
Завідувач кафедри БДМБ,
доктор технічних наук, професор

Володимир ЯЦУН
"____" _____ 2026 р.

Кваліфікаційна магістерська робота

на тему: **ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРАЛЬНО СТИСНУТИХ СТАЛЕВИХ КОЛОН З КВАДРАТНИХ ТРУБ**

Виконав: здобувач освіти групи БІ-25 М
спеціальності G19
«Будівництво та цивільна інженерія»

Андрій ОДУД
"____" _____ 2026 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи:
доктор технічних наук, професор

Віктор ПАШИНСЬКИЙ
"____" _____ 2026 р.

Кропивницький – 2026 рік

Підписано КЕП
Центральноукраїнський національний технічний університет
Одуд Андрій Сергійович
Сертифікат: 18DF2C9B93CEA20404000000042B36401DE157906
Дійсний з 23.11.2026 13:25:59 по 23.11.2027 13:25:58

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кафедра будівельних, дорожніх машин і будівництва
Рівень вищої освіти – магістр
Спеціальність – G19 Будівництво та цивільна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Завідувач кафедри будівельних, дорожніх машин і будівництва, д.т.н., професор

Володимир ЯЦУН
29 вересня 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної магістерської роботи

студенту **Одуду Андрію Сергійовичу**

1. Тема роботи: **Дослідження характеристик центрально стиснутих сталевих колон з квадратних труб,**
керівник роботи – д.т.н., професор Пашинський Віктор Антонович
затверджені наказом по університету від 10.08.2025 р. № 24-13.
2. Термін здачі студентом закінченої роботи – 1 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: нормативна, довідкова, наукова та навчальна література з питань проєктування й використання центрально стиснутих сталевих колон, а також методів статистичного аналізу даних.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які слід розробити):
   - огляд літератури з питань проєктування й використання центрально стиснутих сталевих колон в каркасах громадських будівель;
   - аналіз максимальної несучої здатності колон з квадратних труб;
   - розроблення й програмна реалізація алгоритму проєктного розрахунку колон з квадратних труб;
   - експериментальне проєктування колон з квадратних труб;
   - аналіз технічних характеристик колон з квадратних труб.
5. Перелік графічного матеріалу: мультимедійна презентація (не менше 20 слайдів), що ілюструє методику та результати досліджень.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Науково-дослідницький	професор Пашинський В.А.		
Охорона праці	доцент Дарієнко В.В.		

7. Дата видачі завдання – 30 вересня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строки виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури з питань проєктування й використання центрально стиснутих сталевих колон в каркасах громадських будівель, а також статистичного аналізу даних.	09.10.2026	
2	Аналіз максимальної несучої здатності колон з квадратних труб.	23.10.2026	
3	Розроблення й програмна реалізація алгоритму проєктного розрахунку колон з квадратних труб.	30.10.2026	
4	Експериментальне проєктування колон з квадратних труб.	06.11.2026	
5	Аналіз технічних характеристик колон з квадратних труб.	13.11.2026	
6	Розроблення заходів з охорони праці.	20.11.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки та мультимедійної презентації, підготовка до захисту.	27.11.2026	

Студент Андрій ОДУД

Керівник КМР Віктор ПАШИНСЬКИЙ

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
				Документація загальна		
				Знову розроблена		
				Анотація	*1*	
				SUMMARY	*1*	
А4			*КМР 25G1920 ПЗ*	***Пояснювальна записка***		
				Зміст	*2*	
				Вступ	*3*	
				Розділ 1 Сталеві колони в каркасах громадських будівель	*10*	
				Розділ 2 Максимальна несуча здатність колон	*6*	
				Розділ 3 Експериментальне проєктування колон	*11*	
				Розділ 4 Розрахункові параметри колон	*8*	
				Висновки за результатами досліджень	*2*	
				Conclusions from the results of the research	*2*	
				Список використаних джерел	*3*	
				Додаток А Охорона праці при виготовленні сталевих конструкцій	*13*	
А4			*КМР 25G1920 ПЗ*	*Додаток Б Ілюстраційні матеріали (мультимедійна презентація)*		

					КМР 25G1920 ПЗ
Зм	*Лист*	*№ документа*	*Підпис*	*Дата*	
Розробив		*Одуд А.С.*			*Дослідження характеристик центрально стиснутих сталевих колон з квадратних труб*
Перевірив.		*Пашинський В.А.*			
Н. контр.		*Дарієнко В.В.*			
Затвердив		*Яцун В.В.*			

Стадія	*Аркуш*	*Аркушів*
Д	*1*	*1*

ЦНТУ гр. БІ-25 М

АНОТАЦІЯ

Одуд А.С. Дослідження характеристик центрально стиснутих сталевих колон з квадратних труб. – Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю G19 "Будівництво та цивільна інженерія". – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Досліджені технічні характеристики центрально стиснутих колон з квадратних труб для громадських будівель класів відповідальності СС2 та СС3 зі сталей класів міцності С245 та С345. Область використання колон з квадратних труб обмежується залежністю несучої здатності колони з найбільшого в сортаменті профілю 300×14 мм від розрахункової довжини, яка з умови максимально допустимої гнучкості $\lambda \leq 200$ не перевищує 23 м.

Встановлено, що при малій довжині несуча здатність колон зі сталі С345 на 30…38% більша, ніж у колон зі сталі С245, а при гнучкості понад 120 сталь підвищеної міцності стає нераціональною. У результаті розрахунків у середовищі Microsoft Excel підібрано 23 перерізи з 50 можливих зі сталі С245 та 28 перерізів з 35 – зі сталі С345. При великих навантаженнях та висотах перерізи колон не підібрані внаслідок обмеження сортаменту профілем 300×14 мм.

За результатами експериментального проєктування виявлені та описані аналітичними виразами залежності габариту поперечного перерізу, гнучкості та погонної маси стержня колони зі сталей С245 та С345 від відомих значень її довжини й навантаження. Показано, що використання сталі підвищеної міцності С345 замість сталі С245 не змінює перерізи колон великої висоти при малих навантаженнях, але забезпечує зниження металоємності колон при великих навантаженнях та малих висотах до 27%, а в середньому по усіх розглянутих комбінаціях висоти й навантаження економія сталі становить 10%.

Отримані робочі формули для визначення габариту й площі перерізу, гнучкості та погонної маси стержнів колон дозволяють спрогнозувати розміри перерізу та металоємність центрально стиснутої колони без її проєктування.

Пояснювальна записка містить 68 с., 10 рис., 12 табл., 29 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЦЕНТРАЛЬНО СТИСНУТІ КОЛОНИ, КВАДРАТНІ ТРУБИ, ГНУЧКІСТЬ, ГАБАРИТ, ПЛОЩА ПЕРЕРІЗУ, ПОГОННА МАСА.

ABSTRACT

Odud A.S. Investigation of the Characteristics of Centrally Compressed Steel Columns Made of Square Hollow Sections. – Master's Thesis in the field of study G19 "Construction and Civil Engineering". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

The technical characteristics of centrally compressed columns made of square hollow sections for public buildings classified under consequence classes CC2 and CC3 were investigated. The study considers columns fabricated from steel grades C245 and C345. The application range for these columns is constrained by the load-bearing capacity of the largest available profile in the standard range (300×14 mm) relative to its effective length; based on the maximum permissible slenderness ratio ($\lambda \leq 200$), this length does not exceed 23 meters.

It was determined that for shorter lengths, the load-bearing capacity of columns made of C345 steel is 30–38% higher than that of columns made of C245 steel. However, at a slenderness ratio exceeding 120, the use of higher-strength steel becomes inefficient. Calculations performed using Microsoft Excel resulted in the selection of 23 cross-sections (out of 50 possible options) for C245 steel, and 28 cross-sections (out of 35 possible options) for C345 steel. It is shown that using higher-strength S345 steel instead of S245 steel does not alter the cross-sections of tall columns subjected to low loads; however, for columns with high loads and low heights, it reduces steel consumption by up to 27%. Across all examined combinations of height and load, the average steel savings amount to 10%.

The derived working formulas for determining the cross-sectional dimension and area, slenderness, and linear mass of column members allow for the prediction of cross-sectional dimensions and steel consumption for a centrally compressed column without the need for a full design process.

The explanatory note comprises 68 pages, 10 figures, 12 tables, and 29 references.

KEYWORDS: CENTRALLY COMPRESSED COLUMNS, SQUARE TUBES, SLENDERNESS, CROSS-SECTIONAL DIMENSION, CROSS-SECTIONAL AREA, LINEAR MASS.

З М І С Т

Вступ 3

Розділ 1 СТАЛЕВІ КОЛОНИ В КАРКАСАХ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ . 6

1.1 Вимоги до колон в каркасах громадських будівель 6

1.2 Конструкції та галузі використання центрально стиснутих колон 7

1.3 Принципи проєктування суцільних центрально стиснутих колон 10

1.4 Конструкція, матеріали та властивості колон з квадратних труб 12

1.5 Висновки з огляду літератури та завдання досліджень 14

Розділ 2 МАКСИМАЛЬНА НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ КОЛОН 16

2.1 Характеристики матеріалу для колон 16

2.2 Несуча здатність колон з квадратних труб 17

2.3 Висновки з розділу 21

Розділ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ КОЛОН 22

3.1 Завдання та план експериментального проектування 22

3.2 Методика проектного розрахунку колон трубчастого перерізу 23

3.3 Результати підбору перерізів колон з квадратних труб 26

3.4 Висновки з розділу 31

Розділ 4 РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ КОЛОН 33

4.1 Завдання й методика аналізу параметрів колон з квадратних труб 33

4.2 Габарити перерізів колон 34

4.3 Гнучкість колон 36

4.4 Площа перерізу та погонна маса стержнів колон 38

4.5 Висновки з розділу 40

					КМР 25G1920 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Одуд А.С .			Дослідження характеристик центрально стиснутих сталевих колон з квадратних труб	Літ.	Арк. 1 / Акрушів 105
Перевірив		Пашинський В.А.					
Реценз.						ЦНТУ гр. БІ-24 М	
Н. Контр.		Дарієнко В.В					
Затвердив		Яцун В.В.					

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ 41

CONCLUSIONS FROM THE RESULTS OF THE RESEARCH 43

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 45

Додаток А БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ 49

А.1 Нормативно-правова база безпеки праці при транспортуванні сталевих конструкцій 49

А.2 Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори 51

А.3 Вимоги до підготовки сталевих конструкцій до транспортування 53

А.4 Вимоги безпеки під час навантаження сталевих конструкцій 54

А.5 Вимоги безпеки під час розвантаження та складування металевих конструкцій 55

А.6 Вимоги до персоналу та засобів індивідуального захисту 57

А.7 Організаційні заходи щодо запобігання аваріям і нещасним випадкам 59

А.8 Практичні рекомендації щодо організації безпечного транспортування конструкцій 60

Додаток Б ІЛЮСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 62

В С Т У П

Актуальність теми. В каркасах громадських будівель використовуються сталеві колони, зокрема колони з гнутозамкнутих зварних профілів у формі квадратних і прямокутних труб. Порівняно з іншими типами перерізів, такі колони характеризуються високою несучою здатністю за рахунок більших радіусів інерції, хорошими конструктивними властивостями та естетичним зовнішнім виглядом.

При компонуванні каркасу необхідно оцінити можливість використання колон з квадратних труб при заданій висоті та навантаження, орієнтовні габарити поперечного перерізу та витрати сталі на колону. Для цього необхідно провести дослідження технічних характеристик центрально стиснутих колон з квадратних труб та встановити їх залежності від навантаження й висоти колони.

Викладені міркування підтверджують актуальність дослідження технічних характеристик центрально стиснутих колон з квадратних труб та обґрунтованість вибору теми кваліфікаційної магістерської роботи.

Мета дослідження: виявити область можливого використання центрально стиснутих колон з квадратних труб, проаналізувати їх технічні характеристики та встановити їх залежності від висоти й навантаження на колону.

Сформульовану мету дослідження можна реалізувати шляхом послідовного розв'язання таких **завдань**:

1. Вибрати й проаналізувати сортамент квадратних труб та сталі, які доцільно використовувати в колонах громадських будівель.
2. Шляхом аналізу несучої здатності найбільшого профілю в сортаменті встановити область можливого використання центрально стиснутих колон з квадратних труб.
3. З урахуванням виявленої області використання, реально можливих значень висоти колон і навантажень на них розробити план експериментального проєктування центрально стиснутих колон з квадратних труб.

4. Реалізувати проєктний розрахунок центрально стиснутих колон з квадратних труб в середовищі Microsoft Excel та виконати підбір перерізів колон зі сталей двох класів міцності при усіх можливих комбінаціях висоти й навантаження згідно з розробленим планом експериментального проєктування.
5. Проаналізувати основні технічні характеристики запроєктованих колон (коефіцієнт використання стійкості, гнучкість, габарити та площу поперечного перерізу, погонну масу), виявити й описати аналітичними виразами залежності цих характеристик від висоти й навантаження на колону.
6. Розробити рекомендації щодо попереднього оцінювання розмірів перерізу та витрат сталі на центрально стиснуті колони з квадратних труб.

Об'єкт дослідження: залежності основних технічних характеристик центрально стиснутих колон з квадратних труб від визначальних факторів: висоти колони та навантаження на неї.

Предмет дослідження: коефіцієнт використання стійкості, гнучкість, габарити та площа поперечного перерізу, погонна маса центрально стиснутих колон з квадратних труб.

Методи дослідження: експериментальне проєктування центрально стиснутих колон з квадратних труб при різних комбінаціях навантаження й висоти колони, виявлення та статистичний аналіз основних технічних характеристик запроєктованих колон.

Наукова новизна результатів дослідження:

1) встановлено, що при гнучкості понад 120 несуча здатність колон не залежить від класу міцності сталі, що робить нераціональним використання сталей підвищеної міцності в колонах великої висоти при малих навантаженнях;
2) виявлена область раціонального використання сталі підвищеної міцності в центрально стиснутих колонах з квадратних труб;
3) встановлені й описані аналітичними виразами залежності гнучкості, габариту та площі поперечного перерізу, а також погонної маси стержнів центрально стиснутих колон з квадратних труб від навантаження й висоти колони.

Практичне значення результатів дослідження:

1) в середовищі Microsoft Excel розроблено розрахунковий бланк, який дозволяє досить легко підбирати перерізи колон з квадратних труб згідно з вимогами ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції";
2) окреслена область можливого використання центрально стиснутих колон з квадратних труб, виконаних зі сталей класів міцності С245 та С345;
3) отримані робочі формули для визначення гнучкості, габариту поперечного перерізу та погонної маси стержнів центрально стиснутих колон з квадратних труб від навантаження й висоти колони, які дозволяють перед початком проєктування оцінити розміри перерізу та металоємність колон.

Апробація та публікація результатів роботи. Основні положення магістерської роботи представлені на Міжнародній науково-технічній on-line конференції "Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи" (м. Кропивницький, листопад 2026 року).

Результати досліджень **опубліковані в тезах доповіді:** А.С. Одуд. Технічні характеристики центрально стиснутих колон з квадратних труб // Наука, інженерія та технології: сучасні виклики й перспективи. Збірник матеріалів міжнародної науково-технічної онлайн-конференції. – Кропивницький: ЦНТУ, 2026. С.

Структура роботи. Робота містить 82 сторінки, на яких викладено вступ, чотири розділи, загальні висновки та два додатки на 49 сторінках. Текст роботи проілюстровано 12 таблицями та 10 рисунками, список використаних джерел містить 29 позицій. Наведені анотації українською та англійською мовами, а також мультимедійна презентацію з 21 слайду.

Розділ 1

СТАЛЕВІ КОЛОНИ В КАРКАСАХ ГРОМАДСЬКИХ БУДІВЕЛЬ

1.1 Вимоги до колон в каркасах громадських будівель

У сучасному будівництві досить часто використовуються сталеві колони, які служать опорами для зовнішніх та внутрішніх частин будівель, утворюючи несучий каркас будівель. Використання сталевих колон пояснюється тим, що вони відрізняються високою міцністю та зручністю монтажу. Деякі дизайнери застосовують їх в якості декоративних елементів громадських будівель або окремих приміщень. Центрально стиснуті сталеві колони використовуються у в'язевих каркасах одноповерхових і багатоповерхових виробничих і цивільних будівель, в робочих площадках одноповерхових виробничих будівель, у якості опор шляхопроводів, транспортних естакад і галерей, а також деяких споруд і листових конструкцій [2, 16, 20, 25]. До них пред'являють такі вимоги [7, 16, 20]:

- несуча здатність, достатня для сприйняття навантажень від вище розташованих конструкцій;
- досить великий радіус інерції поперечного перерізу, який забезпечує вищу стійкість колони при роботі на стиск;
- компактність перерізу стержня, щоб колона каркасу займала мінімум корисної площі в будівлі;
- стійкість проти корозії, яка забезпечується антикорозійними покриттями та раціональним вибором типу поперечного перерізу;
- достатню пожежну стійкість, при якій межа вогнестійкості відповідає призначенню будівлі чи споруди;
- естетичний зовнішній вигляд, особливо при використанні в каркасах громадських будівель.

Виконання цих вимог забезпечується раціональним вибором конструкції колони, зокрема типу поперечного перерізу стержня, а також відповідними розрахунками й конструктивними заходами.

1.2 Конструкції та галузі використання центрально стиснутих колон

Типова конструктивна й розрахункова схема центрально стиснутої колони зображена на рисунку 1.1. Колона складається з трьох елементів [16, 20]:

- оголовок, який служить для обпирання конструкцій покриття чи перекриття або колони верхнього поверху та сприймає опорні реакції від них;
- база, призначена для передачі зусилля в колоні на бетон фундаменту або на колону нижнього поверху;
- стержень, який передає навантаження з оголовка колони на її базу й по суті є основним елементом колони, який значною мірою визначає конструктивні рішення бази та оголовка, а також витрати сталі на колону.



Рис. 1.1 Основні елементи конструкції центрально стиснутої колони

При наявності лише вертикального навантаження від вище розташованих конструкцій стержень колони працює на центральний стиск. Зазвичай кріплення в зоні оголовка та бази можна вважати шарнірними, а розрахункову довжину стержня колони приймати рівною геометричній довжині [7, 16, 20].

За конструкцією стержня колони поділяють на суцільні та наскрізні. При малих довжинах і великих навантаженнях рекомендується використовувати колони суцільного перерізу, а при великих довжинах і малих навантаженнях краще використовувати колони наскрізного перерізу [16, 20].

Суцільні колони складаються з одного прокатного елемента або виготовляються з декількох елементів, з'єднаних між собою неперервно по всій довжині стержня колони зварними швами. При цьому обидві центральні осі перерізу перетинають матеріал перерізу і називаються матеріальними осями. Перерізи суцільних колон можуть бути відкритими. які зображені на рисунку 1.2 та замкнутими, зображеними на рисунку 1.3.

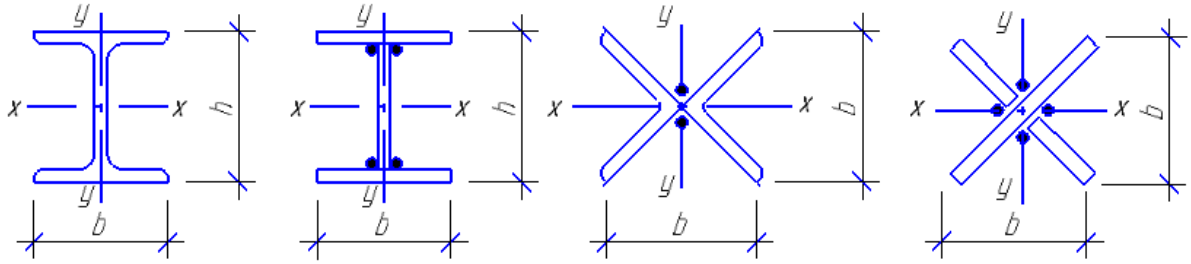

Рис. 1.2 Основні відкриті перерізи колон

Найпростішим рішенням колон відкритого перерізу є використання з прокатних двотаврів колонного типу, ширина полиці яких наближена до висоти. Звичайні двотаври балкового типу або з широкими полицями невигідні, тому що мала ширина перерізу спричинює їх низьку стійкість у площині, паралельній поличкам. При відсутності колонних прокатних двотаврів або при дуже великих навантаженнях використовують складені зварні двотаври, які виготовляють на потокових високомеханізованих та автоматизованих лініях. Відкриті складені перерізи з двох кутиків чи трьох смуг, які зображені на рисунку 1.2, застосовуються рідше унаслідок великого обсягу зварювальних робіт, необхідних для їх виготовлення.

Колони замкненого перерізу, зображені на рисунку 1.3, мають кращий зовнішній вигляд і близьку чи рівну загальну стійкість відносно обох осей. Недолік полягає у тому, що внутрішні поверхні недоступні для огляду і захисту від корозії, тому їх внутрішній об'єм треба герметизувати. Колони з двох швелерів або двох кутиків, перерізи яких зображені на рисунку 1.3, вимагають виконання двох зварних швів уздовж усього стержня, а тому в сучасний період вони практично не використовуються.

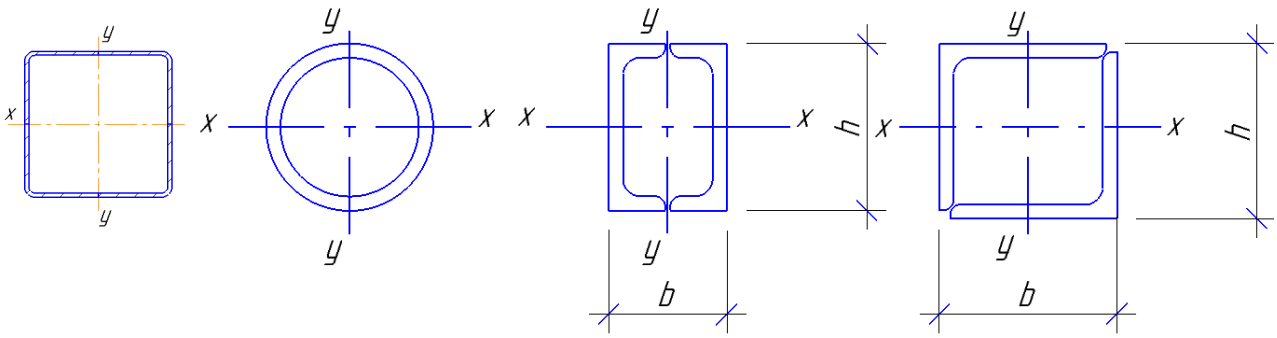

Рис. 1.3 Основні замкнуті перерізи колон

Найбільш ефективними перерізами для роботи на центральний стиск є квадратні чи круглі труби, зображені на рисунку 1.3. Ці перерізи повністю відповідає умові рівностійкості, коли гнучкість колони відносно центральної осі х-х повинна бути рівною гнучкості колони відносно центральної осі у-у:

$$l_x = l_y \quad \text{або} \quad \frac{l_{ef,x}}{l_x} = \frac{l_{ef,y}}{l_y}, \tag{1.1}$$

Умова (1.1) є однією з основних вимогою при проектуванні центрально стиснутих колон.

Недолік трубчастих перерізів полягає в труднощах конструктивного вирішення вузлів приєднання конструкцій до колони, особливо до криволінійної поверхні круглої труби. Окрім того, електрозварні круглі труби та гнутозамкнуті квадратні труби виготовляються з листового прокату шляхом гнуття та зварювання поздовжнього шва. Це робить ціни на трубчасті профілі вищими від звичайного фасонного прокату.

При великій висоті колон для забезпечення стійкості необхідно використовувати перерізи з великими радіусами інерції та часто з невеликою площею поперечного перерізу. Цим умовам відповідають наскрізні колони, які можуть виконуватися з двох швелерів чи двотаврів, або з чотирьох кутиків [7, 16, 20]. З'єднання двох чи чотирьох гілок між собою здійснюється планками або решітками, конструкції яких показані в [7, 16, 20].

1.3 Принципи проєктування суцільних центрально стиснутих колон

Проектування суцільних центрально-стиснутих колон здійснюється згідно з вимогами ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції" [7]. Підбір перерізу суцільної колони починається з визначення необхідної площі перерізу за формулою, отриманою з формули (8.3) ДБН [7]:

$$A_н = \frac{N}{\varphi R_y \gamma_c} \ , \qquad (1.2)$$

де N – розрахункове зусилля в колоні;

φ – коефіцієнт стійкості;

R_y – розрахунковий опір сталі;

γ_c – коефіцієнт умов роботи.

Для попереднього встановлення коефіцієнта стійкості φ орієнтовно задаються гнучкістю $\lambda = l_{ef} / i$. Для суцільних колон з розрахунковим навантаженням до 1500-2500 кН та довжиною 5…6 м можна задатися гнучкістю $\lambda = 100 - 70$, для більш потужних колон з навантаженням 2500…4000 *кН* $\lambda = 70 - 50$ (при більшому навантаженні встановлюють меншу гнучкість).

Задавшись гнучкістю λ, визначаємо необхідний радіус інерції, який відповідає прийнятій гнучкості:

$$i = l_{ef,x} / \lambda \ , \qquad i = l_{ef,y} / \lambda \qquad (1.3)$$

де $l_{ef,x}$, $l_{ef,x}$ – розрахункові довжини колони відносно до осей *x* та *y*.

Розрахункові довжини $l_{ef,x}$ та $l_{ef,y}$ дорівнюють відстаням між точками закріплення колони в'язями у відповідних напрямках. При відсутності проміжних закріплень розрахункова довжина дорівнює висоті колони. При цьому враховують також спосіб закріплення кінців колони (шарнір, жолрстке затиснення тощо) за вказівками таблиці 13.7 ДБН [7].

За необхідною площею перерізу (1.2) та радіусами інерції (1.3) з сортаменту обирають профіль з близькими характеристиками, виписують його фактичну площу, товщину елементів та радіуси інерції й виконують перевірку його стійкості за вказівками розділу 8 ДБН [7] у наступному порядку.

Визначають гнучкості відносно обох осей:

$$\lambda_x = l_{ef,x} / i_x \ , \qquad \lambda_y = l_{ef,y} / i_y \tag{1.4}$$

Згідно з пунктом 13.4.1 ДБН [7], гнучкість стержня колони не повинна перевищувати 200. За необхідністю слід обрати з сортаменту більший переріз.

За більшою гнучкістю обчислюють умовну гнучкість:

$$\overline{\lambda} = \lambda_{\max} \sqrt{R_y / E} \tag{1.5}$$

де R_y – розрахунковий опір сталі за межею текучості;

E – модуль пружності сталі.

Значення коефіцієнта φ визначають для кривої стійкості типу a, b, c, що відповідає типу перерізу колони за формулою (8.4) з ДБН [7]:

$$\varphi = (0{,}5 / \overline{\lambda}^2)(\delta - \sqrt{\delta^2 - 39{,}48\lambda^{-2}}), \tag{1.6}$$

де $\overline{\lambda}$ – умовна гнучкість за (1.5);

$$\delta = 9{,}87(1 - \alpha + \beta\lambda) + \lambda^2,$$

$\alpha \, i \, \beta$ – коефіцієнти з таблиці 8.1 ДБН [7] для типу кривої стійкості, що відповідає типу перерізу колони.

Значення коефіцієнта стійкості можна визначити на за формулою (1.6), а за таблицею Ж.1 з ДБН [7] з інтерполяцією по умовній гнучкості, або за більш детальними таблицями з [17, 19], які не потребують інтерполяції.

Виконують перевірку стійкості стержня колони за формулою (8.3) ДБН []:

$$N / (\varphi A) \le R_y \gamma_c \tag{1.7}$$

Якщо гранична нерівність (1.7) не виконується, або виконується з надмірно великим запасом, з сортаменту вибирають більший або менший профіль і повторюють розрахунки за формулами (1.4)…(1.7). Переріз має бути підібраний таким чином, що з урахуванням обмеження гнучкості величиною 200 та виконання нерівності (1.7) у межах використаного сортаменту профіль не можна було зменшити.

1.4 Конструкція, матеріали та властивості колон з квадратних труб

Завдання нашого дослідження полягає в аналізі характеристик центрально стиснутих колон з квадратних труб. Завдяки тому, що матеріал рознесений далеко від центра ваги, такий переріз має один з найбільших радіусів інерції при певній площі перерізу, а тому обраний тип колон повинен бути досить ефективним. Окрім того, плоскі стінки полегшують кріплення інших конструкцій, порівняно з колонами з круглих труб. Саме тому колони з квадратних труб застосовуються в легких каркасах будівель, приклади яких показані на рисунку 1.4.



Рис. 1.4 Колони з квадратних труб у каркасах будівель

На рисунку 1.5 показано загальний вигляд виготовлених колон з квадратних труб, який дозволяє зрозуміти конструкції оголовків та баз, призначених для обпирання на фундаменти. З рисунків 1.4 та 1.5 видно, що такі колони мають досить просту конструкцію та гарний зовнішній вигляд. Підвищена, порівняно з колонами відкритого перерізу, корозійна стійкість забезпечується герметизацією внутрішнього простору трубчастого стержня. Протипожежна стійкість може бути забезпечена шляхом використання фарб, які спучуються при нагрівання та служать теплоізоляцією від дії вогню.




Рис. 1.5 Загальний вигляд колон з квадратних труб

Для колон з квадратних труб використовуються гнуті замкнуті зварні профілі квадратного перерізу за сортаментом [10, 12, 19]. Відкинувши малі профілі, які явно непридатні для виготовлення колон, а також профілі з товщиною стінки меншою за 4 мм, отримуємо сортамент з 56 профілів, граничні характеристики яких вказані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Межі зміни характеристик поперечного перерізу профілів з квадратних труб

Профілі	Позначення профілів	Площа перерізу, см^2	Радіус інерції, см
Найменший	60×4	8,68	2,27
Найбільший	300×14	155,0	11,58

З таблиці видно, що сортамент [19] містить профілі з досить широким діапазоном характеристик. Аналіз показав, що крок зміни площі поперечного перерізу становить 0,5…18,7% при середньому значенні 5,5%. Найбільші кроки зростання площі характерні для малих перерізів, які рідко використовуються для колон реальних будівель. Отже, обраний сортамент квадратних труб дозволяє підібрати перерізи колон з середнім запасом стійкості 4…7%.

1.5 Висновки з огляду літератури та завдання досліджень

Виконаний огляд літературних джерел з питань проєктування центрально стиснутих сталевих колон дозволяє зробити такі **висновки**:

1. У будівництві широко використовуються сталеві центрально стиснуті колони, які можуть мати різні конструктивні форми: суцільні відкритого та замкнутого перерізу, а також двогілкові та чотиригілкові наскрізні колони, які доцільно використовувати при великих висотах.

2. Досить ефективною конструкцією є колони з гнутих замкнутих зварних профілів (квадратних труб), які характеризуються зменшеними витратами сталі унаслідок порівняно великих радіусів інерції поперечних перерізів, підвищеною корозійною стійкістю та хорошим зовнішнім виглядом, а тому використовуються в каркасах громадських і виробничих будівель.

3. Для проєктування й виготовлення центрально стиснутих колон можуть бути використані квадратні труби, стандартизований сортамент яких охоплює понад півсотні профілів з достатньо широким діапазоном площ поперечного перерізу та радіусів інерції.

4. Колони з квадратних труб мають достатньо прості конструкції оголовків та баз, що сприяє їх використанню в каркасах будівель.

5. Методика розрахунку суцільних центрально стиснутих колон унормована в ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції" та може бути автоматизована в середовищі Microsoft Excel.

6. В доступній літературі не виявлені рекомендації щодо попереднього визначення витрат сталі на колони з квадратних труб залежно від відомої висоти та заданого навантаження.

Виходячи з викладеного, сформульована така **мета кваліфікаційної магістерської роботи:** виявити область можливого використання центрально стиснутих колон з квадратних труб, проаналізувати їх технічні характеристики та встановити їх залежності від висоти й навантаження на колону.

Сформульовану мету дослідження можна реалізувати шляхом послідовного розв'язання таких **завдань**:

1. Вибрати й проаналізувати сортамент квадратних труб та сталі, які доцільно використовувати в колонах громадських будівель.
2. Шляхом аналізу несучої здатності найбільшого профілю в сортаменті встановити область можливого використання центрально стиснутих колон з квадратних труб.
3. З урахуванням виявленої області використання, реально можливих значень висоти колон і навантажень на них розробити план експериментального проєктування центрально стиснутих колон з квадратних труб.
4. Реалізувати проєктний розрахунок центрально стиснутих колон з квадратних труб в середовищі Microsoft Excel та виконати підбір перерізів колон зі сталей двох класів міцності при усіх можливих комбінаціях висоти й навантаження згідно з розробленим планом експериментального проєктування.
5. Проаналізувати основні технічні характеристики запроєктованих колон (коефіцієнт використання стійкості, гнучкість, габарити та площу поперечного перерізу, погонну масу), виявити й описати аналітичними виразами залежності цих характеристик від висоти й навантаження на колону.
6. Розробити рекомендації щодо попереднього оцінювання розмірів перерізу та витрат сталі на центрально стиснуті колони з квадратних труб.

Розділ 2

МАКСИМАЛЬНА НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ КОЛОН

2.1 Характеристики матеріалу для колон

Гнуті замкнуті квадратні профілі та круглі електрозварні прямошовні труби виготовляються з листової сталі, характеристики якої й необхідно враховувати при розрахунку колон трубчастого перерізу. Судячи з сортаменту [19], товщина стінок квадратних труб не перевищує 14 мм. Мінімальна товщина стінок прийнята рівною 4 мм.

Вибір матеріалу здійснюємо згідно з додатком А ДБН [7], орієнтуючись на колони громадських будівель. Групу конструкцій визначаємо в таблиці 2.1 за вказівками пункту А.1 з урахуванням таблиць А.1 і А.2 ДБН [7].

Таблиця 2.1

Визначення групи конструкцій для колон громадських будівель

Чинник	Позначення	Характеристика	Бали
Клас відповідальності	S_1	СС2	0
Клас відповідальності	S_1	СС3	4
Категорія за призначенням	S_2	А	11
Категорія за напруженим станом	S_3	ІІ	5
Наявність напружень розтягу	S_4	немає	2
Несприятливий вплив зварних з'єднань	S_5	немає	2
Сума для класу відповідальності СС2			20
Сума для класу відповідальності СС3			24

Для колон будівель класу відповідальності СС2 отримуємо S_{tot} = 20 балів, що відносить їх до конструкцій групи 3.

Для колон будівель класу відповідальності СС3 отримуємо S_{tot} = 24 бали, що відносить їх до конструкцій групи 2.

Згідно з таблицею Г.1 ДБН [7], в обох випадках для виготовлення колон можна використати сталь звичайної міцності класу С245 або сталь підвищеної міцності класу С345.

Для листової сталі класу С245 за ДСТУ 8539:2015 [8] товщиною 4…20 мм отримуємо характеристичний опір R_{yn}=235 МПа, що за формулою з таблиці 7.1 ДБН [7] дає розрахунковий опір R_y=235/1,025=229 МПа.

Для листової сталі класу С345 за ДСТУ 8539:2015 [8] товщиною 4…10 мм отримуємо характеристичний опір R_{yn}=345 МПа, що за формулою з таблиці 7.1 ДБН [7] дає розрахунковий опір R_y=345/1,025=337 МПа. Для тієї ж сталі товщиною 10…20 мм отримуємо R_{yn}=325 МПа та R_y=325/1,025=317 МПа.

Таким чином, подальші розрахунки виконуємо з урахуванням таких розрахункових опорів для листового прокату за ДСТУ 8539:2015 [8] зі сталей:

С245 товщиною 4…20 мм – R_y = 229 МПа

С345 товщиною 4…10 мм – R_y = 337 МПа

С345 товщиною 10…20 мм – R_y = 317 МПа

2.2 Несуча здатність колон з квадратних труб

У даному підрозділі окреслена область можливого використання квадратних труб у центрально стиснутих колонах. Для цього визначена несуча здатність колон з найбільшого в сортаменті [19] профілю 300×14 мм, який має площу перерізу A = 155,0 см^2 та радіус інерції i = 11,58 см, при різних значеннях розрахункової довжини. Виходячи з вказівки пункту 13.4.1 ДБН [7] щодо найбільшої гнучкості стиснутих елементів $\lambda \le 200$, визначаємо найбільшу можливу розрахункову довжину колони:

$$L_{\max} = 200 \times i_{\max} = 200 \times 11{,}58 = 2316\ см\,. \qquad (2.1)$$

З метою побудови графічних залежностей несучої здатності від висоти колони виконаємо обчислення в межах $1 \le L \le 23$ м з кроком 1 м. для обраних у попередньому підрозділі двох класів міцності сталі: С245 і С345. результати обчислень наведені в таблицях 2.2 і 2.3, які наведені у вигляді копії розрахункового аркуша Microsoft Excel.

Представлений у вигляді таблиці 2.2 розрахунковий аркуш у рядках 2 і 3 містить довідкові дані про розрахунковий опір сталі та коефіцієнти у формулах (8.4) і (8.5) ДБН [7] з таблиці 8.1 ДБН [7], необхідні для визначення коефіцієнта стійкості. У стовпцях наведена така інформація:

A – задана розрахункова довжини колони у метрах;

B – розрахунковий опір сталі у МПа;

C – позначення профілю (зовнішній розмір і товщина стінки);

D – площа перерізу в см^2;

E – радіус інерції перерізу в см;

Таблиця 2.2

Максимальна несуча здатність колон зі сталі С245

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		**Визначення несучої здатності центрально стиснутої колони**							
2	Сталь	4...20	Сталь	4...10	10...20	γ_c		Коеф. для типу а	
3	С 245	229	С 345	327	317	0,95		0,03	0,06
4	***L, м***	***R, МПа***	***Профіль***	***A, см^2***	***i, см***	***λ***	***$\lambda_{ум}$***	***φ***	***N, кН***
5	1	229	300x14	155,0	11,58	9	0,29	1,000	3372
6	2	229	300x15	155,0	11,58	17	0,58	0,995	3356
7	3	229	300x16	155,0	11,58	26	0,86	0,977	3294
8	4	229	300x17	155,0	11,58	35	1,15	0,957	3227
9	5	229	300x18	155,0	11,58	43	1,44	0,934	3151
10	6	229	300x19	155,0	11,58	52	1,73	0,908	3061
11	7	229	300x20	155,0	11,58	60	2,02	0,876	2952
12	8	229	300x21	155,0	11,58	69	2,30	0,836	2818
13	9	229	300x22	155,0	11,58	78	2,59	0,787	2655
14	10	229	300x23	155,0	11,58	86	2,88	0,730	2463
15	11	229	300x24	155,0	11,58	95	3,17	0,668	2251
16	12	229	300x25	155,0	11,58	104	3,46	0,604	2035
17	13	229	300x26	155,0	11,58	112	3,74	0,542	1828
18	14	229	300x27	155,0	11,58	121	4,03	0,468	1577
19	15	229	300x28	155,0	11,58	130	4,32	0,407	1374
20	16	229	300x29	155,0	11,58	138	4,61	0,358	1208
21	17	229	300x30	155,0	11,58	147	4,89	0,317	1070
22	18	229	300x31	155,0	11,58	155	5,18	0,283	954
23	19	229	300x32	155,0	11,58	164	5,47	0,254	856
24	20	229	300x33	155,0	11,58	173	5,76	0,229	773
25	21	229	300x34	155,0	11,58	181	6,05	0,208	701
26	22	229	300x35	155,0	11,58	190	6,33	0,189	639
27	23	229	300x36	155,0	11,58	199	6,62	0,173	584

F – гнучкість стержня за формулою (1.4);

G – умовна гнучкість стержня за (1.5);

H – коефіцієнт стійкості за формулою (8.4) ДБН [7];

I – несуча здатність стержня колони у кілоньютонах, визначена з формули (8.3) з урахуванням даних, вказаних у відповідному рядку розрахункового бланка та коефіцієнта умов роботи $\gamma_c = 0{,}95$:

$$N = A \times \varphi \times R_y \times \gamma_c . \qquad (2.2)$$

де розрахунковий опір R_y слід виразити в кН/см^2.

Таблиця 2.3

Максимальна несуча здатність колон зі сталі С345

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1		**Визначення несучої здатності центрально стиснутої колони**							
2	Сталь	4...20	Сталь	4...10	10...20	γ_c		Коеф. для типу а	
3	С 245	229	С 345	327	317	0,95		0,03	0,06
4	***L, м***	***R, МПа***	***Профіль***	***A, см^2***	***i, см***	***λ***	***$\lambda_{ум}$***	***φ***	***N, кН***
34	1	317	300x14	155,0	11,58	9	0,34	1,000	4668
35	2	317	300x15	155,0	11,58	17	0,68	0,989	4616
36	3	317	300x16	155,0	11,58	26	1,02	0,967	4512
37	4	317	300x17	155,0	11,58	35	1,36	0,941	4395
38	5	317	300x18	155,0	11,58	43	1,69	0,911	4253
39	6	317	300x19	155,0	11,58	52	2,03	0,873	4077
40	7	317	300x20	155,0	11,58	60	2,37	0,825	3852
41	8	317	300x21	155,0	11,58	69	2,71	0,765	3570
42	9	317	300x22	155,0	11,58	78	3,05	0,694	3239
43	10	317	300x23	155,0	11,58	86	3,39	0,619	2887
44	11	317	300x24	155,0	11,58	95	3,73	0,546	2547
45	12	317	300x25	155,0	11,58	104	4,07	0,460	2147
46	13	317	300x26	155,0	11,58	112	4,40	0,392	1829
47	14	317	300x27	155,0	11,58	121	4,74	0,338	1577
48	15	317	300x28	155,0	11,58	130	5,08	0,294	1374
49	16	317	300x29	155,0	11,58	138	5,42	0,259	1208
50	17	317	300x30	155,0	11,58	147	5,76	0,229	1070
51	18	317	300x31	155,0	11,58	155	6,10	0,204	954
52	19	317	300x32	155,0	11,58	164	6,44	0,183	856
53	20	317	300x33	155,0	11,58	173	6,78	0,166	773
54	21	317	300x34	155,0	11,58	181	7,11	0,150	701
55	22	317	300x35	155,0	11,58	190	7,45	0,137	639
56	23	317	300x36	155,0	11,58	199	7,79	0,125	584

За даними таблиць 2.2 і 2.3 на рисунку 2.1 побудований графік залежності несучої здатності колон зі сталей С245 та С345 від їх розрахункової довжини. З рисунка видно, що несуча здатність центрально стиснутої колони сильно знижується з ростом довжини відповідно до змін коефіцієнта стійкості φ. При малій довжині та невеликих значеннях гнучкості несуча здатність колон зі сталі С345 на 30…38% більша, ніж у колон зі сталі С245. З ростом гнучкості різниця зменшується, а при $\lambda > 120$ несучі здатності стають рівними. Точка зближення кривих близька до значення $\bar{\lambda} = 3{,}8$, при якому формула (8.4) з ДБН [7] замінюється на вираз $\varphi = 7{,}6/\bar{\lambda}^2$. Зона високих гнучкостей відповідає області дії формули Ейлера, яка дає критичні напруження втрати стійкості, залежні лише від модуля пружності, а не від межі плинності матеріалу [16, 20].

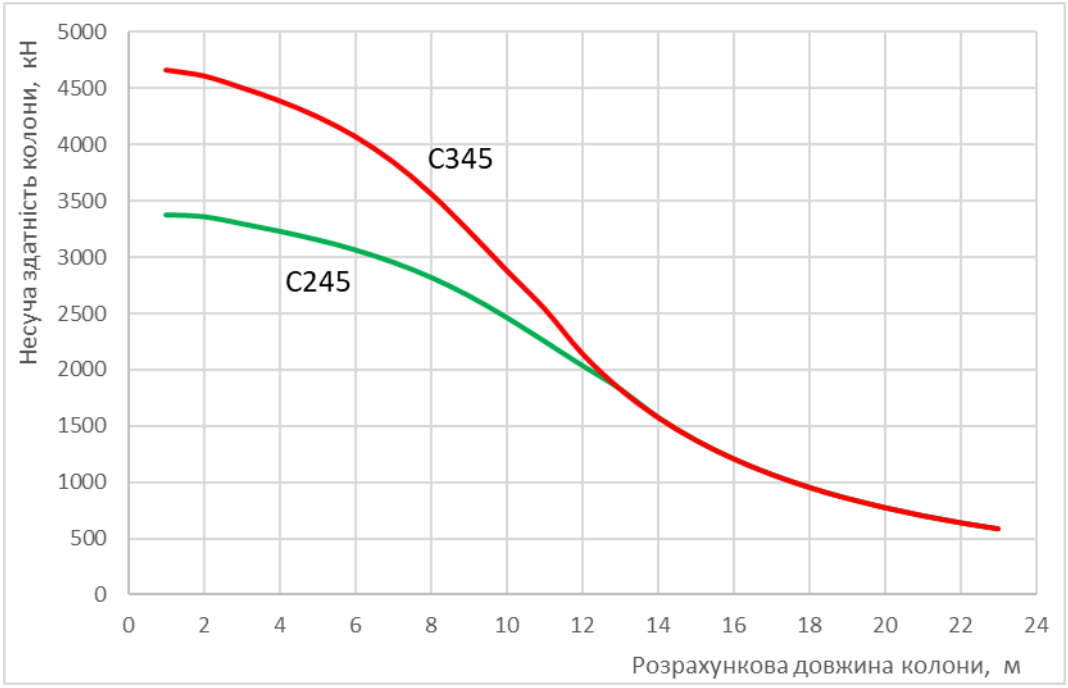

Рис. 2.1 Залежності несучої здатності від довжини колони

Проведене порівняння показує, що використання сталей підвищеної міцності у стиснутих елементах може бути вигідним лише при невеликих значеннях гнучкості цих стержнів. Для більш точного встановлення області раціонального використання сталей підвищеної міцності в центрально стиснутих колонах слід порівняти різницю несучих здатностей з різницею цін на сталі.

2.3 Висновки з розділу

1. Для колон громадських будівель класів відповідальності СС2 та СС3 згідно з вимогами ДБН В.2.6-198:2014 "Сталеві конструкції" встановлено, що вони відносяться до конструкцій групи 2 і групи 3. Для цих колон обрані сталі класів міцності С245 та С345 та визначені їх розрахункові опори згідно з ДБН В.2.6-198:2014 та ДСТУ 8539:2015.

2. На основі розрахункових формул і вимог ДБН В.2.6-198:2014 у середовищі Microsoft Excel розроблений розрахунковий бланк, який дозволяє визначати несучу здатність центрально стиснутого стержня при відомій довжині, характеристиках перерізу та розрахунковому опорі сталі.

3. За результатами розрахунків для колон з найбільшого в сортаменті квадратних труб профілю 300×14 мм із сталей класів міцності С245 та С345 встановлені залежності несучої здатності від розрахункової довжини колон. Найбільша можлива довжина, рівна 23 м, обмежена вимогою ДБН В.2.6-198:2014 до максимально допустимої гнучкості центрально стиснутого стержня $\lambda \leq 200$.

4. При малій довжині та невеликих значеннях гнучкості несуча здатність колон зі сталі С345 на 30…38% більша, ніж у колон зі сталі С245. З ростом гнучкості різниця зменшується, а при $\lambda > 120$ несучі здатності стають рівними. Отриманий результат вказує на нераціональність використання сталей підвищеної міцності в стиснутих стержнях з великими значеннями гнучкості.

5. Отримані залежності несучої здатності стиснутого стержня з найбільшого в сортаменті профілю 300×14 мм від його розрахункової довжини окреслюють область можливого використання квадратних труб у колонах громадських будівель та дозволяють розробити план експериментального проєктування центрально стиснутих колон при різних висотах і навантаженнях.

Розділ 3
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ КОЛОН

3.1 Завдання та план експериментального проектування

Експериментальне проєктування колон виконується з метою встановлення залежностей характеристик поперечного перерізу від навантаження N та розрахункової довжини колони L. Для цього необхідно підібрати перерізи з сортаменту квадратних труб для усіх можливих комбінацій N та L, які охоплюють усю область можливого використання цих профілів. Область можливого використання колон з квадратних труб проаналізована у попередньому розділі та в таблиці 3.1. Максимально можлива розрахункова довжина дорівнює L = 23,2 м. При шарнірному обпиранні на фундамент та в районі оголовка ця величина дорівнює висоті колони. Приймемо такі значення висоти колон: 4, 8, 12, 16, 20 м.

Найбільше навантаження, яке може витримати колона з найбільшим в сортаменті [19] перерізом 300×14 мм, виконана зі сталі класу міцності С245 при коефіцієнті стійкості φ = 1 дорівнює 3488 кН, а зі сталі С345 – 4914 кН.

Найменше навантаження, яке може діяти на колону громадської будівлі, орієнтовно оцінимо як для колони, що підтримує покрівлю одноповерхової будівлі павільйонного типу. Вага квадратного метра утепленої покрівлі по сталевому профільованому настилу може становити 0,8…1,2 кПа. Снігове навантаження в першому районі за ДБН [6] дорівнює 0,8×1,14 = 0,91 Па (коефіцієнт надійності 1,14 відповідає строку експлуатації будівлі 100 років). Сумарне навантаження становить 1,7…2,1 Па. Для колони крайнього ряду каркасу будівлі з прольотом 9 м та кроком колон 4 м, вантажна площа становить 4,5×4 = 18 м^2. Тоді поздовжня сила в колоні близька до 36…39 кН.

З округленням приймемо найменше значення поздовжньої сили в колоні рівним 50 кН. Наступні значення поздовжньої сили отримаємо шляхом збільшення на 500 кН до досягнення максимальної несучої здатності колони з

найбільшої в сортаменті квадратної труби перерізом 300×14 мм. У результаті викладених міркувань отримуємо план експериментального проєктування, наведений в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

План експериментального проєктування колон з квадратних труб

Показники	Значення
Найбільший переріз у сортаменті	300×14
Площа перерізу, см^2	155,0
Радіус інерції, см	11,58
Максимальна висота, м	23,2
Прийняті висоти колон, м	4 8 12 16 20
Розрахунковий опір сталі С245, МПа	229
Несуча здатність для сталі С245, кН	3488
Прийняті значення поздовжніх сил для сталі С245, кН	50 550 1050 1550 2050 2550 3050
Кількість варіантів для сталі С245	35
Розрахунковий опір сталі С345, МПа	317
Несуча здатність зі сталі С345, кН	4914
Прийняті значення поздовжніх сил для сталі С345, кН	50 550 1050 1550 2050 2550 3050 3550 4050 4550
Кількість варіантів для сталі С345	50

З таблиці видно, що всього може реалізуватися 5×7 = 35 комбінацій висоти й навантаження на колону зі сталі С245 та 5×10 = 50 комбінацій для колон зі сталі С345. Фактична кількість розрахунків буде істотно меншою за рахунок того, що при великих значеннях навантажень і розрахункової довжини колони перерізи в межах сортаменту [19] підібрати не вдасться унаслідок малих величин коефіцієнтів стійкості, які в рази зменшать несучу здатність стержнів при стиску.

3.2 Методика проектного розрахунку колон трубчастого перерізу

Проєктний розрахунок центрально стиснутих колон з квадратних труб реалізується шляхом підбору перерізів з сортаменту, наведеного в [19]. Після виключення профілів з габаритами перерізу меншими за 60 мм та профілів з

товщиною стінки 3 мм у сортаменті залишилося 56 гнутих замкнутих профілів з площами перерізу від 8,7 см^2 до 155 см^2. Профілі з товщиною менше 4 мм можна віднести до тонкостінних конструкцій, на які дія ДБН [7] не поширюється.

Підбір перерізів виконується в інтерактивному режимі з використанням розрахункового бланку, розробленого в середовищі Microsoft Excel. Структура цього бланку показана на рисунку 3.1 на прикладі підбору перерізів колон зі сталі С345 при розрахунковій довжині L = 16 м та L = 20 м.

Комірки розрахункового бланку містять такі дані:

У рядках 2 і 3 наведені довідкові дані про розрахунковий опір сталі та коефіцієнти у формулах (8.4) і (8.5) ДБН [7] з таблиці 8.1 ДБН [7], необхідні для визначення коефіцієнта стійкості за кривою типу "а".

Подальші рядки містять таку інформацію в стовпцях:

A – розрахункова довжини колони у метрах;

B – розрахункове навантаження в кільньютонах;

C – розрахунковий опір сталі у МПа;

D – позначення профілю (зовнішній розмір і товщина стінки);

E – площа перерізу в см^2;

F – радіус інерції перерізу в см;

G – гнучкість стержня за формулою (1.4);

H – умовна гнучкість стержня за (1.5);

I – коефіцієнт стійкості за формулою (8.4) ДБН [7];

J – коефіцієнт використання стійкості за формулою (8.3) ДБН [7].

Рядки з початковими даними та результатами розрахунку для кожної колони можуть коректно копіюватися, що дозволяє підібрати довільну кількість перерізів колон при різних значеннях висоти, навантаження та розрахункового опору сталі. Якщо гнучкість стержня у стовпці G перевищує вказане в ДБН [7] допустиме значення 200, або коефіцієнт використання міцності отриманий більшим за одиницю, відповідна комірка виділяється червоним кольором, що вказує на помилку підбору перерізу.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		**Підбір перерізів колон з квадратних труб**								
2	Сталь	4...20	Сталь	4...10	10...20	γ_c		Коеф. для типу а		
3	С 245	229	С 345	327	317	0,95		0,03	0,06	
4	***L, м***	***N, кН***	***R, МПа***	**Профіль**	***A, см²***	***i, см***	***λ***	$\lambda_{ум}$	***φ***	**Alfa**
61	16	50	327	250x8	75,8	9,82	163	6,49	0,180	0,112
62	16	550	327	300x8	89,9	11,94	134	5,34	0,267	0,702
63	16	1050	317	300x12	135	11,65	137	5,39	0,262	0,937
64	16	1550	317	300x14	155	11,58	138	5,42	0,259	1,219
65	20	50	327	300x8	89,9	11,94	168	6,67	0,171	0,100
66	20	550	327	300x9	101	11,9	168	6,70	0,169	0,982
67	20	1050	317	300x14	155	11,58	173	6,78	0,166	1,291
68										
69			**R**	**Профіль**	**A**	**i**				
70			327	60x4	8,68	2,27				
71			327	70x4	10,3	2,67				
72			327	60x5	10,6	2,22				
73			327	80x4	12,2	3,07				
74			327	60x6	12,3	2,18				

Рис. 3.1 Розрахунковий бланк для підбору перерізів центрально стиснутих колон з квадратних труб

Починаючи з рядка 69, розрахунковий бланк містить дані сортаменту, необхідні для розрахунку, а також розрахунковий опір сталі С345, що відповідає товщині стінки профілю. Розрахунковий опір сталі С245 $R_y = 229$ Мпа не залежить від товщини прокату в межах 4…20 мм і вводиться безпосередньо в комірки стовпця С.

Підбір перерізів колон виконується в такому порядку:

- у наступний рядок копіюються формули у стовпцях G…J;
- у комірки стовпців А, В вводяться значення довжини колони й навантаження;
- у комірки стовпців С…F з сортаменту, розміщеного внизу бланку, копіюються характеристики обраного перерізу;
- при незадовільних результатах копіюється характеристики перерізу з більшою чи меншою площею;

- переріз колони вважається підібраним правильно, коли в межах використаного сортаменту його неможливо зменшити, гнучкість не перевищує 200, а коефіцієнт використання стійкості максимально близький до одиниці та не перевищує її;
- у наступний вводяться наступні значення навантаження й висоти колони і повторюється підбір перерізу до вичерпання сортаменту.

Рядки сортаменту внизу розрахункового бланку відсортовані за величиною площі перерізу, що полегшує вибір найменшого можливого профілю.

На рисунку 3.1 показано, що при L = 16 м та N = 1550 кН, а також при L = 20 м та N = 1050 кН колона з найбільшого профілю 300×14 перенапружена. Отже, при цих та наступних комбінаціях висоти й навантаження підібрати переріз з квадратної труби за сортаментом [19] неможливо.

3.3 Результати підбору перерізів колон з квадратних труб

За викладеною в попередньому підрозділі методикою підібрані перерізи колон із сталей класів міцності С245 та С345 для усіх можливих комбінацій навантаження й висоти колони. Результати підбору наведені в таблицях 3.2 і 3.3, у рядках яких для кожної колони наведені початкові дані, проміжні результати розрахунків та результат остаточної перевірки стійкості.

Аналіз таблиць 3.2 і 3.3 показує, що з 30 можливих комбінацій висоти й навантаження успішно підібрані перерізи 23 колон зі сталі С245 та 28 колон зі сталі С345 з 50 можливих комбінацій висоти й навантаження. В обох випадках використані профілі квадратних труб у межах від 70×4 до 300×14, які практично охоплюють увесь сортамент [19]. Рядки таблиць 3.2 і 3.3, де відсутні результати розрахунків, вказують на неможливість підбору перерізів унаслідок недостатньої несучої здатності найбільшої в сортаменті квадратної труби 300×14 мм.

Таблиця 3.2

Результати підбору перерізів колон зі сталі С245

L, *м*	***N,*** ***кН***	***R,*** *МПа*	Профіль	***A,*** *см²*	***i,*** *см*	***λ***	***λ*** *ум*	***φ***	Alfa
4	50	229	70×4	10,3	2,67	150	4,99	0,305	0,696
4	550	229	160×5	30,7	6,29	64	2,12	0,862	0,908
4	1050	229	200×7	52,8	7,83	51	1,70	0,910	0,954
4	1550	229	250×8	75,8	9,82	41	1,36	0,941	0,949
4	2050	229	300×9	101,0	11,90	34	1,12	0,959	0,924
4	2550	229	250×13	119,0	9,58	42	1,39	0,938	0,997
4	3050	229	300×13	145,0	11,62	34	1,15	0,957	0,959
4	3550								
8	50	229	120×4	18,5	4,71	170	5,66	0,237	0,498
8	550	229	200×6	45,6	7,88	102	3,38	0,619	0,851
8	1050	229	250×8	75,8	9,82	81	2,72	0,764	0,792
8	1550	229	300×8	89,9	11,94	67	2,23	0,846	0,890
8	2050	229	300×10	113,0	11,79	68	2,26	0,842	0,941
8	2550	229	300×12	135,0	11,65	69	2,29	0,838	0,984
8	3050								
12	50	229	160×4	24,7	6,33	190	6,32	0,190	0,465
12	550	229	250×8	75,8	9,82	122	4,07	0,458	0,692
12	1050	229	300×9	101,0	11,90	101	3,36	0,624	0,727
12	1550	229	300×10	113,0	11,79	102	3,39	0,617	0,971
12	2050	229	300×14	155,0	11,58	104	3,46	0,604	0,957
12	2550								
16	50	229	250×8	75,8	9,82	163	5,43	0,258	0,112
16	550	229	300×8	89,9	11,94	134	4,47	0,381	0,702
16	1050	229	300×12	135,0	11,65	137	4,58	0,362	0,937
16	1550								
20	50	229	300×8	89,9	11,94	168	5,58	0,244	0,100
20	550	229	300×9	101,0	11,90	168	5,60	0,242	0,982
20	1050								
Мінімум			70x4	10,3	2,67	34		0,190	0,100
Максимум			300x14	155,0	11,94	190		0,959	0,997

Таблиця 3.3

Результати підбору перерізів колон зі сталі С345

L, *м*	***N,*** ***кН***	***R,*** *МПа*	Профіль	***A,*** *см*^{2}	***i,*** *см*	***λ***	$\lambda_{ум}$	***φ***	Alfa
4	50	327	70×4	10,3	2,67	150	5,97	0,213	0,696
4	550	327	160×4	24,7	6,33	63	2,52	0,801	0,851
4	1050	327	200×5	38,4	7,93	50	2,01	0,876	0,954
4	1550	327	200×8	59,8	7,78	51	2,05	0,871	0,910
4	2050	327	250×8	75,8	9,82	41	1,62	0,918	0,901
4	2550	327	300×8	89,9	11,94	34	1,33	0,943	0,920
4	3050	317	250×12	111	9,63	42	1,63	0,917	0,945
4	3550	317	300×11	124	11,74	34	1,34	0,943	0,958
4	4050	317	300×13	145	11,62	34	1,35	0,942	0,936
4	4550	317	300×14	155	11,58	35	1,36	0,941	0,984
8	50	327	120×4	18,5	4,71	170	6,77	0,166	0,498
8	550	327	200×5	38,4	7,93	101	4,02	0,470	0,931
8	1050	317	200×10	73,4	7,68	104	4,09	0,455	0,991
8	1550	327	250×9	84,7	9,78	82	3,26	0,647	0,865
8	2050	327	300×8	89,9	11,94	67	2,67	0,773	0,903
8	2550	317	300×10	113	11,79	68	2,66	0,774	0,920
8	3050	317	300×12	135	11,65	69	2,69	0,768	0,928
8	3550	317	300×14	155	11,58	69	2,71	0,765	0,945
8	4050								
12	50	327	160×4	24,7	6,33	190	7,55	0,133	0,465
12	550	327	250×8	75,8	9,82	122	4,87	0,321	0,692
12	1050	327	300×8	89,9	11,94	101	4,00	0,474	0,754
12	1550	327	300×9	101	11,9	101	4,02	0,471	0,997
12	2050	317	300×13	145	11,62	103	4,05	0,463	0,963
12	2550								
16	50	327	250×8	75,8	9,82	163	6,49	0,180	0,112
16	550	327	300×8	89,9	11,94	134	5,34	0,267	0,702
16	1050	317	300×12	135	11,65	137	5,39	0,262	0,937
16	1550								
20	50	327	300×8	89,9	11,94	168	6,67	0,171	0,100
20	550	327	300×9	101	11,9	168	6,70	0,169	0,982
20	1050								
Мінімум			70×4	18,5	4,71	34		0,133	0,100
Максимум			300×14	155,0	11,94	190		0,943	0,997

Позначення отриманих перерізів колон наведені й проаналізовані в таблиці 3.4, яка складена за даними таблиць 3.2 і 3.3. З таблиці видно, що використання сталі С345 призводить до зменшення поперечних перерізів підібраних колон, Випадки зменшення перерізів відмічені в таблиці 3.4 заливкою зеленим кольором. Виняток складають колони великої висоти під малі навантаження, перерізи яких були підібрані з умови неперевищення встановленої в ДБН [7] норми гнучкості 200, а тому залишилися однаковими для обох сталей.

Таблиця 3.4

Перерізи колон зі сталей С245 та С345

N, кН	Перерізи колон зі сталі С245 при висоті				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	70×4	120×4	160×4	250×8	300×8
550	160×5	200×6	250×8	300×8	300×9
1050	200×7	250×8	300×9	300×12	
1550	250×8	300×8	300×10		
2050	300×9	300×10	300×14		
2550	250×13	300×12			
3050	300×13				
	Перерізи колон зі сталі С345 при висоті				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	70×4	120×4	160×4	250×8	300×8
550	160×4	200×5	250×8	300×8	300×9
1050	200×5	200×10	300×8	300×12	
1550	200×8	250×9	300×9		
2050	250×8	300×8	300×13		
2550	300×8	300×10			
3050	250×12	300×12			
3550	300×11	300×14			
4050	300×13				
4550	300×14				

В таблиці 3.5, складеній за даними таблиць 3.2 і 3.3, наведені коефіцієнти використання стійкості, які характеризують якість підбору перерізів. При правильному підборі перерізів ці коефіцієнти визначаються кроком сортаменту та випадками підбору перерізів з вимоги неперевищення встановленого в ДБН [7] допустимого значення гнучкості стержня колони $\lambda \leq 200$.

Таблиця 3.5

Коефіцієнти використання стійкості колон зі сталей С245 та С345

N, кН	Перерізи колон зі сталі С245 при висоті				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	0,696	0,498	0,465	0,112	0,100
550	0,908	0,851	0,692	0,702	0,982
1050	0,954	0,792	0,727	0,937	
1550	0,949	0,890	0,971		
2050	0,924	0,941	0,957		
2550	0,997	0,984			
3050	0,959				
	Перерізи колон зі сталі С345 при висоті				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	0,696	0,498	0,465	0,112	0,100
550	0,851	0,931	0,692	0,702	0,982
1050	0,954	0,991	0,754	0,937	
1550	0,910	0,865	0,997		
2050	0,901	0,903	0,963		
2550	0,920	0,920			
3050	0,945	0,928			
3550	0,958	0,945			
4050	0,936				
4550	0,984				

Наочне відображення ступенів використання несучої здатності колон наведене на гістограмах розподілу з рисунка 3.2. Гістограми побудовані за даними таблиці 3.5 і вказують на кількість колон з різними коефіцієнтами використання стійкості **α**. Більшість перерізів колон (12 з 23 для сталі С245 та 18 з 28 для сталі С345) підібрані з коефіцієнтами використання стійкості $0,9 < \alpha < 1$, які вказують на досить повне використання несучої здатності колон. По дві колони для обох сталей при N = 50 кН та L = 16 м і L = 20 м підібрані з умови обмеження гнучкості та мають $\alpha < 0,2$. Коефіцієнти використання стійкості в межах $0,4 < \alpha < 0,9$ отримані внаслідок обмеження гнучкості або надто великого кроку зміни площ перерізів у сортаменті квадратних труб [19].

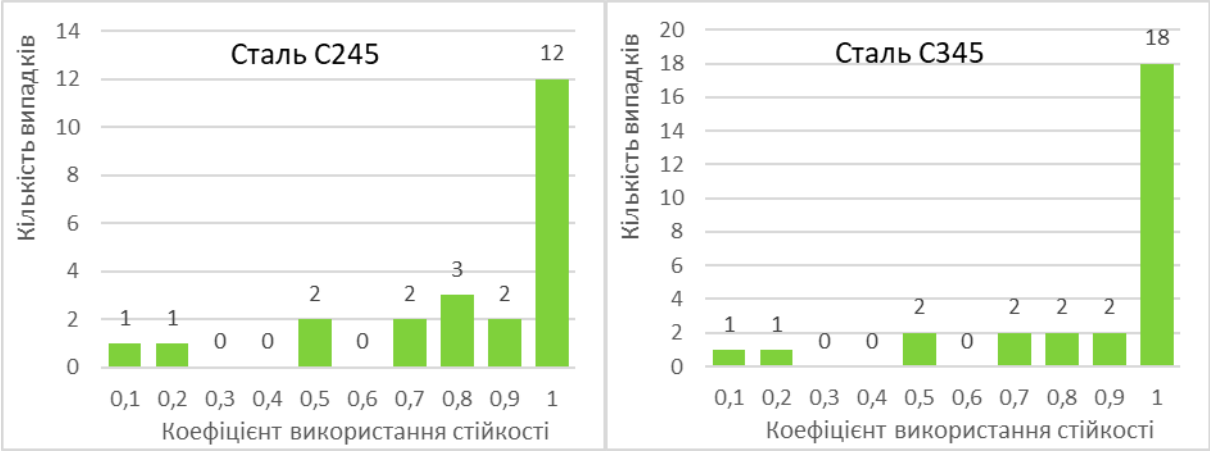

Рис. 3.2 Гістограми розподілу коефіцієнта використання стійкості

Аналіз використаного сортаменту квадратних труб показав, що різниця між площами послідовних перерізів змінюється в межах 0,5%…18,7% і в середньому становить 5,5%. Отже, в окремих випадках запас стійкості може сягати 18,7%, що дасть коефіцієнт використання стійкості 0,813. Менші значення коефіцієнта використання стійкості, які відмічені в таблиці 3.5 жовтою заливкою, відповідають випадкам підбору перерізів з умови гнучкості. З таблиці 3.5 видно, що такі результати в основному отримані для колон з малими навантаженнями та великою висотою.

Проведеним аналізом встановлено, що в межах використаного сортаменту квадратних труб [19] перерізи колон підібрані якісно. Більш детальний аналіз параметрів підібраних перерізів буде проведений в наступному розділі.

3.4 Висновки з розділу

1. З урахуванням максимальних значень несучої здатності та довжини колони з квадратної труби найбільшого перерізу 300×14 мм розроблено план експериментального проєктування колон, який передбачає розгляд 35 можливих комбінацій навантаження та висоти колони зі сталі С235 та 50 можливих комбінацій для колон зі сталі С345.

2. У середовищі Microsoft Excel розроблено розрахунковий бланк, який реалізує перевірку стійкості центрально стиснутого стержня та дозволяє в інтерактивному режимі підібрати переріз колони з квадратної труби при заданому навантаженні та розрахунковій довжині.

3. У результаті виконаних розрахунків підібрано 23 перерізи колон зі сталі С245 та 28 перерізів зі сталі С345. Перерізи збільшуються з ростом навантаження та висоти колони, але для значної частини колон при великих навантаженнях т а висотах перерізи не вдалося підібрати унаслідок обмеження сортаменту квадратних труб профілем 300×14 мм.

4. Коефіцієнти використання стійкості у більшості випадків отримані досить близькими до одиниці, але при малих навантаженнях та великій висоті колон їх перерізи підбиралися з умови обмеження гнучкості величиною 200. Це обумовило коефіцієнти використання стійкості, менші за 0,8, які вказують на неповне використання несучої здатності підібраних профілів.

Розділ 4
РОЗРАХУНКОВІ ПАРАМЕТРИ КОЛОН

4.1 Завдання й методика аналізу параметрів колон з квадратних труб

Результати виконаного експериментального проєктування дозволяють виявити закономірності зміни основних параметрів колон з квадратних труб та встановити їх залежності від навантаження й висоти. Для цього формуються таблиці залежностей від навантаження та висоти колони таких характеристик:

- габариту поперечного перерізу;
- гнучкості стержня колони;
- площі поперечного перерізу та погонної маси стержня колони.

Отримані табличні залежності описуються функціями двох змінних (навантаження N та висоти колони L). Вид цих функцій обирається за формою графічних залежностей, а їх коефіцієнти визначаються методом найменших квадратів [3, 24]. Для цього використовується функція Microsoft Excel "Пошук рішення", яка забезпечує мінімізацію цільової функції шляхом зміни коефіцієнтів обраного для апроксимації аналітичного виразу. Організація таких обчислень детально описана в посібнику [24]. Для визначення коефіцієнтів апроксимуючого аналітичного виразу формується таблиця з трьох блоків:

- перший блок містить фактичні значення досліджуваного параметра для всіх комбінацій навантаження й висоти колони, які були безпосередньо отримані в результаті експериментального проєктування;
- другий блок містить відповідні значення параметра, обчислені за обраним аналітичним виразом з поточними значеннями коефіцієнтів;
- третій блок містить відсотки відхилень обчислених значень досліджуваного параметра з другого блоку від фактичних значень з першого блоку.

Цільова функція дорівнює сумі квадратів відхилень обчислених значень з блоку 2 від фактичних з блоку 1. Функція "Пошук рішення" автоматично обчислює коефіцієнти, при яких цільова функція приймає мінімальне значення.

4.2 Габарити перерізів колон

Для отримання залежності розміру поперечного перерізу від навантаження й висоти колони за даними таблиці 3.2 сформовано перший блок таблиці 4.1, який містить фактичні значення габаритів перерізу H, отримані у результаті експериментального проєктування колон зі сталі С245. З таблиці видно, що габарит поперечного перерізу H зростає при збільшенні навантаження N та висоти колони L, але цей ріст зупиняється на величині 300 мм.

Таблиця 4.1

Апроксимація залежності габариту поперечного перерізу від навантаження й висоти колони зв сталі С245

N, кН	Габарит перерізу при висоті колони				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	70	120	160	250	300
550	160	200	250	300	300
1050	200	250	300	300	
1550	250	300	300		
2050	300	300	300		
2550	250	300			
3050	300				
	Габарит перерізу за формулою (4.1)				
Ц Ф	A	B	C		
635,75	0,124	13,5	12		
50	72	126	180	234	288
550	134	188	242	296	350
1050	196	250	304	358	412
1550	258	312	366	420	474
2050	320	374	428	482	536
2550	382	436	490	544	598
3050	444	498	552	606	660
	Відсотки відхилення				
50	3,14	5,17	12,63	-6,32	-3,93
550	-16,13	-5,90	-3,12	-1,27	
1050	-1,90	0,08	1,40		
1550	3,28	4,07			
2050	6,73				
2550					
3050					

З представлених на рисунку 4.1 залежностей габариту перерізу H від навантаження N і висоти колони L видно, що ці залежності близькі до лінійних, але зростання габариту зупиняється на рівні H = 300 мм, що відповідає найбільшому перерізу в сортаменті. Подальше збільшення площі перерізу відбувається за рахунок зростання товщини стінки гнутого профілю.

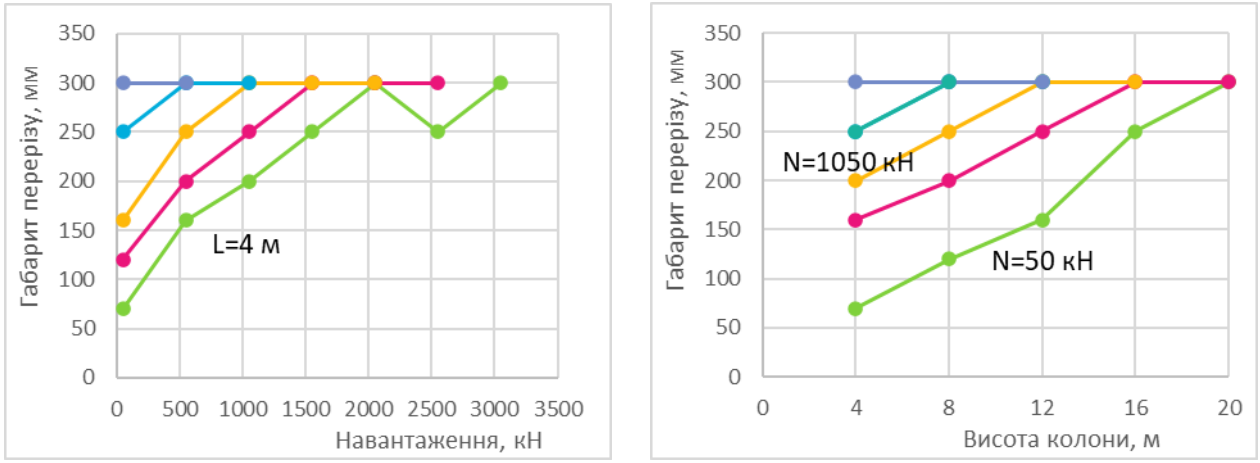

Рис. 4.1 Залежності габариту перерізу від навантаження й висоти колони

Характер залежностей, зображених на рисунку 4.1, можна описати аналітичним виразом у вигляді лінійної функції двох аргументів:

$$H = A \times N + B \times L + C\,., \qquad (4.1)$$

параметри якого A, B, C слід визначити методом найменших квадратів [24].

Для цього в таблиці 4.1 створено другий блок, який містить значення H, обчислені за формулою (4.1) при коефіцієнтах, вказаних над блоком. Третій блок таблиці 4.1 містить відсотки відхилень даних другого блоку від першого. Враховуючи значну мінливість висоти перерізу, цільова функція прийнята рівною сумі квадратів відсотків відхилення з третього блоку таблиці. При цьому враховані лише комірки, які відповідають першим значенням H = 300, Наступні такі значення при даному навантаженні чи висоті колони не враховуються, що забезпечує апроксимацію лише в області прямих ліній на рисунку 4.1. Після запуску функції "Пошук рішення" отримані коефіцієнти, вказані в таблиці 4.1.

Підстановка отриманих і округлених коефіцієнтів до (4.1) дає вираз:

$$H = 0{,}123 \times N + 13{,}5 \times L + 12 \le 300. \quad (4.2)$$

Користуючись формулою (4.2) для орієнтовного визначення розміру квадратної труби для даної колони зі сталі С245, необхідно обмежити отримане значення величиною H = 300 мм. При отриманні H > 300 мм, слід прийняти габарит H = 300 мм.

Аналогічним способом для прогнозування габариту квадратної труби для колони зі сталі С345:

$$H = 0{,}077 \times N + 13{,}7 \times L + 21 \le 300. \quad (4.3)$$

Використання формул (4.2) і (4.3) дозволяє орієнтовно спрогнозувати габарит перерізу колон зі сталей С245 та С345 за відомими значеннями навантаження N та розрахункової довжини колони L.

4.3 Гнучкість колон

Для аналізу залежності гнучкості від навантаження й висоти колони за даними таблиці 3.2 сформовано таблицю 4.2, який містить фактичні значення гнучкості λ, отримані в результаті експериментального проєктування колон зі сталі С245. За даними таблиці побудовані графіки залежності гнучкості від навантаження й висоти колони, які наведені на рисунку 4.2.

З таблиці 4.2 й рисунка 4.2 видно, що ці залежності є досить складними. Побудовані на лівому рисунку 4.2 лінії тренду показують, що залежності гнучкості від навантаження при різних значеннях висоти можуть описуватися ступеневими функціями. Загальний множник і показник ступеню залежать від висоти колони. За результатами аналізу графіків з рисунка 4.2 вирішено описати шукану залежність аналітичним виразом виду:

$$\lambda = A \times N^{B \times L + C} + D, \quad (4.4)$$

де A, B, C, D – коефіцієнти, які слід визначити методом найменших квадратів.

Таблиця 4.2

Залежність гнучкості колон зі сталі С245 від навантаження й висоти колони

N, кН	Гнучкість стержня колони при висоті:				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	150	170	190	163	168
550	64	102	122	134	168
1050	51	81	101	137	
1550	41	67	102		
2050	34	68	104		
2550	42	69			
3050	34				

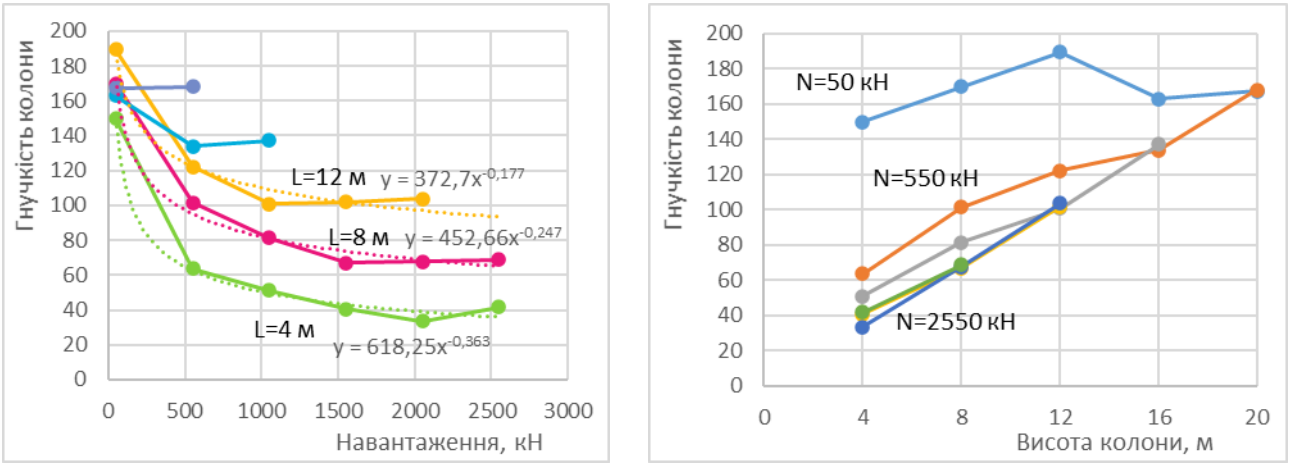

Рис. 4.2 Залежності гнучкості від навантаження й висоти колони

Визначення коефіцієнтів A, B, C, D реалізовано, згідно з рекомендаціями посібника [24], з використанням функції Microsoft Excel "Пошук рішення" таким же чином, як і для коефіцієнтів формули (4.1). У результаті виконаних розрахунків та округлення значень обчислених коефіцієнтів для колон зі сталі С245 отримана робоча формула:

$$\lambda = 926 \times N^{0,0012 \times L - 0,0353} - 694, \quad (4.5)$$

Для колон зі сталі С345 отримана формула:

$$\lambda = 547 \times N^{0,0023 \times L - 0,0611} - 323, \quad (4.6)$$

Похибки апроксимації формул (4.5) і (4.6) загалом не перевищують ±20%.

4.4 Площа перерізу та погонна маса стержнів колон

В таблиці 4.3 наведені значення погонної маси стержнів колон, виконаних зі сталей С245 та С345. З таблиці видно, що витрати сталі зростають при збільшення навантаження й висоти колони. Використання сталі С345 дозволяє зменшити погонну масу колон, відмічених в таблиці зеленим кольором, а також розширити галузь використання колон на більші навантаження.

Таблиця 4.3

Порівняння металоємності колон зі сталей С245 та С345

N, кН	Погонна маса стержня зі сталі С245 при висоті колон				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	8,1	14,5	19,4	59,5	70,6
550	24,1	35,8	59,5	70,6	79,3
1050	41,4	59,5	79,3	106,0	
1550	59,5	70,6	88,7		
2050	79,3	88,7	121,7		
2550	93,4	106,0			
3050	113,8				
	Погонна маса стержня зі сталі С345 при висоті колон				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	8,1	14,5	19,4	59,5	70,6
550	19,4	30,1	59,5	70,6	79,3
1050	30,1	57,6	70,6	106,0	
1550	46,9	66,5	79,3		
2050	59,5	70,6	113,8		
2550	70,6	88,7			
3050	87,1	106,0			
3550	97,3	121,7			
4050	113,8				
4550	121,7				
	Відсотки економії від використання сталі С345				
	4 м	8 м	12 м	16 м	20 м
50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
550	19,5	15,8	0,0	0,0	0,0
1050	27,3	3,2	11,0	0,0	
1550	21,1	5,8	10,6		
2050	25,0	20,4	6,5		
2550	24,5	16,3			
3050	23,4				

Останній блок таблиці 4.3 показує, що при малих навантаженнях і великій довжині колон їх перерізи не залежать від класу міцності сталі. З ростом навантаження та зменшенням висоти колон збільшується відсоток економії сталі, який може сягати 27%, а в середньому по усіх розглянутих комбінаціях висоти й навантаження становить 10%.

Площі перерізів та пропорційні їм погонні маси центрально стиснутих колон різних типів аналізувалися в статтях [22, 23]. Там обґрунтована можливість використання єдиного аналітичного виразу для опису залежностей погонних мас колон усіх типів від навантаження та висоти колони^

$$A = a\left(N + b\right) exp\left(c\ L\right) + d \tag{4.7}$$

Коефіцієнти a, b, c, d необхідно визначити методом найменших квадратів, як це було зроблено для попередній апроксимуючих формул. Виконані розрахунки в середовищі Microsoft Excel з використанням функції "Пошук рішення" дозволили отримати коефіцієнти, підстановка яких до формули (4.7) дала таку робочу формулу для сталі С245:

$$A = 0{,}034\left(N + 1056\right) exp\left(0{,}05\ L\right) - 35\ . \tag{4.8}$$

Для сталі підвищеної міцності класу С345 отримана формула:

$$A = 0{,}024\left(N + 974\right) exp\left(0{,}067\ L\right) - 22\ . \tag{4.9}$$

З урахуванням густини сталі, рівної 7,85 г/см^3, погонна маса стержня колони g в кг/м визначається множенням виражених у квадратних сантиметрах площ перерізу (4.) чи (4.) на 0,785. Це дає такі робочі формули:

для сталі С245 – $g = 0{,}027\left(N + 1056\right) exp\left(0{,}05\ L\right) - 29\ ;$ (4.10)

для сталі С345 – $g = 0{,}019\left(N + 974\right) exp\left(0{,}067\ L\right) - 18\ .$ (4.11)

Формули (4.10) і (4.11) дозволяють наближено спрогнозувати масу стержнів центрально стиснутих колон з квадратних труб, виконаних зі сталей С245 та С345, залежно від заданого навантаження й висоти колони.

4.5 Висновки з розділу

1. За результатами експериментального проєктування проаналізовані три параметри, які визначають властивості центрально стиснутих колон з квадратних труб: габарит поперечного перерізу, гнучкість та погонна маса стержня колони.

2. Габарити поперечних перерізів колон з квадратних труб зростають при збільшенні навантаження й висоти колони. Залежності габариту перерізу від навантаження та висоти колон, виконаних зі сталей С245 та С345, описані лінійними функціями з обмеженням габариту висотою 300 мм.

3. Гнучкість колон практично лінійно зростає при збільшенні висоти та зменшується з ростом навантаження за експонентоподібним законом. Залежності гнучкості від навантаження й висоти колон, виконаних зі сталей С245 та С345, описана ступеневим аналітичним виразом з додатковими коефіцієнтами.

4. Залежності площі поперечного перерізу та пропорційної площі погонної маси колон від їх висоти й навантаження описана формулами на основі експоненти, вид яких був обґрунтований у раніше виконаних дослідженнях. Отримані коефіцієнти цих формул для колон, виконаних зі сталей С245 та С345.

5. Використання сталі підвищеної міцності С345 замість сталі С245 забезпечує зниження металоємності колон при великих навантаженнях та малих висотах до 27%, а в середньому по усіх розглянутих комбінаціях висоти й навантаження становить 10%.

6. Отримані робочі формули для визначення габариту перерізу, гнучкості стержнів колон, площі поперечного перерізу та погонної маси стержнів колон дозволяють спрогнозувати розміри перерізу та металоємність центрально стиснутої колони з квадратної труби до початку її проєктування, а також полегшують вибір раціональних параметрів у процесі розрахунку.

ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Виконане дослідження технічних характеристик центрально стиснутих колон з квадратних труб дозволило зробити такі **висновки:**

1. Розглядаються колони громадських будівель класів відповідальності СС2 та СС3 зі сталей класів міцності С245 та С345. Область використання колон з квадратних труб обмежена залежністю несучої здатності колони з найбільшого в сортаменті профілю 300×14 мм від розрахункової довжини, яка з умови максимально допустимої гнучкості $\lambda \leq 200$ не перевищує 23 м.

2. При малій довжині та невеликих значеннях гнучкості несуча здатність колон зі сталі С345 на 30…38% більша, ніж у колон зі сталі С245. З ростом гнучкості різниця зменшується, а при $\lambda > 120$ несучі здатності стають рівними. Отриманий результат вказує на нераціональність використання сталей підвищеної міцності в стиснутих стержнях з великими значеннями гнучкості.

3. З урахуванням максимальних значень несучої здатності та довжини колони з квадратної труби найбільшого перерізу 300×14 мм розроблено план експериментального проєктування колон, який передбачає розгляд 35 можливих комбінацій навантаження та висоти колони зі сталі С235 та 50 можливих комбінацій для колон зі сталі С345.

4. У результаті розрахунків, виконаних з використанням розробленого в середовищі Microsoft Excel розрахункового бланку для перевірки стійкості центрально стиснутого стержня, підібрано 23 перерізи колон зі сталі С245 та 28 перерізів зі сталі С345. Для значної частини колон при великих навантаженнях та висотах перерізи не вдалося підібрати унаслідок обмеження сортаменту квадратних труб профілем 300×14 мм.

5. Коефіцієнти використання стійкості у більшості випадків отримані досить близькими до одиниці. Для частини колон з малими навантаженнями та великою висотою перерізи були підібрані з умови обмеження гнучкості величиною 200 при неповному використанні несучої здатності.

6. За результатами експериментального проєктування виявлені та описані аналітичними виразами залежності габариту поперечного перерізу, гнучкості та погонної маси стержня колони зі сталей С245 та С345 від відомих значень її довжини й навантаження.

7. Габарити поперечних перерізів колон з квадратних труб зростають при збільшенні навантаження й висоти колони. Гнучкість колон зростає при збільшенні висоти та зменшується з ростом навантаження. Площа поперечного перерізу та погонна маса стержня колони зростають при збільшенні навантаження й висоти.

8. Використання сталі підвищеної міцності С345 замість сталі С245 не змінює перерізи колон великої висоти при малих навантаженнях, але забезпечує зниження металоємності колон при великих навантаженнях та малих висотах до 27%, а в середньому по усіх розглянутих комбінаціях висоти й навантаження економія сталі становить 10%.

9. Отримані робочі формули для визначення габариту перерізу, гнучкості стержнів колон, площі поперечного перерізу та погонної маси стержнів колон дозволяють спрогнозувати розміри перерізу та металоємність центрально стиснутої колони з квадратної труби до початку її проєктування, а також полегшують вибір раціональних параметрів у процесі розрахунку.

CONCLUSIONS FROM THE RESULTS OF THE RESEARCH

The conducted study of the technical characteristics of centrally compressed columns made of square tubes allowed us to draw the following conclusions:

1. Columns of public buildings of responsibility classes CC2 and CC3 made of steel of strength classes C245 and C345 are considered. The scope of use of columns made of square tubes is limited by the dependence of the bearing capacity of a column from the largest profile in the assortment of 300×14 mm on the calculated length, which, given the condition of the maximum permissible flexibility $\lambda \leq 200$, does not exceed 23 m.

2. With a short length and small values of flexibility, the bearing capacity of columns made of C345 steel is 30…38% greater than that of columns made of C245 steel. With increasing flexibility, the difference decreases, and at $\lambda > 120$ the bearing capacities become equal. The obtained result indicates the irrationality of using high-strength steels in compressed rods with large flexibility values.

3. Taking into account the maximum values of the bearing capacity and length of a column made of a square tube with the largest cross-section of 300×14 mm, an experimental design plan for columns was developed, which provides for the consideration of 35 possible combinations of load and height of a column made of C235 steel and 50 possible combinations for columns made of C345 steel.

4. As a result of calculations performed using a calculation form developed in Microsoft Excel to check the stability of a centrally compressed rod, 23 sections of columns made of C245 steel and 28 sections of C345 steel were selected. For a significant part of the columns with high loads and heights, sections could not be selected due to the limitation of the range of square tubes with a profile of 300×14 mm.

5. The coefficients of stability utilization in most cases were obtained quite close to unity. For some columns with small loads and large heights, the sections were selected from the condition of limiting flexibility by 200 with incomplete use of the bearing capacity.

6. According to the results of experimental design, the dependence of the cross-sectional dimensions, flexibility and linear mass of the column rod made of steels C245 and C345 on the known values of its length and load was identified and described by analytical expressions.

7. The dimensions of the cross-sectional dimensions of columns made of square pipes increase with increasing load and column height. Column flexibility increases with increasing height and decreases with increasing load. The cross-sectional area and linear mass of the column rod increase with increasing load and height.

8. The use of high-strength steel C345 instead of steel C245 does not change the cross-sections of columns of great height at low loads, but provides a reduction in the metal content of columns at high loads and low heights of up to 27%, and on average for all considered combinations of height and load, the steel savings are 10%.

9. The obtained working formulas for determining the cross-sectional dimensions, flexibility of column rods, cross-sectional area and linear mass of column rods allow predicting the cross-sectional dimensions and metal content of a centrally compressed column made of a square tube before the start of its design, and also facilitate the selection of rational parameters in the calculation process.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виготовлення зварних балок / Stabbing. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://stabbing.ru/technology/manufacturing-of-a-welded-beam-20-welded-beam-production-and-welding-technology/
2. Гетун Г.В. Архітектура будівель та споруд. Книга 1. Основи проектування. –К.: Кондор, 2012. − 380 с.
3. Горбань І.І. Теорія ймовірностей і математична статистика для наукових працівників та інженерів.– Київ, 2003. – 244 с.
4. ДБН А.3.2-2-2009. Система стандартів безпеки праці. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення. – Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2012.
5. ДБН В.1.2-14-2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд із Зміною № 1. − К., 2022. – 35 с. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199634775304307868?doc_type=2
6. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. Зі зміною №1 і №2. К.: Мінбуд України, 2020. – 68 с. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3199621970136139233?doc_type=2
7. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі зміною № 1. К., 2022. – 220 с.
8. ДСТУ 8539:2015. Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 20 с.
9. ДСТУ 8540:2015. Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент. – Київ, ДП «УкрНДНЦ», 2016 – 11 с.
10. ДСТУ 8940:2019. Труби сталеві профільні. Технічні умови. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 22 с.

11. ДСТУ 8943:2019. Труби сталеві електрозварні. Технічні умови. – Київ: 2020. – 18 с.
12. ДСТУ EN 10219-2:2009. Профілі порожнисті зварні холодного формування з нелегованих і дрібнозернистих сталей для конструкцій. Частина 2. Розміри, граничні відхили та характеристики. – Київ; Держспоживстандарт України, 2011 – 30 с.
13. Інструкція з охорони праці під час виконання робіт з виготовлення конструкцій будівельних сталевих. [Електронний ресурс] Режим доступу: http://trudova-ohrana.ru/primery-dokumentov/prikladi-nstrukcj-z-ohoroni-prac-ukranskoju/4060-nstrukcja-z-ohoroni-prac-pri-vikonann-robt-z-vigotovlennja-konstrukcj-budvelnih-stalevih.html
14. Інструкція з охорони праці при монтажу сталевих та залізобетонних конструкцій [Електронний ресурс] Режим доступу: http://trudova-ohrana.ru/primery-dokumentov/prikladi-nstrukcj-z-ohoroni-prac-ukranskoju/4061-nstrukcja-z-ohoroni-prac-pd-chas-vikonannja-robt-z-montazhu-metalevih--zalzobetonnih-konstrukcj.html
15. Кваліфікаційна магістерська робота : метод. рекомендації для здобувачів освіти спец. 192 – Будівництво та цивільна інженерія / [уклад. : В. А. Пашинський, В. А. Настоящий] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - 33 с. Режим доступу: http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/13009
16. Клименко Ф. Є., Барабаш В. М., Стороженко Л.І. Металеві конструкції: / За ред. Ф.Є Клименка : Підручник. – 2-ге видання, випр. і доп. – Львів: Світ, 2002. – 312 с.
17. Металеві конструкції. Методичні рекомендації до практичних занять для здобувачів освіти спеціальності 192 – "Будівництво та цивільна інженерія" усіх форм навчання. / [Уклад.: В.А. Пашинський]. – Кропивницький: ЦНТУ, 2025. – 45 с. Режим доступу: https://dspace.kntu.kr.ua/items/c60fa97b-dbde-4a63-ad34-84acfb8fb23c

18. Металеві конструкції. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи "Робоча площадка промислової будівлі" для здобувачів освіти усіх форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія. / [Уклад.: Г.Д. Портнов, В.А. Пашинський, М.В. Пашинський]. – Кропивницький: ЦНТУ, 2025. - 30 с. https://dspace.kntu.kr.ua/items/7b0f766c-330c-45dc-a4a7-88fce41c6b30
19. Металеві конструкції. Методичні рекомендації та інформаційні матеріали для курсового проектування та виконання кваліфікаційних робіт здобувачами вищої освіти усіх форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія. / [Уклад.: В.А. Пашинський]. – Кропивницький: ЦНТУ, 2025. - 38 с. Режим доступу: https://dspace.kntu.kr.ua/items/26d31fc3-f04e-4def-9c3e-69fc9ae1c0ff
20. Нілов О.О., Пермяков В.О., Шимановський О.В. та ін. Металеві конструкції: Загальний курс: Підручник для вищих навчальних закладів. – Видання 2-е, переробл. і доповн.. – К.: Видавництво "Сталь", 2010. – 869 с.
21. Охорона праці. [Електронний ресурс] Режим доступу: http://um.co.ua/8/8-2/8-218071.html
22. Пашинський В.А. Вагові характеристики та галузі раціонального використання сталевих центрально стиснутих колон / В.А. Пашинський, М.В. Пашинський, І.О. Скриннік, В.В. Дарієнко // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві : Збірник наукових праць. Випуск 12. – Луцьк: ЛНТУ, 2019. – С. 146–154. doi:10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-18
23. Пашинський В.А., Василенко А.В., Ярощук І.К. Межі раціонального використання прокатних профілів у центрально стиснутих колонах // Будівельні конструкції, будівлі та споруди третього тисячоліття: Збірник матеріалів Науково-практичної інтернет-конференції. – Херсон: ДВНЗ ХДАУ, 2017. – С. 15–18.

24. Пашинський В.А., Пашинський М.В. Статистичні методи в інженерних дослідженнях. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти з інженерних спеціальностей. – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 106 с.
25. Романенко І.І. Архітектура будівель і споруд // Конспект лекцій. - Харків: ХНАМГ, 2011. – 167 с.
26. Сафонов В.В. та ін. Інженерні рішення з охорони праці при розробці дипломних проектів інженерно-будівельних спеціальностей: Навчальний посібник. – К.: Основа, 2011. – 480 с.
27. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (зі змінами та доповненнями).
28. ДБН А.3.1-5:2016. Організація будівельного виробництва.
29. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19.01.2015 № 21 «Про затвердження Правил охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робіт».

Додаток А

БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

А.1 Нормативно-правова база безпеки праці при транспортуванні сталевих конструкцій

Сталеві конструкції є одним із найважливіших елементів сучасного будівництва. Вони широко застосовуються під час зведення промислових і цивільних будівель, складських приміщень, торговельних центрів, мостів, ангарів, виробничих споруд та інших об'єктів. Використання металевих конструкцій дає змогу скоротити терміни будівництва, забезпечити необхідну міцність споруд, зменшити навантаження на фундаменти та реалізовувати складні архітектурні рішення.

Водночас транспортування сталевих конструкцій належить до робіт із підвищеним рівнем небезпеки. Це пояснюється значною масою металевих елементів, їхніми великими габаритами, специфічною формою, наявністю гострих кромок і виступаючих частин. Під час перевезення, навантаження та розвантаження можуть виникати небезпечні ситуації, пов'язані з падінням вантажу, його зміщенням, перекиданням транспортного засобу, обривом вантажозахоплювальних пристроїв або травмуванням працівників.

Особливу небезпеку становлять операції з переміщення довгомірних конструкцій: балок, ферм, колон, прогонів, металевих рам та інших великогабаритних виробів. Неправильне визначення центру ваги, недостатньо надійне кріплення або порушення технології стропування можуть призвести до аварійних ситуацій із тяжкими наслідками.

Тому організація безпечного транспортування сталевих конструкцій повинна здійснюватися відповідно до вимог законодавства України у сфері охорони праці, будівництва, промислової та дорожньої безпеки.

Безпечне транспортування сталевих конструкцій в Україні регламентується комплексом законодавчих і нормативно-технічних документів, основним з яких є Закон України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 року № 2694-XII. Він встановлює основні принципи державної політики у сфері охорони праці, визначає права працівників на безпечні умови роботи та обов'язки роботодавця щодо створення відповідних умов праці. Відповідно до цього Закону роботодавець має забезпечувати функціонування системи управління охороною праці, організовувати навчання та інструктажі працівників, забезпечувати їх засобами індивідуального захисту, здійснювати контроль за дотриманням вимог безпеки та вживати заходів щодо запобігання виробничому травматизму.

Важливе значення має ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека у будівництві. Основні положення» [4]. Цей нормативний документ поширюється на загальнобудівельні та спеціальні будівельні роботи й установлює вимоги до організації безпечного виконання будівельно-монтажних процесів. Особливо важливим для теми дослідження є розділ 8 зазначених ДБН, який регламентує транспортні та вантажно-розвантажувальні роботи на будівельному майданчику. Згідно з пунктом 8.1.1, у проєкті виконання робіт (ПВР) повинні бути передбачені організаційні заходи й технічні засоби для запобігання впливу небезпечних виробничих факторів. До них належать:

- переміщення транспортних засобів та їхніх рухомих частин;
- переміщення вантажів вантажопідіймальними механізмами;
- неправильне транспортування та складування матеріалів;
- недостатнє освітлення місць виконання робіт;
- несприятливі метеорологічні умови.

Пункт 8.1.7 [4] передбачає необхідність механізації транспортних і вантажно-розвантажувальних робіт. Це особливо важливо для сталевих конструкцій, оскільки їхня маса та габарити часто унеможливлюють безпечне ручне переміщення. Ще одним важливим документом є ДБН А.3.1-5:2016 «Організація будівельного виробництва» [28]. Він установлює загальні вимоги до

організації будівництва, підготовки виробництва, планування робіт і забезпечення комплексної безпеки на будівельних об'єктах.

Безпосередньо вантажно-розвантажувальні процеси регламентуються Правилами охорони праці під час вантажно-розвантажувальних робіт, затвердженими наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 19 січня 2015 року № 21 [29]. Ці Правила визначають вимоги до організації робочих місць, застосування вантажопідіймальних механізмів, використання такелажних пристроїв, безпечного переміщення вантажів та допуску працівників до виконання відповідних операцій.

Для експлуатації кранів, підіймальних пристроїв та відповідного обладнання застосовуються Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання, затверджені наказом Міністерства соціальної політики України від 19 січня 2018 року № 62 (НПАОП 0.00-1.80-18).

Під час автомобільного перевезення сталевих конструкцій слід керуватися Правилами дорожнього руху України, зокрема розділом 22 «Перевезення вантажу». Він установлює вимоги до маси вантажу, розподілу навантаження на осі транспортного засобу, надійності розміщення та кріплення вантажу.

А.2 Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори

Виникнення небезпечних та шкідливих виробничих факторів залежить від характеру вантажу, способу його переміщення, технічного стану обладнання, організації робочого процесу та умов навколишнього середовища. Одним із найнебезпечніших факторів є можливість падіння сталевої конструкції під час навантаження або розвантаження. Така ситуація може виникнути внаслідок неправильного стропування, використання несправних вантажозахоплювальних пристроїв, перевищення допустимої вантажопідіймальності крана або неправильного визначення маси вантажу.

Особливо небезпечним є переміщення довгомірних металевих виробів. Через значну довжину та особливості розподілу маси такі конструкції можуть змінювати положення під час підіймання, розгойдуватися або обертатися навколо точки підвішування.

Іншим небезпечним фактором є зміщення вантажу під час руху транспортного засобу. Різке гальмування, повороти, нерівності дорожнього покриття або недостатньо надійне кріплення можуть спричинити переміщення конструкцій на платформі автомобіля.

Також значну небезпеку становлять:

- защемлення рук і ніг між металевими елементами;
- порізи гострими кромками та задирками;
- падіння працівників під час закріплення конструкцій на платформі;
- наїзд транспортних засобів на працівників;
- обрив або пошкодження стропів;
- перекидання вантажопідіймальних механізмів;
- ураження електричним струмом під час роботи поблизу повітряних ліній;
- травмування внаслідок неконтрольованого розгойдування вантажу.

Окремо слід виділити фізичні фактори виробничого середовища. До них належать шум від роботи двигунів і вантажопідіймальних механізмів, вібрація, недостатнє освітлення, підвищена або знижена температура повітря, опади та сильний вітер. Несприятливі погодні умови можуть істотно ускладнювати виконання вантажно-розвантажувальних робіт. Наприклад, під час дощу металеві поверхні стають слизькими, а під час ожеледиці зростає ризик падіння працівників. Сильні пориви вітру можуть спричинити небезпечне розгойдування конструкцій, особливо великої площі.

Важливе значення має і людський фактор. Недостатня кваліфікація персоналу, відсутність належного інструктажу, порушення сигналізації між стропальником і машиністом крана, поспіх та недотримання технологічної послідовності можуть стати причинами нещасних випадків.

А.3 Вимоги до підготовки сталевих конструкцій до транспортування

Перед навантаженням необхідно провести огляд конструкцій і перевірити їхній технічний стан. Особливу увагу слід приділяти наявності деформацій, тріщин, пошкоджених зварних з'єднань, гострих виступів та інших дефектів, які можуть ускладнити переміщення або створити небезпеку для працівників.

Кожна конструкція повинна мати відомості про її масу, габаритні розміри та особливості стропування. Ця інформація необхідна для правильного вибору транспортного засобу, вантажопідіймального механізму та пристроїв. Згідно з пунктом 8.3.8 ДБН А.3.2-2-2009, виробники та постачальники матеріалів і конструкцій повинні зазначати в супровідній документації схеми зачеплення вантажів та їхню масу. На підставі цих відомостей у проєкті виконання робіт визначають способи стропування і зачеплення конструкцій.

Під час підготовки довгомірних елементів необхідно враховувати їхню жорсткість і можливість деформації під власною вагою. Наприклад, металеві балки великої довжини можуть прогинатися під час підіймання, якщо точки стропування вибрані неправильно.

Для забезпечення стійкості конструкцій під час перевезення використовують дерев'яні підкладки, прокладки, спеціальні опори та фіксатори. Вони повинні забезпечувати рівномірний розподіл навантаження й унеможливлювати безконтрольне переміщення металевих елементів.

Особливу увагу необхідно приділяти захисту поверхонь конструкцій. Для цього використовують прокладки між металевими елементами та місцями контакту з кріпильними пристроями. Це допомагає уникнути пошкодження антикорозійного покриття та зменшує ризик зісковзування вантажу. Якщо конструкції мають гострі кромки, їх необхідно захистити спеціальними накладками або передбачити відповідні заходи під час стропування. Це запобігає пошкодженню стропів і травмуванню працівників.

Перед початком робіт відповідальна особа повинна перевірити:

1. Відповідність конструкцій супровідній документації.

2. Відомості про масу та габарити вантажу.
3. Наявність визначених схем стропування.
4. Стан підкладок, прокладок і фіксувальних елементів.
5. Можливість безпечного розміщення конструкцій на транспортному засобі.
6. Відсутність небезпечних дефектів і пошкоджень.

Підготовчі заходи повинні виконуватися відповідно до технологічної документації та з урахуванням особливостей конкретного вантажу.

А.4 Вимоги безпеки під час навантаження сталевих конструкцій

Навантаження сталевих конструкцій є одним із найбільш відповідальних етапів транспортного процесу, який передбачає використання різноманітних кранів та інших механізмів. Відповідно до вимог ДБН А.3.2-2-2009, вантажно-розвантажувальні роботи з вантажами масою понад 30 кг, а також роботи з підіймання вантажів на висоту понад 2 м необхідно виконувати виключно механізованим способом.

Підготовлений робочий майданчик повинен бути достатньо рівним, очищеним від сторонніх предметів, мати належне освітлення та забезпечити безпечне розташування транспортного засобу і вантажного обладнання. У разі застосування автомобільного крана необхідно перевірити стійкість його опор і відповідність умов встановлення вимогам експлуатаційної документації виробника. Під час навантаження необхідно використовувати тільки справні стропи, траверси, скоби, захвати та інші вантажозахоплювальні пристрої. Вони повинні відповідати масі, формі та особливостям конструкції, що переміщується.

Перед застосуванням такелажного обладнання перевіряють:

- наявність маркування та відомостей про вантажопідіймальність;
- відсутність механічних пошкоджень, деформацій і тріщин;
- стан з'єднувальних елементів;
- відповідність довжини та типу стропів схемі стропування.

Важливою умовою безпечного навантаження є правильне визначення центру ваги конструкції. Неправильне розташування точок підвішування може призвести до нахилу вантажу, його вислизання або неконтрольованого обертання. Підіймання конструкції необхідно здійснювати плавно, без ривків і різких змін швидкості. Перед основним переміщенням доцільно виконати контрольне підіймання на невелику висоту, щоб переконатися в правильності стропування та стійкості вантажу.

Під час переміщення сталевих конструкцій категорично забороняється:

- перебувати під піднятим вантажем;
- знаходитися між вантажем і транспортним засобом;
- допускати сторонніх осіб у небезпечну зону;
- переміщувати вантаж над людьми;
- залишати конструкції в підвішеному стані без нагляду;
- виконувати роботи з несправними вантажозахоплювальними пристроями.

Для керування переміщенням довгомірних конструкцій можуть застосовуватися спеціальні відтяжки. Вони дозволяють контролювати положення вантажу та зменшують його розгойдування. При цьому працівники повинні перебувати поза зоною можливого затискання або удару конструкцією.

Після встановлення конструкції на платформу транспортного засобу необхідно переконатися в її стійкому положенні. Вантаж не повинен створювати небезпечного навантаження на окремі ділянки платформи або виступати за її межі з порушенням установлених вимог.

А.5 Вимоги безпеки під час розвантаження та складування металевих конструкцій

Розвантаження сталевих конструкцій на будівельному майданчику є завершальним етапом транспортного процесу, але за рівнем небезпеки воно не поступається навантаженню.

Перед початком розвантаження необхідно підготувати спеціально відведене місце для тимчасового зберігання конструкцій. Майданчик повинен бути рівним, достатньо міцним, очищеним від будівельного сміття та сторонніх предметів. Необхідно перевірити можливість безпечного під'їзду транспортного засобу і встановлення вантажопідіймального механізму. Важливою вимогою є забезпечення достатньої відстані між транспортними засобами, конструкціями, штабелями та будівлями. Відповідно до пункту 8.1.11 ДБН А.3.2-2-2009, під час розміщення автомобілів на вантажно-розвантажувальних майданчиках відстань між автомобілями, що стоять один за одним, повинна становити не менше 1 м, а між автомобілями, що стоять поряд, – 1,5 м. Відстань між вантажним автомобілем і будівлею повинна бути не менше 0,5 м. Відстань між автомобілем і штабелем вантажу повинна становити не менше 1 м.

Розвантаження повинно здійснюватися відповідно до заздалегідь розробленої технологічної карти або іншої організаційно-технологічної документації. Перед зняттям кріплень необхідно переконатися, що конструкції перебувають у стійкому положенні та не можуть самовільно переміститися після послаблення фіксаторів. Не допускається одночасне зняття всіх кріпильних елементів без попереднього оцінювання стійкості вантажу. Така дія може призвести до падіння металевих виробів або їх неконтрольованого переміщення.

Під час розвантаження необхідно використовувати вантажопідіймальні механізми відповідної вантажопідіймальності. Вибір способу стропування повинен відповідати фактичній масі та геометрії конструкції.

Після переміщення металеві елементи потрібно встановлювати на спеціальні підкладки або опори. Забороняється складати їх безпосередньо на ґрунт, якщо це створює ризик деформації, корозійного пошкодження або нестійкості штабеля. Під час складування необхідно враховувати:

- масу та довжину конструкцій;
- допустиме навантаження на основу та стійкість штабеля;
- послідовність подальшого використання конструкцій;

- можливість безпечного доступу працівників;
- відстань до транспортних шляхів та робочих зон.

Металеві балки, колони, ферми та інші довгомірні елементи потрібно розміщувати на стійких опорах, які запобігають їхньому перекочуванню, сповзанню або перекиданню. Необхідно також передбачити розділення зон складування різних типів конструкцій, щоб уникнути хаотичного розміщення металевих виробів і необхідності небезпечного переміщення одних елементів для доступу до інших. Забороняється перебування людей у зоні можливого падіння чи обрушення вантажу. Проходи та проїзди між штабелями мають бути вільними.

А.6 Вимоги до персоналу та засобів індивідуального захисту

До виконання робіт допускаються особи, які пройшли відповідне навчання, інструктажі з охорони праці, перевірку знань і медичні огляди у випадках, передбачених законодавством. Залежно від характеру робіт у транспортуванні сталевих конструкцій можуть брати участь:

- водії вантажних автомобілів;
- машиністи кранів;
- стропальники і такелажники;
- працівники складського господарства;
- відповідальні керівники робіт;
- особи, відповідальні за безпечне виконання вантажопідіймальних операцій.

Кожен працівник повинен чітко знати свої обов'язки, технологічну послідовність операцій, сигнали взаємодії та порядок дій у разі виникнення аварійної ситуації. Особливо важливу роль відіграє стропальник. Він відповідає за правильне зачеплення вантажу відповідно до встановленої схеми, перевіряє стан стропів і подає сигнали машиністу крана. Машиніст крана повинен виконувати команди уповноваженого працівника, стежити за роботою механізму та не допускати небезпечних режимів експлуатації.

Під час вантажно-розвантажувальних операцій необхідно забезпечити чітку систему сигналізації. Якщо машиніст не бачить стропальника, слід організувати зв'язок через призначеного сигнальника або за допомогою передбачених технологією засобів зв'язку.

Працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту відповідно до характеру виконуваних робіт. До основних засобів індивідуального захисту належать:

Захисна каска. Призначена для захисту голови від ударів, падіння предметів та інших механічних впливів.

Захисні рукавиці. Використовуються для запобігання порізам, подряпинам і пошкодженням рук під час контакту з металевими поверхнями.

Спеціальне взуття. Повинно мати захисний підносок і підошву, стійку до механічних пошкоджень та ковзання.

Сигнальний одяг. Забезпечує кращу видимість працівників для водіїв і машиністів вантажопідіймальних механізмів.

Захисні окуляри. Для захисту очей від пилу, металевих частинок та інших небезпечних чинників, якщо вони присутні під час виконання робіт.

Спеціальний одяг. Повинен відповідати погодним умовам, характеру робіт і забезпечувати захист від механічних забруднень та пошкоджень.

Роботодавець зобов'язаний організовувати забезпечення працівників необхідними засобами індивідуального захисту, контролювати їхній стан і своєчасно замінювати непридатні засоби.

Важливою складовою профілактики травматизму є проведення вступного, первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів у випадках, передбачених нормативними вимогами.

Працівники повинні знати, що в разі виникнення небезпечної ситуації вони мають право припинити роботу та повідомити безпосереднього керівника.

А.7 Організаційні заходи щодо запобігання аваріям і нещасним випадкам

Запобігання виробничому травматизму під час транспортування сталевих конструкцій потребує комплексного підходу, який передбачає поєднання технічних, організаційних і профілактичних заходів.

Насамперед необхідно забезпечити належне планування транспортного процесу. Для цього складають проєкт виконання робіт, технологічні карти та схеми розміщення транспортних засобів, вантажопідіймального обладнання і місць складування. Відповідальні особи повинні заздалегідь визначати послідовність виконання операцій, необхідну кількість працівників, типи механізмів і способи переміщення конструкцій. Особливу увагу потрібно приділяти розмежуванню транспортних і пішохідних зон. На будівельному майданчику повинні бути встановлені відповідні дорожні знаки, покажчики та огородження. Небезпечні ділянки необхідно позначати попереджувальними знаками, а доступ сторонніх осіб до місць виконання вантажно-розвантажувальних робіт повинен бути обмежений.

Важливим заходом є регулярна перевірка технічного стану транспортних засобів, кранів, стропів та іншого обладнання. Несправне обладнання не повинно допускатися до експлуатації. У разі виявлення дефектів необхідно припинити роботу, повідомити відповідальну особу та організувати ремонт або заміну обладнання. Для зменшення ризику аварій доцільно застосовувати такі організаційні заходи:

1. Призначення відповідальних осіб за безпечне проведення робіт.
2. Розроблення технологічних карт і схем стропування.
3. Проведення інструктажів та перевірки знань працівників.
4. Організація постійного контролю за станом вантажопідіймального обладнання.
5. Забезпечення належного освітлення робочих майданчиків.
6. Установлення чіткої системи сигналізації між працівниками.

7. Контроль за правильністю розміщення і кріплення вантажу.
8. Обмеження доступу сторонніх осіб до небезпечних зон.
9. Припинення робіт за небезпечних погодних умов відповідно до вимог експлуатаційної документації та нормативних актів.
10. Організація оперативного реагування на аварійні ситуації.

Окремо необхідно передбачити порядок надання домедичної допомоги потерпілим. На будівельному майданчику повинні бути доступні аптечки, засоби зв'язку та інформація про порядок виклику екстрених служб. У разі падіння конструкції, обриву стропа, пошкодження транспортного засобу або іншої аварійної події необхідно негайно припинити роботи, огородити небезпечну зону та не допускати до неї сторонніх осіб. Якщо внаслідок аварії є постраждалі, необхідно організувати надання домедичної допомоги та викликати екстрену медичну допомогу. Подальші дії здійснюються відповідно до встановленого порядку реагування на нещасні випадки.

Важливим напрямом профілактики є аналіз причин небезпечних подій і розроблення заходів щодо недопущення їх повторення. Таким чином, ефективна система охорони праці повинна бути спрямована не лише на ліквідацію наслідків аварій, а передусім на попередження їх виникнення.

А.8 Практичні рекомендації щодо організації безпечного транспортування конструкцій

Припустимо, що підприємство здійснює перевезення металевих балок і колон для монтажу каркаса промислової будівлі. Конструкції мають різну довжину та масу, тому потребують власного підходу до розміщення і кріплення.

На першому етапі відповідальна особа отримує інформацію про кількість конструкцій, їхню масу, габарити та особливості стропування. На основі цих даних обирається транспортний засіб і вантажопідіймальне обладнання.

На другому етапі здійснюється підготовка конструкцій. Перевіряється їхній стан, підбираються прокладки, опори та кріпильні пристрої.

На третьому етапі проводиться навантаження. Робоча зона огороджується, працівники отримують необхідні інструкції, а конструкції переміщуються за допомогою вантажопідіймального механізму.

Після встановлення конструкцій на платформу виконується їх закріплення. Відповідальна особа перевіряє стійкість вантажу та правильність розподілу навантаження.

На четвертому етапі водій здійснює перевезення за заздалегідь визначеним маршрутом. Він повинен дотримуватися правил дорожнього руху, контролювати стан вантажу та уникати небезпечних маневрів.

На п'ятому етапі після прибуття на будівельний майданчик проводиться підготовка місця розвантаження. Перевіряється стан площадки, наявність необхідного обладнання та відсутність сторонніх осіб у небезпечній зоні.

На завершальному етапі конструкції розвантажуються, встановлюються на підготовлені опори та перевіряються на стійкість.

Такий порядок організації робіт дозволяє мінімізувати ризик падіння вантажу, пошкодження конструкцій і травмування працівників. Особливо важливо, щоб усі етапи були узгоджені між собою. Недоліки підготовки на початковій стадії можуть спричинити небезпечні ситуації під час перевезення або розвантаження. Для підвищення рівня безпеки доцільно також використовувати сучасні засоби контролю: системи моніторингу транспортних засобів, датчики навантаження, спеціальні кріпильні системи та засоби дистанційного зв'язку.

Використання таких технологій сприяє підвищенню ефективності транспортного процесу та зменшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій.

Додаток Б

ІЛЮСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ
до кваліфікаційної магістерської роботи на тему:
«Дослідження характеристик центрально стиснутих сталевих колон з квадратних труб»
(21 слайд)

«Допустити до захисту»
Завідувач кафедри БДМБ,
доктор технічних наук, професор

Володимир ЯЦУН
"____" _____ 2026 р.

Виконав: здобувач освіти групи БІ-25 М
спеціальності G19
«Будівництво та цивільна інженерія»

Андрій ОДУД
"____" _____ 2026 р.

Керівник кваліфікаційної магістерської роботи:
доктор технічних наук, професор

Віктор ПАШИНСЬКИЙ
"____" _____ 2026 р.