

ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

СЕМКО ВОЛОДИМИР ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 624.014.2.004.052:693.977

**НАДІЙНІСТЬ НЕСУЧИХ ТА ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЙ ІЗ СТАЛЕВИХ ХОЛОДНОФОРМОВАНИХ
ТОНКОСТІННИХ ПРОФІЛІВ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Полтава 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор **Пічугін Сергій Федорович**, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, завідувач кафедри конструкцій із металу, дерева та пластмас.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Фаренюк Геннадій Григорович, Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», директор (м. Київ);

доктор технічних наук, професор **Савицький Микола Васильович**, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», проректор з наукової роботи (м. Дніпро);

доктор технічних наук, професор **Білик Сергій Іванович**, Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри металевих та дерев'яних конструкцій.

Захист дисертації відбудеться «13» червня 2017 р. о 11³⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 44.052.02 при Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка за адресою: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, ауд. 218.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка за адресою: 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24.

Автореферат розісланий «12» травня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



Т.А. Галинська

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток будівельної галузі України ставить перед дослідниками та проектувальниками задачу створення енергоефективних несучих й огорожувальних конструкцій. Основними вимогами до енергоефективних конструкцій є невисокі затрати на їх виготовлення, транспортування, монтаж та висока експлуатаційна надійність протягом життєвого циклу. Саме таким вимогам відповідають несучі й огорожувальні конструкції із сталевих тонкостінних профілів, виготовлених шляхом холодного формування.

Використання сталевих холодноформованих тонкостінних конструкцій (СХТК) на території України в останні роки має тенденцію до зростання. Але застосування таких конструкцій у нашій державі дещо стримується, адже діючі нормативні документи (ДБН «Сталеві конструкції. Норми проектування») не передбачають упровадження тонкостінних профілів. У той же час досвід проектування в США, Європейському Союзі й інших країнах показує, що можна говорити про успішне будівництво із сталевих холодноформованих конструкцій як малоповерхових громадських та виробничих будівель, так і житлових будинків висотою до 6 поверхів включно.

Поряд з застосуванням таких елементів як несучих є сенс розглядати їх як ефективні огорожувальні конструкції. Уже зараз виготовляються ефективні стінові та покрівельні конструкції на основі СХТК в поєднанні з легкими енергоефективними утеплювачами.

У зв'язку з тим, що всі елементи виготовляються з тонких листів, то готові конструкції можуть мати довільну форму, яка буде забезпечувати як достатню несучу здатність у несучих конструкціях, так і мати енергоефективні параметри в огорожувальних конструкціях.

Збільшення кількості виробників СХТК, підвищення теоретичних знань щодо цього типу конструкцій, накопичення експериментального матеріалу надають можливості для подальшого розвитку теорії проектування СХТК, а саме:

- розрахунок надійності несучих та огорожувальних СХТК з урахуванням мінливості фізико-механічних і теплотехнічних властивостей матеріалів;

- зменшення матеріалоемності конструкцій шляхом поєднання в розрахунках вимог до огорожувальних та несучих конструкцій.

Отже, дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної проблеми оцінювання надійності та проектування раціональних несучих і огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів, виробленню на цій основі рекомендацій до нових нормативних документів із розрахунку СХТК за методом граничних станів та розробленню і впровадженню нових типів конструкцій із сталевих холодноформованих елементів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, питаннями, темами. Тема дисертації відповідає напрямам науково-технічної політики держави в галузі енергозбереження, енергоефективності та впровадження нормативних документів, гармонізованих із європейськими згідно з постановами та розпорядженнями Кабінету Міністрів України: від 5 травня 1997 р. № 409 «Про забезпечення надійності і безпечної експлуатації будівель, споруд та мереж»; від 17 грудня

2008 р. № 1567-р «Про програми підвищення енергоефективності та зменшення споживання енергоресурсів»; від 25 листопада 2015 р. № 1228-р «Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року», від 23 травня 2011 № 547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу».

Робота виконана в рамках держбюджетних дослідних тем у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка: «Оцінювання надійності та ризиків несучих та огорожувальних будівельних конструкцій» (державний реєстраційний номер 0111U000839), «Регулювання надійністю та ризиками будівельних конструкцій» (державний реєстраційний номер (0113U000382), «Конструктивна і теплова надійність несучих і огорожувальних комплексних конструкцій» (державний реєстраційний номер 0115U002417), «Високоєфективні сталезалізобетонні несучі конструкції каркасів багатоповерхових будівель» (державний реєстраційний номер 0115U002418), «Ресурсоекономні технології відновлення і реконструкції житлових, громадських і виробничих будівель та захисних споруд цивільної оборони» (державний реєстраційний номер 0116U002567), а також у рамках госпдоговірних робіт: №3105/11 «Випробування несучої здатності профільованого настилу Т57 з товщиною листа 0,7 мм», №0227/13 «Випробування несучої здатності профільованих настилів» та відповідає напряму наукових досліджень кафедри конструкцій із металу, дерева та пластмас.

Метою роботи є вирішення науково-технічної проблеми оцінювання надійності та проектування раціональних несучих і огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів.

Для досягнення мети роботи сформульовані **основні задачі дослідження**:

- розробити метод визначення імовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій за трьома основними теплотехнічними показниками;
- на основі способу мінімізації можливих економічних збитків розробити метод нормування необхідного рівня імовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведення опорі теплопередачі;
- розвинути метод визначення імовірності відмови сталевих конструкцій за першою групою граничних станів для оцінювання СХТК за критеріями несучої здатності перерізу та втрати стійкості;
- розробити розрахунково-графічний метод для визначення раціонального перерізу конструкцій, що поєднують несучі та огорожувальні функції;
- розробити методику визначення функціональної залежності лінійного коефіцієнта теплопередачі від різних факторів впливу;
- за допомогою методу скінчених елементів установити фактори, що найбільше впливають на опір теплопередачі огорожувальної конструкції з несучим каркасом із сталевих холодноформованих тонкостінних профілів;
- розробити методику та провести експериментальні дослідження (в тому числі і натурні випробування фрагмента покрівлі) несучих і огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів (СХТП) на силові та температурні впливи;

- розробити методику та провести експериментальні дослідження мінливості теплотехнічних характеристик оздоблювальних матеріалів й утеплювачів, що використовуються в огорожувальних конструкціях із СХТП;

- упровадити результати досліджень при новому будівництві з використанням конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів, а також при оцінюванні надійності конструкцій, що знаходяться в експлуатації.

Об’єкт дослідження – робота несучих та огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів.

Предмет дослідження – надійність як імовірність безвідмовної роботи несучих та огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів.

Методи дослідження:

- методи будівельної механіки при аналізі напружено-деформованого стану сталевих холодноформованих тонкостінних елементів;
- метод скінченних елементів, метод скінченних смуг при моделюванні напружено-деформованого стану конструкцій та розрахунку їх стійкості;
- методи теорії планування та математичної статистики при проведенні й аналізі результатів числових експериментів;
- експериментальні методи дослідження міцності та деформативності сталевих тонкостінних елементів і з’єднань;
- методи математичної статистики та теорії ймовірності при аналізі безвідмовності несучих й огорожувальних конструкцій;
- теорія надійності будівельних конструкцій.

Наукова новизна одержаних результатів:

- уперше представлено розрахунково-графічний метод для визначення раціонального перерізу конструкцій, що поєднують несучі й огорожувальні функції;
- уперше розроблено метод оцінювання ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій за трьома основними теплотехнічними показниками;
- на основі способу мінімізації можливих економічних збитків вперше запропоновано метод нормування необхідного рівня ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведенного опору теплопередачі;
- дістав подальшого розвитку метод оцінювання ймовірності безвідмовної роботи несучих елементів за критеріями несучої здатності перерізу та втрати стійкості;
- отримано нові експериментальні результати щодо характеру роботи, міцності та деформативності сталевих тонкостінних профілів, профільованих настилів, з’єднань, а також урахування їх спільної роботи у складі конструкцій покрівель;
- отримано нові статистичні результати щодо мінливості теплопровідності матеріалів, що використовуються в огорожувальних конструкціях із сталевих холодноформованих профілів; ці результати використовуються для визначення ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій;
- встановлено залежність для визначення лінійного коефіцієнта теплопередачі теплопровідного включення П-подібного перерізу, що увійшла до ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель»;

– на основі порівняльного аналізу значень імовірності безвідмовної роботи за різними критеріями зроблено висновок про недоцільність перевірки огорожувальної конструкції (для цивільних будівель) за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою внутрішнього повітря, оскільки такий критерій буде завжди виконуватися при дотриманні умови щодо приведенного опору теплопередачі.

Достовірність та обґрунтованість результатів забезпечено розв’язанням поставленої задачі з використанням репрезентативних вибірок результатів експериментальних досліджень; використанням при теоретичних дослідженнях фундаментальних закономірностей будівельної механіки, опору матеріалів, методів розрахунку сталевих холодноформованих конструкцій, співставленням отриманих даних з експериментальними результатами, як власними, так і інших дослідників, у тому числі закордонних, даними чисельного моделювання роботи конструкцій, а також статистичною обробкою отриманих результатів.

Практичне значення одержаних результатів:

– встановлено ефект від підсилення опорних частин сталевих профільованих настилів покрівель накладками та застосування нерозрізних настилів, утворених напуском окремих листів на опори;

– розроблено нормативно-технічний посібник НТП РК 03-01-3.1-2011 (к СН РК 1993-1-3:2006/2011) «Проектирование стальных конструкций. Часть 1-4. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов» та посібник «Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3».

Результати дисертаційної роботи реалізовано в нормативних документах України: ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель» та Зміні №1 до ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель». Також за участі автора дисертації розроблено нормативно-технічний посібник НТП РК 03-01-3.1-2011 (к СН РК 1993-1-3:2006/2011) «Проектирование стальных конструкций. Часть 1-4. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов» та посібник до ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3:2012 «Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3». Результати роботи було використано при проектуванні, будівництві та обстеженні низки об’єктів, а саме:

– ТОВ «Прушиньські» (при визначенні несучої здатності та деформативності сталевих профільованих настилів Т57, Т92, Т150 та Т160 та дослідженні способів підсилення багатопролітних настилів) – виконання експериментального дослідження натурних зразків сталевих трапецієподібного профільованого настилу;

– ТОВ «Раута Групп» (при розробці типової стінової панелі для багатоповерхового каркасного будівництва) – виконання теплотехнічних розрахунків різних конструктивних рішень стінової панелі зі СХТП;

– ТОВ «Інженерно-будівельна компанія «ТЕРМАСТІЛ-УКРАЇНА» (будівництво приватного будинку в м. Полтава по провулку Братів Шеметів, 2) – виконання теплотехнічних розрахунків для огорожувальних конструкцій будівлі;

- на об'єктах ПП «Полтава-проект» (адміністративні та виробничі будівлі) – обстеження та розробка рекомендацій з безвідмовної роботи несучих та огорожувальних конструкцій зі СХТП; розробка конструкцій підсилення та встановлення причин аварійного їх стану;

- ПП «Явір-2000», ТОВ ВКК «Арія» (при надбудові адміністративних будівель у м. Полтава) – розроблення проекту надбудови зі СХТП;

- Управління з переробки газу та газового конденсату ДК «Укргазвидобування» НАК «Нафтогаз України» (при будівництві шатрової покрівлі) – розроблення проекту покрівлі, виконання натурних випробувань фрагмента покрівлі;

- на об'єктах ТОВ «Етуаль» (зокрема виробничі цехи комплексу кондиціонування насіння сільськогосподарських культур у с. Стасі Диканського району Полтавської області) – проектування стінових та покрівельних конструкцій зі СХТП.

Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес ПолтНТУ при викладанні курсів «Архітектура будівель і споруд», «Будівельна фізика (кліматологія)», а також при виконанні дипломних і магістерських робіт за спеціальністю «Промислове та цивільне будівництво», «Міське будівництво та господарство».

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи одержані самостійно. У публікаціях у співавторстві здобувачеві належить: [1, 2, 18, 19, 31, 33] – аналіз та вдосконалення методів розрахунку СХТК; [3, 28, 29, 35, 36] – установлення сфери раціонального застосування СХТК та виявлення особливостей у їх конструюванні; [4, 5, 7, 9, 11, 14, 15, 16, 20, 21, 22, 28] – розроблення програми, конструкції та методики проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів випробувань дослідних зразків, установлення якісних і кількісних критеріїв досягнення граничних станів СХТК; [6, 8, 10, 17, 34, 37] – аналіз та вдосконалення методів розрахунку основних теплотехнічних характеристик і вогнестійкості несучих й огорожувальних конструкцій зі СХТП; [11, 12, 23, 38, 39, 40] – розроблення нових конструктивних рішень зі сталевих холодноформованих тонкостінних елементів; [13, 24, 30] – розроблення програми, конструкції та методики проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів випробувань дослідних зразків, установлення якісних і кількісних критеріїв, що впливають на теплопередачу в огорожувальних конструкціях з СХТП; [25, 26] – визначення мінливості теплотехнічних показників матеріалів та розробка методу визначення ймовірності відмови огорожувальних конструкцій за трьома основними теплотехнічними показниками.

У дисертації не використовувались матеріали кандидатської дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися й отримали підтримку на таких конференціях: 62 – 68-й наукових конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ПолтНТУ (Полтава, 2009 – 2016 рр.); XIV Міжнародному симпозіумі «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс» (ОДАБА, 31 травня – 4 червня 2010 р.); XV Міжнародному симпозіумі «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс» (ОДАБА, 31 травня – 4 червня 2011 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку нафтогазового комплексу»

(Полтава, 26 – 28 вересня 2012 р.); Всеукраїнській Інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (ПолтНТУ, 21 – 22 листопада 2012 р.); XVII Міжнародному симпозиумі «Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс» (ОДАБА, 3 – 6 червня 2013 р.); Всеукраїнській конференції молодих учених і студентів «Перспективи розвитку будівельної галузі» (ПолтНТУ, 10 – 11 жовтня 2013 р.); VI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку академічної та університетської науки» (ПолтНТУ, 19 – 20 грудня 2013 р.); Другій Міжнародній науково-технічній конференції «Підвищення енергоефективності будівель і споруд – методологія, конструктивні принципи, ефективні конструкції, матеріали, обладнання» (м. Закопане, Польща, 2 – 7 березня 2014 р.); Третій міжнародній науково-практичній конференції «Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития» (смт. Світлогірське Полтавської обл., 19 – 23 травня 2014 р.); XII Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-громадського, виробничого та транспортного призначення» (м. Одеса, 14 – 18 вересня 2014 р.); XIX Міжнародному науково-методичному семінарі «Перспективні напрямлення інноваційного розвитку будівництва та підготовки інженерних кадрів» (Брестський державний технічний університет, Білорусь, 23 – 25 жовтня 2014 року); Одинадцятій міжнародній науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (ПолтНТУ, 27 – 31 жовтня 2014 р.); Міжнародній конференції «Експлуатація та реконструкція будівель і споруд» (ОДАБА, 13 – 15 жовтня 2015 року); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-громадського, виробничого та транспортного призначення» (м. Кам'янець-Подільський, 19 – 23 вересня 2016 р.).

Дисертація в цілому розглядалася на розширеному засіданні кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова (квітень 2017 р.); засіданні наукового семінару кафедри будівельних конструкцій та мостів Інституту будівництва та інженерії доквілля Національного університету «Львівська політехніка» (квітень 2017 р.); засіданні кафедри металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури (квітень 2017 р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 40 наукових праць, з них 20 статей у фахових виданнях, рекомендованих МОН України, 5 публікацій у зарубіжних збірниках статей за матеріалами конференцій та періодичних виданнях, 5 публікацій у виданнях, які включено до міжнародних науково-метричних баз; отримано 3 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та двох додатків. Дисертацію викладено на 467 сторінках, вона містить 318 сторінок основного тексту, в тому числі 68 таблиць, 218 рисунків, 414 найменувань літератури та 3 додатки на 40 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, що вирішується, сформульовано мету та задачі дослідження, наукову новизну й практичну цінність результатів роботи, а також наведено її загальну характеристику.

У **першому розділі** розкрито зміст проблеми оцінювання надійності та проектування раціональних несучих і огорожувальних конструкцій зі СХТП. Наведено загальну характеристику СХТК. Особливу увагу приділено аналізу існуючих методів розрахунку холодноформованих конструкцій та оцінювання надійності будівельних конструкцій.

Більшість розвинутих країн світу мають нормативні документи із розрахунку СХТК. Основою для цих норм є метод ефективних ширин, який був запропонований Т. von Karman та розвинутий G. Winter в середині ХХ сторіччя. Наприкінці ХХ сторіччя Т. Pekoz та В. Schafer запропонували альтернативний метод для визначення міцності сталевих холодноформованих елементів, котрий було включено до північноамериканського стандарту з розрахунку СХТК. Він отримав назву Direct Strength Method (DSM) – прямий метод визначення міцності. На даний час в Україні відсутні національні норми із проектування СХТК, але проектувальники мають змогу використовувати Європейський стандарт із розрахунку СХТК для будівель класів наслідків СС1 та СС2. В той же час в Україні проводяться експериментальні та теоретичні дослідження роботи СХТК, якими займаються Ю.О. Авраменко, І.Д. Белов, А.С. Білик, С.І. Білик, О.Г. Зінкевич, О.І. Оглобля, В.В. Романюк, А.В. Перельмутер, О.В. Петренко, Д.А. Прохоренко, М.В. Савицький, Л.І. Стороженко, К.О. Шумейко, В.В. Юрченко. Також широковідомі праці закордонних дослідників Е.Л. Айрумяна, І.В. Астахова, Г.І. Білого, М.І. Ватіна, Л.В. Єнджієвського, В.В. Зверєва, О.В. Коротких, Д.М. Корчака, Т.В. Назмеєвої, О.С. Семенова, О.Р. Тусніна, S. Adany, D. Camotim, G. Hancock, C. Moen, C. Pham, B. Schafer та ін. Питаннями вогнестійкості будівельних конструкцій (в тому числі сталевих тонкостінних) займалися Г.Л. Ватуля, Л.М. Вахітова, Б.Г. Демчина, П.Г. Круковський, Ю.І. Немчинов, Ю.А. Отрош, С.Л. Фомін, M. Feng, J.T. Gerlich, O. Kaitila, T. Ranavaka, S. Gunalan, A. Shahbazian та інші.

Впровадження нових типів конструкцій (а саме такими для України є СХТК) у практику проектування та будівництва тісно пов'язане із проблемою оцінювання їх надійності. Загальні принципи визначення надійності будівельних конструкцій були започатковані в роботах М.С. Стрелецького, О.Р. Ржаніцина, В.В. Болотіна та розвинуті в працях М.Б. Краковського, В.П. Корякіна, О.П. Кудзіса, О.С. Личева, В.Д. Райзера, Б.Й. Снарскіса. В Україні цей напрям був сформований роботами А.В. Перельмутера, А.М. Бамбури, А.Я. Барашикова, Р.І. Кінаша, А.І. Лантухалященка, В.А. Пашинського, С.Ф. Пічугіна, О.В. Семка, С.Б. Усаковського, А.В. Махінька, О.П. Воскобійник. Дослідження проблеми надійності огорожувальних конструкцій розпочато у роботах Г.Г. Фаренюка та продовжено науковою школою В.А. Пашинського. Також працюють в цій галузі А.М. Карюк, Т.Д. Нікіфорова, М.В. Савицький. Проблемам довговічності сталевих конструкцій присвячено роботи В.П. Корольова та О.М. Гібаленка. Загальні питання підвищення експлуатаційної придатності будівель та споруд розглядалися в роботах Т.Н. Азізова, Є.М. Бабича, З.Я. Бліхарського, О.І. Голоднова, В.М. Гордєєва,

Є.А. Єгорова, Д.А. Єрмоленка, М.Ю. Ізбаша, Є.В. Клименка, В.М. Кущенко, О.І. Лапенка, О.В. Нижника, Л.І. Стороженка, О.В. Шимановського, В.С. Шмуклера.

На основі результатів проведених досліджень було сформульовано основні задачі та сформовано структурно-логічну схему досліджень (рис. 1).

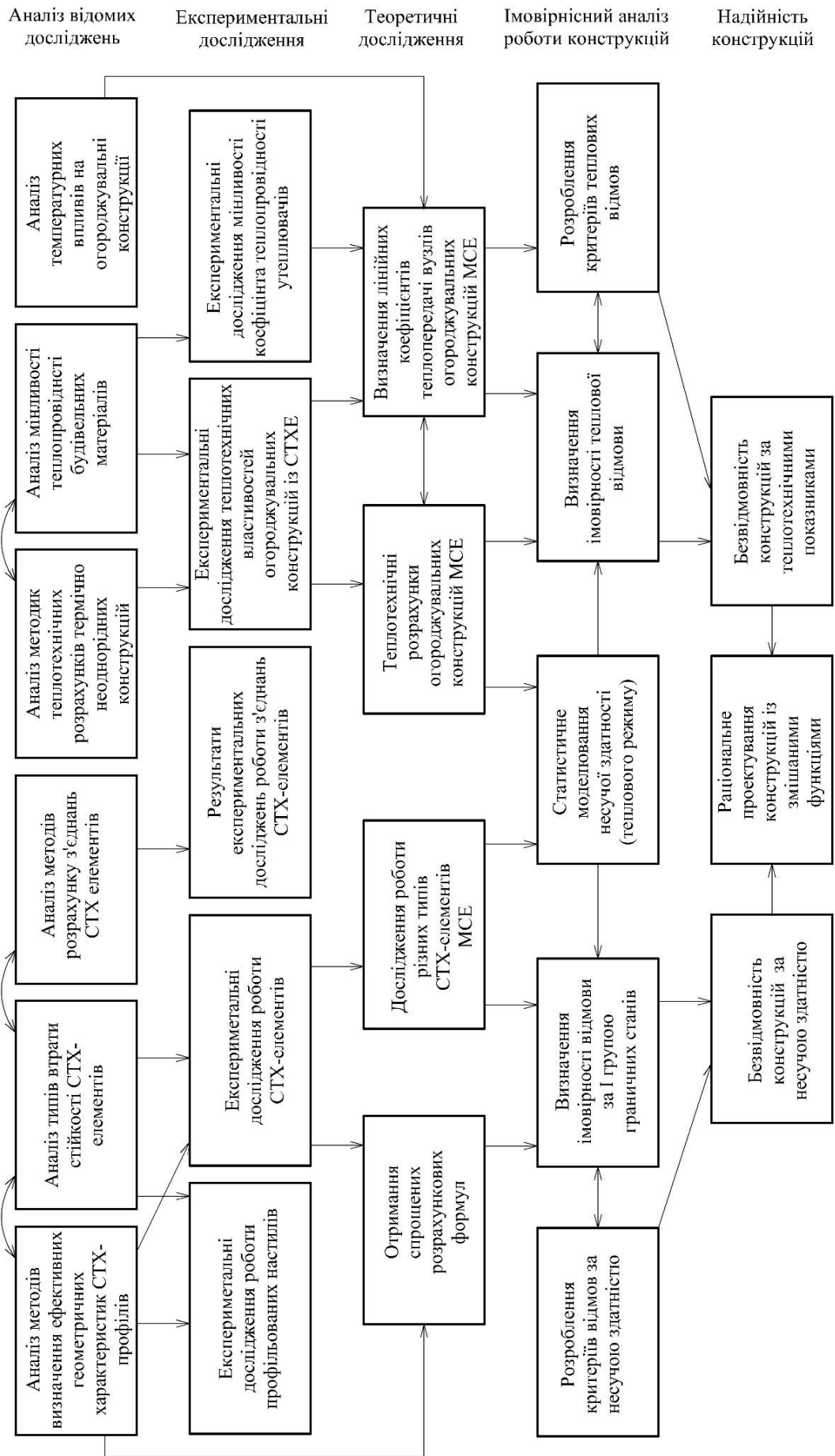


Рисунок 1 – Структурно-логічна схема досліджень проблеми оцінювання надійності та проектування раціональних несучих і огороджувальних конструкцій зі СХТП

Другий розділ дисертаційної роботи присвячено порівняльному аналізу методів розрахунку несучої здатності сталевих холодноформованих тонкостінних конструкцій за нормативами різних країн. Метою аналізу є встановлення особливостей у роботі СХТК та їх подальше врахування під час оцінювання їхньої надійності. Під час аналізу встановлено, що більшість світових норм із розрахунку СХТК можна розділити на дві групи – європейські (Єврокоди, EN) та північноамериканські (AISI). Спільною рисою норм EN та AISI є використання методу ефективної ширини при визначенні ефективних геометричних характеристик поперечного перерізу. Метод набув різної інтерпретації в цих документах. Основні відмінності полягають у наступному: урахуванні впливу кутів згину (прокатки); урахуванні впливу від втрати стійкості форми перерізу; визначенні ефективної ширини стиснутих елементів, підкріплених з одного боку; визначенні ефективної ширини стиснутих частин із елементами жорсткості (на краю або посередині).

Для порівняльного аналізу методів розрахунку сталевих холодноформованих елементів було прийнято три типи найбільш застосовуваних у будівництві профілів – П-подібний, С-подібний та Ω -подібний. Профілі прийнято в трьох конфігураціях перерізів із різними співвідношеннями геометричних параметрів.

У ході аналізу європейських та американських норм із проектування сталевих холодноформованих елементів встановлено основні їх відмінності та проведено порівняльні розрахунки. Так, виявлено, що величина радіуса згину мало впливає на значення ефективної площі (до 5% різниці) перерізу елемента, що працює на стиск, при визначенні її за методикою Єврокоду (рис. 2,а), у той же час у методиці AISI вплив значно більший і коливається в межах 10 – 15% (рис. 2,б).

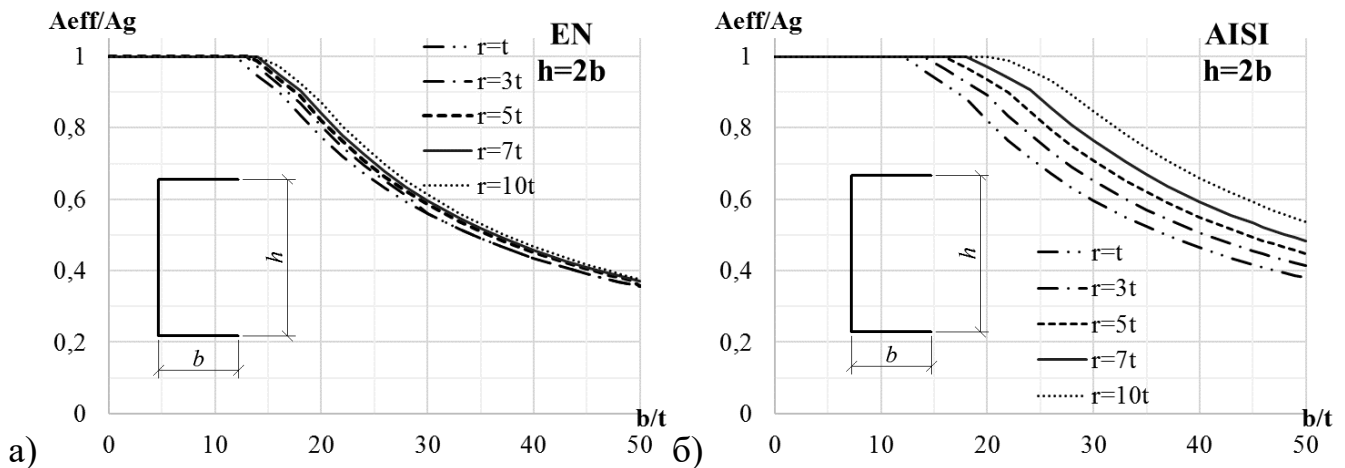


Рисунок 2 – Графіки залежності ефективної площі A_{eff} перерізу від величини радіуса заокруглення кутів для П-подібних елементів (а – згідно з європейськими нормами; б – згідно з американськими нормами)

Для зручності порівняння різних методик розрахунків результати визначення співвідношення $A=A_{eff}/A_g$ суміщені на рисунку 3. Окрім аналітичних методів, згідно з EN та AISI, на графіках представлені криві, визначені за методом DSM із використанням програми CUFSM 4.05. Для порівняння обрані криві $r=t$ та $r=5t$ як такі, що обмежують зону найбільш імовірних для реальних конструкцій радіусів згину. Для отримання результатів за DSM було прийнято переріз із прямими кутами без заокруглень, згідно з рекомендаціями розробників методу.

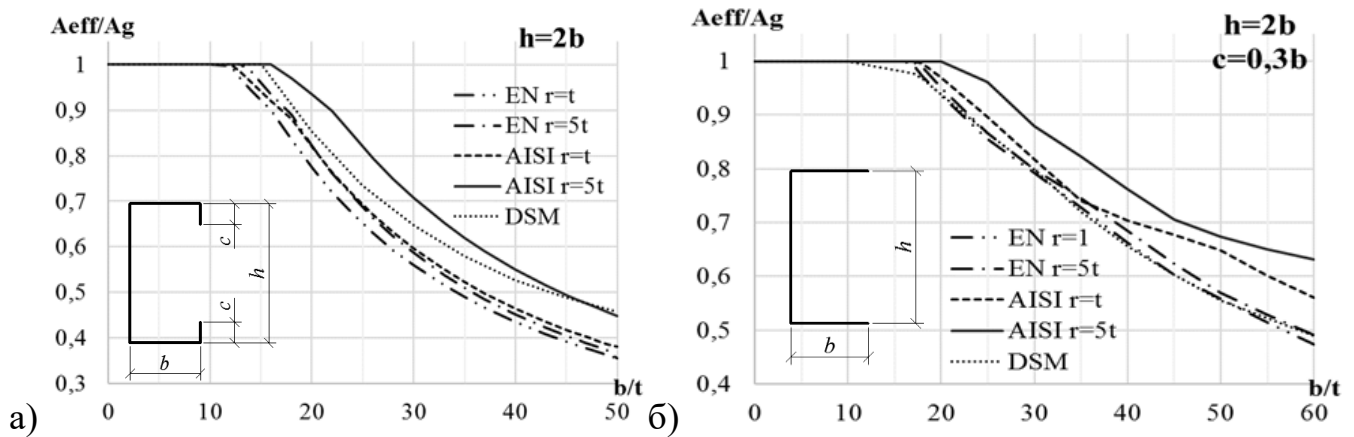


Рисунок 3 – Порівняльні графіки залежності величини ефективної площі П-подібного (а) та С-подібного (б) перерізу від гнучкості полиці за різними методами

Установлено, що методика визначення ефективних геометричних характеристик перерізу за AISI дає, як правило, більші значення площі на 5 – 10% порівняно з методикою Єврокоду.

Для графіків на рисунку 3,б криву DSM можна умовно розділити на дві. Так, для відношення $b/t=17...25$ мінімальною критичною силою буде критична сила втрати стійкості форми перерізу, при значеннях $b/t>25$ мінімальною буде критична сила місцевої втрати стійкості. При цьому результат, отриманий за DSM, є завжди меншим за результати, отримані за EN або AISI.

Виявлено, що форма ефективного перерізу сталевого холодноформованого тонкостінного елемента може відрізнятися при розрахунках за різними нормами (як правило, для елементів, що мають елементи жорсткості перерізу). Це доводить той факт, що «ефективний переріз» є не фізичною величиною, а лише методом, який дозволяє врахувати в розрахунках вплив від місцевої втрати стійкості та втрати стійкості форми перерізу.

Також було виконано порівняння значень несучої здатності стиснутих елементів за різними методиками для п'яти профілів трьох типів перерізів: С-, П- та Ω -подібних: С40х40х8х1, С80х40х12х1, С160х40х16х1, П120х30х1, Ω 40х40х8х1.

Для всіх трьох С-подібних профілів видно, що елементи мають більшу несучу здатність, визначену за методикою DSM, і це є цілком логічно, адже така методика не враховує додаткових згинальних зусиль, що можуть виникати в елементі.

Криву несучої здатності за DSM можна розділити на декілька ділянок. Для більших значень гнучкості елемента вона має форму гіперболи. На цій ділянці несуча здатність обумовлена загальною формою втрати стійкості, а конкретно для С-подібного профілю – згинально-крутильною формою. Для профілів прямокутної форми (С80х40х1 та С160х40х1) відмічена одна прямолінійна ділянка (рис. 4), а для елемента із квадратного профілю С40х40х1 – дві прямолінійні ділянки. Це пояснюється тим, що для елемента С40х40х1 напруження втрати місцевої стійкості більші за напруження втрати стійкості форми перерізу, у той час як для елементів із більшими плоскими ділянками втрата місцевої стійкості спостерігається при менших напруженнях. Цей факт обумовлює значення несучої здатності елементів певної довжини. Остання ділянка графіка відповідає надкоротким елементам (довжиною до 50 мм) і, по суті, несучій здатності повного перерізу елемента.

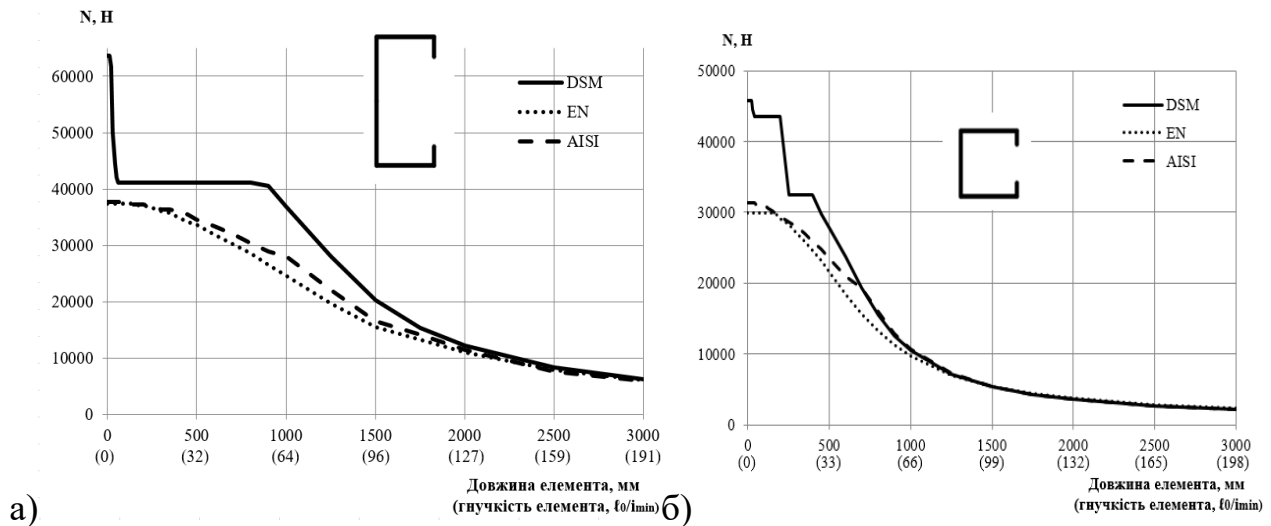


Рисунок 4 – Графік залежності несучої здатності стиснутого С-подібного елемента від довжини елемента (а – С80х40х1, б – С40х40х1)

Основна різниця між методами EN та AISI при розрахунку стиснутих елементів на стійкість полягає в тому, що по-різному оцінюється вплив додаткових згинальних моментів, що діють в елементі, за рахунок ексцентриситету між повним та ефективним перерізом. Так, Єврокод у розрахунках використовує ефективний переріз, який засновано на напруженнях, що дорівнюють межі текучості сталі, а норми AISI використовують реальний рівень напружень від стискаючих зусиль. Це призводить до того, що методика Єврокоду може давати нижчу несучу здатність елемента.

Розрахунок елементів за DSM, як правило, показує найвищі результати несучої здатності, оскільки не враховує додаткові згинальні моменти від ексцентриситетів прикладання навантаження. У той же час такий метод є найменш трудомістким порівняно з іншими нормативними методиками.

На рисунку 4 наведено залежності несучої здатності стійок, що не враховують коефіцієнт надійності за матеріалом γ_M (для норм EN) та коефіцієнт надійності за опором ϕ (для норм AISI). Криві, отримані за Єврокодом, не змінять свої значень через те, що значення коефіцієнта надійності за матеріалом дорівнює 1,0, а значення графіків, отримані за AISI та DSM, мають бути зменшені на 0,8. Розрахункові значення несучої здатності, які отримано за нормами AISI, на 10–25% нижчі за значення, які отримано за Єврокодом. У той же час значення, які отримано за DSM, при застосуванні часткового коефіцієнта добре співвідносяться із результатами Єврокоду, особливо для довгих елементів ($\lambda > 100$).

Значення несучої здатності, які отримано для довгих елементів (для таких елементів переважала згинально-крутильна форма втрати стійкості) за різними нормами, добре співвідносяться між собою. Найбільші розбіжності спостерігаються саме для коротких елементів, для яких урахування втрати місцевої стійкості та стійкості форми перерізу є розрахунковою ситуацією. Зважаючи на емпіричне походження залежностей для врахування цих форм втрати стійкості, розбіжності в 10 – 20% можна вважати цілком прийнятними.

У **третьому розділі** досліджено особливості моделювання тонкостінних конструкцій методом скінченних елементів. Для моделей сталевих холодноформованих тонкостінних елементів (СХТЕ) важливу роль відіграє необхідність урахування фактора втрати місцевої стійкості складових елементів перерізу або втрати стійкості форми перерізу. У цьому випадку чисельне моделювання напружено-деформованого стану таких елементів рекомендується проводити в дві стадії.

Перша стадія – це аналіз стійкості сталевого холодноформованого елемента. У результаті розрахунку моделі на стійкість визначається можливість втрати в елементі місцевої стійкості плоских ділянок або/та втрати стійкості форми перерізу.

У разі відсутності цих типів втрат стійкості на другій стадії можна виконувати розрахунок моделі із пружними характеристиками сталі. Якщо можливе виникнення різних типів втрати стійкості в елементах перерізу, рекомендується проводити розрахунок у нелінійній постановці з урахуванням пружно-пластичної роботи сталі.

Для визначення несучої здатності елементів із СТХП методом скінченних елементів було запропоновано та апробовано наступний алгоритм:

1. Усі моделі були створено із двовимірних пластинчастих елементів.
2. Переміщення моделі вздовж напрямку дії поздовжніх стискаючих зусиль обмежувалось закріпленням одного з вузлів моделі.
3. Граничні умови крайніх перерізів моделі були задані таким чином, щоб обмежувати зміщення граней пластин у напрямках, що не співпадають із напрямком дії сили. Було дозволено лише поворот навколо опорних граней профілю.
4. Напрямок прикладання навантаження співпадав із найбільшим розміром елемента (висотою). Навантаження прикладалось з двох боків елемента вдовж опорних граней профілю. Максимальний рівень рівномірно розподіленого навантаження на опорні грані створював напруження в елементі, що дорівнює межі текучості сталі.
5. Модель роботи матеріалу була прийнята пружно-пластична.
6. Розмір сторони квадратних скінченних елементів приймався рівним 2 або 4 мм.
7. Розрахунки всіх моделей виконувались для чотирьох різних випадків. По-перше, виконувався розрахунок стійкості елемента. По-друге, виконувався розрахунок фізично нелінійної моделі елемента (із пружно-пластичними властивостями сталі). Третім та четвертим етапом був розрахунок геометрично та фізично нелінійних моделей стиснутих елементів. Геометрична нелінійність моделей полягала у створенні початкових недосконалостей розміром $1/1000$ та $1/200$ розміру стінки (або елемента).

Цікавим питанням є вибір геометричної форми недосконалості. Для тонкостінних холодноформованих елементів можуть бути три основні типи недосконалостей: недосконалості у вигляді випучування плоских ділянок елемента (стінки, полички, відгину полички і т.п.); недосконалості у вигляді загального вигину елементів жорсткості елемента (крайові або проміжні елементи жорсткості); недосконалості у вигляді загального викривлення елемента за згинальною, крутильною або згинально-крутильною формами. Важко передбачити, який саме тип недосконалості може бути в конкретному випадку в реальності на виробництві

(можна встановити лише за натурними вимірами виготовлених конструкцій), тому була прийнята схема, за якою спочатку розраховували елементи на стійкість і встановлювали вигляд перших форм втрати стійкості. Як правило, для подальшого розгляду приймалась геометрична недосконалість у вигляді першої форми втрати стійкості елемента. У випадку, коли перша форма втрати стійкості була місцевою формою втрати стійкості, то недосконалість елемента задавалась у вигляді місцевих погинів із стрілою випучування, рівною 1/1000 (або 1/200) від висоти стінки профілю. У випадку, коли перша форма втрати стійкості відповідала втраті стійкості форми перерізу або загальній формі втрати стійкості, то недосконалість задавалась рівною 1/1000 (або 1/200) від висоти елемента.

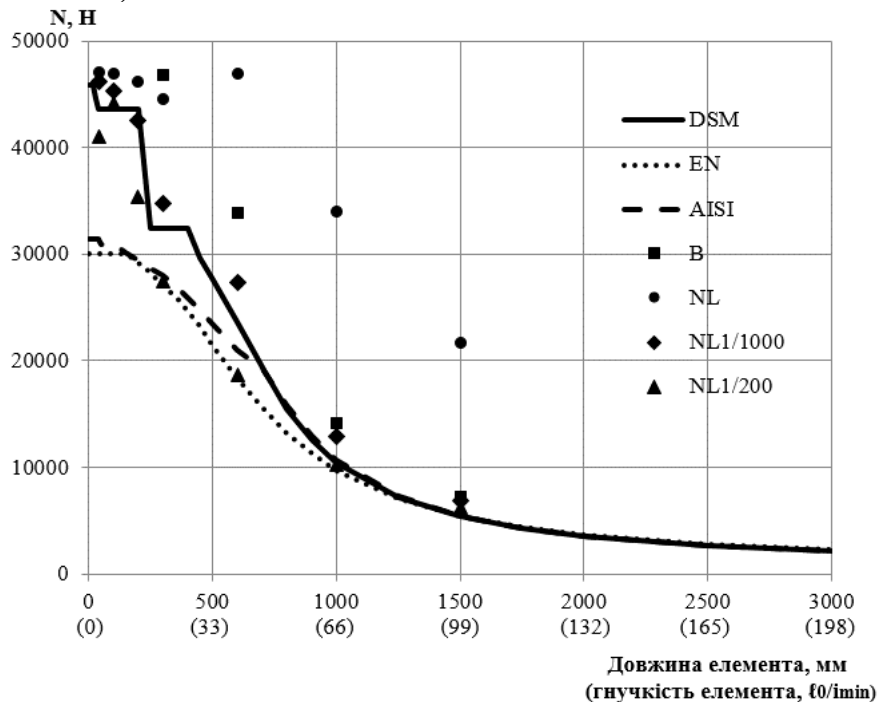


Рисунок 5 – Результати розрахунку моделей із профілю С40х40х8х1

Усього було виконано моделювання та розрахунок 96 моделей (для перерізів С40х40х8х1, С160х40х16х1, П120х30х1, Ω 40х40х8х1). Розглядались елементи різної висоти. Було розглянуто 28 моделей із С-подібного профілю із розмірами перерізу 40х40х8х1 мм. Висоти елементів були прийняті – 40, 100, 200, 300, 600, 1000 та 1500 мм. Результати розрахунку елементів представлені на рисунку 5 у вигляді точок, що відповідають значенням несучої здатності кожної моделі. Точки із позначкою «В» (buckling – стійкість) показують критичне зусилля втрати стійкості геометрично та фізично лінійного елемента.

Точки із позначкою «NL» (nonlinear) показують значення несучої здатності фізично-нелінійної моделі елемента. Точки із позначкою «NL1/1000» та «NL1/200» показують значення несучої здатності фізично-нелінійної моделі елемента із початковими геометричними недосконалістями розміром 1/1000 та 1/200 відповідно.

З рисунку 5 видно, що критичні стискаючі сили втрати стійкості геометрично лінійного елемента малої довжини (до 500 мм) мають високі значення. Для елементів довжиною 40 – 200 мм точки не відображені на графіку та знаходяться в

межах 56 – 62 кН відповідно. Зі збільшенням гнучкості елемента та зі зміною типу втрати його стійкості відбувається значне зниження критичної сили, а при значенні 1500 мм значення критичної сили наближається до несучої здатності елемента, отриманої за розрахунком інших моделей і за розрахунком по нормативних методиках.

Розрахунок фізично нелінійної моделі дає результат, згідно з яким критична сила перевищує значення критичної сили за Ейлером. Це свідчить про помилковість отриманих результатів та недопустимість використання цієї моделі для розрахунку сталевих тонкостінних холодноформованих елементів.

Уведення в нелінійну модель геометричних недосконалостей відчутно зменшує значення (на 20 – 70%) несучої здатності елемента, отриманої при розрахунку фізично нелінійної моделі стиснутого елемента. Це відбувається через те, що початкові геометричні недосконалості збурюють плоскі ділянки поперечного перерізу до геометрично нелінійної роботи, як це відбувається при реальній роботі конструкції. При збільшенні розміру недосконалості елемента до 1/200 від його розміру отримані найменші значення несучої здатності стиснутого елемента. При значеннях висоти елемента, більших за 300 мм, результати, отримані за МСЕ, досить добре співпадають із результатами, отриманими за Єврокодом (рисунок 5). Для малих висот елементів результати МСЕ досить добре корелюються із результатами, отриманими за DSM. Це пояснюється тим, що Єврокод включає в методику визначення ефективних геометричних характеристик вплив від втрати стійкості форми перерізу, який при малій висоті елемента не відбувається.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням несучої здатності елементів, з'єднань та систем із сталевих холодноформованих профілів з метою встановлення факторів, що впливають на їх несучу здатність та надійність. Робота стиснутих та згинальних елементів досліджувалась на серіях коротких стійок і балок із перерізами, симетричними відносно однієї та відносно двох вісей.

Порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження коротких стиснутих елементів із результатами теоретичних розрахунків за різними нормативними документами дав змогу зробити висновок про низьку точність «Рекомендацій...», що використовуються при розрахунку СХТК у Росії, та недоцільність їх подальшого аналізу в наших дослідженнях. Так, у середньому дані, отримані при експериментальних дослідженнях, перевищують результати, отримані при розрахунку за Єврокодом у 1,18 разів (коефіцієнт варіації – 12%), у той час як результати, отримані за російським рекомендаціями, у середньому перевищені в 1,57 разів (коефіцієнт варіації – 12%).

У ході експериментальних досліджень згинальних холодноформованих тонкостінних елементів встановлено, що несуча здатність елементів із симетричними перерізами відносно обох головних осей значно вища, ніж несуча здатність перерізів, симетричних відносно однієї головної осі (більше ніж у 2,5 разів по відношенню до двох окремих елементів і більше ніж в 5,1 разів по відношенню до одного елемента). Підвищення несучої здатності відбувається за рахунок підвищення крутильної та згинально-крутильної жорсткості. Рекомендується в практиці проектування за можливості застосовувати двовісесиметричні перерізи або

розкріплювати елементи від крутильної чи згинально-крутильної форми втрати стійкості.

Для дослідження особливостей роботи найбільш розповсюджених болтових та гвинтових з'єднань сталевих холодноформованих тонкостінних конструкцій було випробувано дві серії зразків болтових і гвинтових з'єднань.

У ході випробувань болтових з'єднань встановлено, що наявність шайби має суттєвий вплив (на 20 – 25% збільшення несучої здатності) при з'єднанні елементів, товщина яких є меншою за товщину шайби. Збільшення розміру шайби призводить до підвищення несучої здатності з'єднання на 20%, але лише тільки для тих з'єднань, відмова яких відбувається через зминання сталевих листів елементів, що з'єднуються. При відмові у вигляді зрізу болта ефект від збільшення діаметра шайби не спостерігається. Попередній натяг болтових з'єднань не впливає на міцність з'єднання, але дозволяє зменшити деформативність з'єднання при ступенях завантаження до $1/3 \dots 1/2$ від руйнуючого.

Випробування гвинтових з'єднань дозволило встановити той факт, що несуча здатність двогвинтового з'єднання на 3 – 10% вища, ніж несуча здатність двох окремих одногвинтових з'єднань. Також встановлено, що розташування гвинтів за напрямком прикладання навантаження дозволяє зменшити деформативність з'єднання на 5 – 17% по відношенню до розташування гвинтів перпендикулярно прикладеному навантаженню.



Рисунок 6 – Загальний вигляд кроквяної системи покриття, що випробовувалась

У ході натурних експериментальних досліджень кроквяної системи покриття (рисунок 6) доведено, що включення прогонів та покрівельного настилу в роботу кроквяних конструкцій зменшує деформативність крокв. Цей ефект спостерігається як для деформацій із площини рами, так і для вертикального прогину кроквяних елементів. Експериментально доведено, що розкріплення згинальних сталевих тонкостінних елементів покрівлі несиметричного перерізу із площини дії навантаження системою прогонів та настилом дозволяє зменшити вплив крутильної форми втрати стійкості.

У **п'ятому розділі** наведено результати експериментальних досліджень міцності та деформативності найбільш розповсюджених в Україні конструкцій зі СХТП – профільованих настилів. Метою цих досліджень було експериментальне вивчення роботи сталевих профільованих настилів за одно-, дво- та трипролітними схемами завантаження, експериментальне дослідження методів підвищення несучої здатності двопролітних настилів, а також апробація методики випробувань профільованих настилів за EN 1993-1-3.

У рамках експериментальних досліджень було проведено випробування 62-х зразків (загальною площею понад 460 м²) сталевих трапецієподібних профільованих настилів, розташованих у положеннях широкими та вузькими полицками догори, із різною вистою перерізу, із різними варіантами підвищення несучої здатності (рисунок 7) – фізично нерозрізні листи, підсилені шляхом улаштування додаткової сталевий накладки із з того ж настилу довжиною 1/20 від величини прольоту (серія «В») та утворені шляхом напуску двох окремих профільованих настилів на опорі (серія «С»), довжина напуску за опору становила 1/10 величини прольоту, таким чином, загальна зона підсилення становила 1/5 від величини прольоту настилу.

Було апробовано методику експериментальних досліджень сталевих профільованих настилів за нормами EN 1993-1-3. Отримано нові експериментальні дані про характер роботи, несучу здатність і деформативність сталевих профільованих настилів за різними конструктивними схемами. Доведено можливість прикладання навантаження до верхніх полиць профільованих листів за умови використання траверс шириною, більшою за висоту настилу. Визначено, що при випробуванні профільованих настилів із висотою гофри до 60 мм з'єднання кромки листа поперечними сталевими полосами для попередження розгортання гофрів не впливає на несучу здатність зразка.

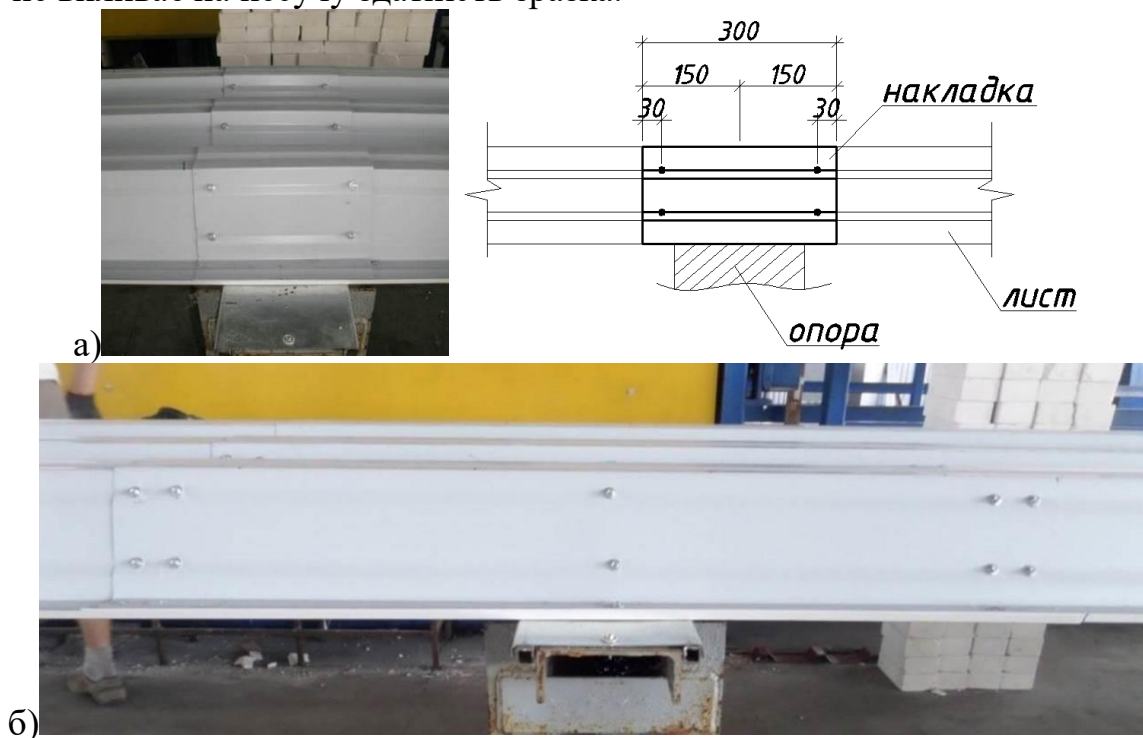


Рисунок 7 – Способи підсилення профільованих настилів: а – накладка на середній опорі зразків, серія «В»; б – напуск двох окремих листів на проміжній опорі, серія «С»

Установлено, що прогини окремих гофр профільованого трапецієподібного настилу мають нерівномірний характер за шириною перерізу. Так, найменший прогин мають гофри біля краю перерізу із підкріпленою елементом жорсткості полицею, а найбільший прогин має протилежний бік перерізу профнастилу із непідкріпленою полицею. Розрахунковими випадками для втрати несучої здатності трапецієподібних настилів є втрата стійкості форми перерізу стиснутих частин

перерізу в прольотній частині або одночасна втрати стійкості стінок та стиснутих полиць від сумісної дії згинального моменту і поперечної сили на проміжній опорі. Втрати несучої здатності через втрату місцевої стійкості плоских ділянок настилу для розглянутих зразків не було відмічено.

Застосування двопролітних профнастилів, посилених накладками на проміжних опорах, може призводити до підвищення ефективності використання матеріалу до 28% за міцністю та до 17% – за деформативністю. Використання двопролітних профільованих настилів, утворених напуском двох листів на середній опорі, може приводити до підвищення ефективності використання матеріалу до 37% за міцністю й деформативністю (табл. 1).

Експериментальні дослідження окремих зразків профнастилу показали нерівномірність прогинів по ширині зразків. Порівняння експериментальних прогинів з теоретичними показало, що останні мають більші значення, ніж отримані при розрахунках за методикою Єврокоду. Саме тому були проведені додаткові дослідження з метою порівняння роботи окремих листів профільованого настилу та листів, що знаходяться в складі диску покриття (або перекриття).

Таблиця 1 – Порівняння ефективності застосування різних типів двопролітних зразків, кПа/кг

Контрольний прогин	Нерозрізний	Серія «В», кПа/кг	Δ_B , %	Серія «С», кПа/кг	Δ_C , %	Нерозрізний	Серія «В», кПа/кг	Δ_B , %	Серія «С», кПа/кг	Δ_C , %
	Т150-2Р-0.75(В,С)					Т160-2Р-0.75(В,С)				
L/300	0,18	0,16	-11%	0,21	+16%	0,19	0,20	+8%	0,23	+19%
L/200	0,25	0,27	+6%	0,31	+18%	0,27	0,29	+7%	0,34	+22%
L/150	0,25	0,30	+16%	0,39	+35%	0,27	0,32	+14%	0,43	+37%
руйнуюче	0,25	0,30	+16%	0,40	+37%	0,27	0,35	+23%	0,43	+37%
	Т150-2Р-0.88(В,С)					Т160-2Р-0.88(В,С)				
L/300	0,18	0,19	+9%	0,21	+18%	0,23	0,24	+2%	0,24	+2%
L/200	0,26	0,27	+4%	0,31	+15%	0,31	0,34	+9%	0,35	+14%
L/150	0,26	0,30	+14%	0,40	+35%	0,31	0,37	+17%	0,45	+32%
руйнуюче	0,26	0,34	+22%	0,40	+35%	0,31	0,43	+28%	0,47	+35%
	4Т92-2Р-0.7(С)					4Т92-2Р-0.88(С)				
L/300	0,14	-	-	0,22	+35%	0,22	-	-	0,22	-2%
L/200	0,26	-	-	0,34	+23%	0,32	-	-	0,35	+10%
L/150	0,32	-	-	0,44	+29%	0,38	-	-	0,49	+23%
руйнуюче	0,40	-	-	0,49	+18%	0,50	-	-	0,61	+18%
	3Т92-(1)2Р-0,7(С)					5Т92-2Р-0,88(С)				
L/300	0,29	-	-	0,33	+13%	0,10	-	-	0,12	+20%
L/200	0,45	-	-	0,50	+11%	0,17	-	-	0,20	+13%
L/150	0,49	-	-	0,62	+21%	0,21	-	-	0,27	+21%

руйнуюче	0,49	-	-	0,65	+24%	0,32	-	-	0,39	+18%
----------	------	---	---	------	------	------	---	---	------	------

Аналіз результатів вимірювання прогинів свідчить, що деформації середнього зразка в групі листів на 13,3% менша, ніж окремого листа. При цьому останній невідкріплений лист у групі листів має прогин, що значно (на 17%) перевищує прогин одного листа. Руйнівне навантаження для всіх зразків виявилось практично однаковим – 3,51 кПа і 3,54 кПа. Це дає змогу зробити висновок, що робота листів у складі диска дає збільшення жорсткості підкріплених листів та не дає підвищення несучої здатності. Руйнування відбувається через відмову крайнього листа, який спричиняє руйнування сусідніх листів.

У ході випробувань хвилястих профільованих настилів було встановлено, що методика випробування профільованих настилів, наведена в Єврокодi, може бути застосована і для хвилястих настилів. Було відмічено, що хвилястим настилом, на відміну від трапецієподібних, не притаманна втрата місцевої стійкості елементів перерізу. Також можна говорити про незначну перевагу у несучій здатності порівняно з трапецієподібними настилами. Ця перевага дає змогу економити близько 3,5% матеріалу на перекритті рівних за площею об'єктів.

Досліджено вплив процесу холодного прокатування на фізико-механічні властивості сталі. Установлено, що підвищення межі текучості та межі міцності спостерігається для всіх ділянок перерізу трапецієподібного настилу. Найбільше збільшення характеристик спостерігається на ділянках біля елементів жорсткості полички та стінки. Збільшення межі міцності відбувається на 12%, а межі текучості на – 9%.

Шостий розділ роботи присвячений дослідженню впливу різних факторів на теплотехнічні властивості огорожувальних конструкцій із СХТЕ.

Для визначення опору теплопередачі конструкції, температури в заданій точці конструкції із теплопровідними включеннями, до яких відноситься розглядуваний у роботі тип конструкцій, прийнято використовувати програмні комплекси, котрі за допомогою методу скінченних елементів дозволяють розраховувати температурні поля та визначати щільність теплових потоків. Розрахункові моделі можуть бути як двовимірні, так і тривимірні. Двовимірні моделі огорожувальних конструкцій потребують значно менше часу на їх створення та розрахунок (особливо при нестационарному тепловому режимі). При використанні суцільних сталевих елементів для розрахунку огорожувальних конструкцій із СХТП можна використовувати двовимірні моделі. Але в практиці будівництва часто застосовуються термопрофілі – сталеві профілі із лінійною перфорацією, яка призначена для зменшення теплопровідності сталевих елементів. За рахунок появи просічок у стінці сталевих профілів задача із двовимірної стає тривимірною.

Для переходу від тривимірної моделі до двовимірної можна скористатися наступним спрощенням. Необхідно розглянути окремо двовимірну модель перфорованої стінки і встановити величину густини теплового потоку q , що проходить через неї. Приведену теплопровідність стінки профілю можна знайти за формулою

$$\lambda_{БЗпр} = \frac{q \cdot \delta}{\tau_6 - \tau_3}, \quad (1)$$

де τ_6, τ_3 – середня температура відповідно внутрішньої та зовнішньої поверхонь стінки профілю, °C; δ – висота стінки профілю, м.

Далі можна переходити до двовимірної моделі огорожувальної конструкції з урахуванням впливу перфорації. Для цього при моделюванні стінки сталевго елемента необхідно задати приведену теплопровідність, для інших елементів профілю (полички, відгини) залишити повну теплопровідність сталі.

Виконання перфорації стінки СТХ-профілів значно покращує її теплоізоляційні властивості (підвищення термічного опору до 22,6 разів). Додатковий внутрішній шар утеплювача може успішно застосовуватись для покращення теплофізичних характеристик огорожень та приведення їх до нормативних.

Збільшення кількості рядів перфорації стінки профілів при початковій кількості більше 8...10 не даватиме значного покращення теплофізичних характеристик термопрофілів. Збільшення величини напуску рядів перфорації призводить до збільшення термічного опору профілів.

На основі розрахунків встановлено, що наявність каркаса зі сталевих профілів може значно (до 2,2 разів) знижувати теплоізоляційну спроможність зовнішніх стін. Вирішальним фактором при цьому є саме приведений опір теплопередачі, при забезпеченні необхідного рівня якого інші вимоги до стіни (за приведеною температурою внутрішньої поверхні та температурою внутрішньої поверхні в місцях теплопровідних включень) виконуватимуться.

В огорожувальних конструкціях, в яких сталеві елементи повністю прорізають товщу стіни, теплопровідність утеплювача не впливає на значення лінійного коефіцієнта теплопровідності теплового включення. Дозволяється з метою спрощення розрахункової моделі заміняти С-подібні профілі (із крайовими відгинами полиць) на рівні за висотою та товщиною П-подібні перерізи.

Розрахунками доведено, що накладка із пінополіуретану, встановлена на сталевий профіль із зовнішньої сторони стіни, дозволяє підвищити теплоізоляційні властивості стіни. На значення лінійного коефіцієнта теплопровідності теплового включення найбільше впливає товщина накладки та у меншій мірі її ширина, але нехтувати шириною у розрахунках не рекомендується.

У ході лабораторних випробувань огорожувальних конструкцій із СТХП підтверджено вплив таких факторів, як перфорація стінки та встановлення накладок із зовнішньої сторони профілів, на лінійний коефіцієнт теплопередачі. Також виконано порівняння лабораторних даних із результатами розрахунку двовимірних скінченно-елементних моделей. Розбіжність знаходиться в межах 2 – 16%, що дозволяє використовувати метод скінченних елементів для подальших досліджень надійності огорожувальних конструкцій.

Досліджено вплив кількості шарів вогнестійкого гіпсокартону на вогнестійкість колони та перегородки (самонесучої стіни). Визначено, що вогнестійкість незахищеного СТХ-елемента становить менше 5 хвилин. Наявність одного листа гіпсокартону підвищує межу вогнестійкості до 30 хвилин, а додавання ще одного шару збільшує час опору до 45 хвилин. Подібна картина спостерігається для перегородок (самонесучих стін). Наявність одного шару гіпсокартону разом із утеплювачем із мінеральної вати дозволяє забезпечити межу вогнестійкості на рівні 24 хвилин – при однобічній пожежі та на рівні 15 хвилин – при двобічному

нагріванні. Збільшення конструктивного вогнезахисту на один шар гіпсокартону дає підвищення вогнестійкості на 5 хвилин – при однобічній пожежі та на 3 хвилини – при двобічній пожежі.

У **сьомому розділі** виконано визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих елементів, проведено оцінку розрахункових температур зовнішнього повітря (що встановлені ДБН В.2.6-31) ймовірнісними методами, а також розроблено метод нормування необхідного рівня ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведення опору теплопередачі.

Одним із критеріїв відмови огорожувальних конструкцій є зниження локального значення температури в зонах теплопровідних включень до температури конденсації пари повітря. При цьому необхідно використовувати розрахункові значення температури зовнішнього повітря (далі $t_3^{ДБН}$), згідно з додатками ДБН В.2.6-31. Варто відзначити, що ці значення температур значно відрізняються від розрахункових значень, представлених у ДСТУ «Будівельна кліматологія».

Для подальшої оцінки ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій із теплопровідними включеннями необхідно встановити ймовірність реалізації розрахункових температур із ДБН В.2.6-31 як: середньомісячної температури зимових місяців, температури найбільш холодної доби та температури найбільш холодної п'ятиденки.

Оцінювання ймовірності реалізації температури $t_3^{ДБН}$ протягом доби виконаємо із припущення, що розподіл температур найбільш холодної доби описується нормальним законом. Маючи значення температур із забезпеченістю 0,92 та 0,98, можна отримати значення математичного очікування та значення стандарту розподілу зовнішньої температури за наступними формулами:

$$\begin{cases} \bar{t}_3 = t_3^{0,98} + 2,06\hat{t}_3 \\ \bar{t}_3 = t_3^{0,92} + 1,405\hat{t}_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{t}_3 = \frac{t_3^{0,92} - t_3^{0,98}}{0,655}, \quad (3)$$

де $t_3^{0,92}$ та $t_3^{0,98}$ – температури зовнішнього повітря t_3 із забезпеченістю 0,92 та 0,98 для відповідного міста, отримані за таблицею 2 ДСТУ «Будівельна кліматологія».

Ймовірність перевищення розрахункової температури $t_3^{ДБН}$ знайдемо через характеристику безпеки β , що буде дорівнювати

$$\beta = \frac{\bar{t}_3 - t_3^{ДБН}}{\hat{t}_3}. \quad (4)$$

Ймовірність того, що зовнішня температура повітря буде нижчою за розрахункову температуру $t_3^{ДБН}$, буде дорівнювати

$$Q = 0,5 - \Phi(\beta), \quad (5)$$

де $\Phi(\beta)$ – значення нормованої функції Лапласа залежно від величини β .

Розрахунки виконано для 25 обласних центрів України. Значення Q свідчить, що для північно-східних обласних центрів ймовірність того, що розрахункова температура найбільш холодної доби буде нижчою за розрахункову $t_3^{ДБН}$, складає

0,492, для центральних регіонів України – 0,319–0,428, для південних обласних центрів (окрім Сімферополя) – 0,252, а для західних – 0,171. У цілому, ймовірність того, що температура найбільш холодної доби буде більшою за розрахункову $t_3^{ДБН}$, досить висока і лише для Криму така ймовірність становить 0,04 і може бути оцінена як малоімовірна.

За аналогічним принципом виконано оцінку ймовірності виходу за межі розрахункової температури $t_3^{ДБН}$ протягом п'ятиденного терміну (Q). Характер розподілу величини Q за регіонами України залишився незмінним, але суттєво змінились значення ймовірності Q . Так, для шести обласних центрів (Полтава, Суми, Харків, Чернігів, Луганськ, Запоріжжя) вона знаходиться на доволі високому рівні, в межах 0,173 – 0,218. Для регіонів центральної та південної України ймовірність перевищення розрахункової температури $t_3^{ДБН}$ протягом п'ятиденного терміну становить 0,077 – 0,109, що є невисоким значенням, а для території західної України та АР Крим ймовірність Q знаходиться в малоімовірних межі 0,043 (для заходу) та 0,006 (для Криму).

Результати порівняння розподілів температур із розрахунковою температурою зовнішнього повітря $t_3^{ДБН}$ указують на те, що її реалізація найбільш імовірна для періоду найбільш холодної доби, тоді як ймовірність очікування реалізації температури $t_3^{ДБН}$ протягом цілого місяця майже неможлива. Для періоду найбільш холодної п'ятиденки для південно-західного регіону України факт перевищення $t_3^{ДБН}$ є також малоімовірним, це в свою чергу може суттєво відбиватись на розрахунках огорожувальних конструкцій із великим значенням теплової інерції.

Ще одним фактором, що буде впливати на ймовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій, є статистичні характеристики теплопровідності будівельних матеріалів. Було проведено лабораторні дослідження мінливості теплопровідності матеріалів, що застосовуються при проектуванні будівель зі сталевих холодноформованих елементів. Результати представлені в таблиці 2.

Надійність огорожувальних конструкцій зі СХТП пропонується оцінювати через ймовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій за трьома основними теплотехнічними показниками:

1. Недосягнення достатнього рівня опору теплопередачі через мінливість геометричних та теплофізичних характеристик матеріалів огорожувальних конструкцій

$$Q = \text{prob}\{R_{\Sigma np} < R_{q, \min}\}; \quad (6)$$

2. Перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою внутрішнього повітря:

$$Q = \text{prob}\{\Delta t_{np} > \Delta t_{c2}\}; \quad (7)$$

3. Зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря:

$$Q = \text{prob}\{\tau_{\epsilon} < t_p\}; \quad (8)$$

де $R_{\Sigma np}$, $R_{q, \min}$, Δt_{np} , Δt_{c2} , τ_{ϵ} , t_p – позначення, прийняті згідно з ДБН В.2.6-31.

Імовірність теплової відмови за критерієм зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря можна знайти за формулою (9)

$$Q_{\tau_g} = 0,5 - F(\beta), \quad (9)$$

де $F(\beta)$ – функція Лапласа для значення β ;

Характеристику безпеки β знайдемо за формулою

$$\beta = \frac{\bar{\tau}_g - t_p}{\hat{\tau}_g}, \quad (10)$$

де t_p – температури конденсації пари повітря; $\bar{\tau}_g, \hat{\tau}_g$ – математичне сподівання та стандарт локальної температури на внутрішній поверхні стіни у місці температурного включення, що можуть бути визначені за формулами (11) та (12):

Таблиця 2 – Експериментальні характеристики теплопровідності матеріалів

Вид теплоізоляційного матеріалу	Кількість зразків (N)	Середнє арифметичне значення $\bar{\lambda}$, Вт/(м·К)	Стандарт $\hat{\lambda}$, Вт/(м·К)	Коефіцієнт варіації (V_λ)
Пінополістирол, $\rho=25$ кг/м ³	30	0,0379	0,0009	0,0227
Мінеральна вата, $\rho=135$ кг/м ³	30	0,0423	0,0015	0,0352
Гіпсокартон, $\rho=800$ кг/м ³	30	0,2055	0,0071	0,0346
OSB, $\rho=600$ кг/м ³	5	0,0989	0,0037	0,0374
Полістиролбетон, $\rho=309$ кг/м ³	30	0,0994	0,0028	0,0283
Полістиролбетон, $\rho=605$ кг/м ³	5	0,1563	0,0053	0,0338
Полістиролбетон, $\rho=808$ кг/м ³	6	0,1980	0,0071	0,0359
Полістиролбетон, $\rho=875$ кг/м ³	30	0,2760	0,0115	0,0416

$$\bar{\tau}_g = t_g - \frac{\bar{k}(t_g - \bar{t}_3)}{\bar{C} \cdot \alpha_g}, \quad (11)$$

$$\hat{\tau}_g = \sqrt{\left(\frac{t_g - \bar{t}_3}{\bar{C} \cdot \alpha_g}\right)^2 \hat{k}^2 + \left(\frac{\bar{k}}{\bar{C} \cdot \alpha_g}\right)^2 \hat{t}_3^2 + \left(\frac{\bar{k}(t_g - \bar{t}_3)}{\bar{C}^2 \cdot \alpha_g}\right)^2 \hat{C}^2}, \quad (12)$$

де $\bar{t}_3, \hat{t}_3$ – математичне сподівання та стандарт функції температури зовнішнього повітря для найбільш холодної доби або найбільш холодної п'ятиденки, визначені за формулами (2) та (3), °С; $\bar{k}, \hat{k}$ – математичне сподівання та стандарт функції розподілу значень лінійного коефіцієнта теплопередачі, Вт/м×К;

$\bar{C}$, $\hat{C}$ – математичне сподівання та стандарт функції розподілу ширини теплопровідного включення, м.

Для представленого на рисунку 8 вузла огорожувальної конструкції функцію розподілу лінійного коефіцієнта теплопередачі було визначено шляхом проведення чотирифакторного чисельного експерименту та апроксимації отриманих даних.

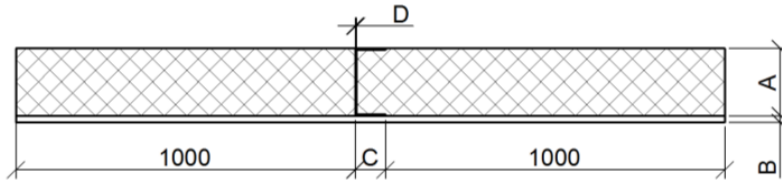


Рисунок 8 – Геометрична схема огорожувальної конструкції: А – висота профілю та відповідно товщина утеплювача, м; В – товщина внутрішнього оздоблювального шару, м; С – ширина полочки П-подібного профілю, м; D – товщина сталевих профілів, м

У результаті проведеного аналізу була отримана функція відклику лінійного коефіцієнта теплопередачі

$$k_{me} = 0,09752 - 0,37717A - 4,16814B + 2,1668C + 25,43444D. \quad (13)$$

Так як функція (13) лінійна, статистичні характеристики результуючої випадкової величини лінійного коефіцієнта теплопередачі k_{me} були визначені як для лінійної функції випадкових величин, при цьому запис функції було спрощено. Математичне сподівання та стандарт лінійного коефіцієнта теплопередачі дорівнюють:

$$\bar{k} = 0,1 - 0,4\bar{A} - 4\bar{B} + 2,2\bar{C} + 25\bar{D}, \quad (14)$$

$$\hat{k} = \sqrt{0,16\hat{A}^2 + 16\hat{B}^2 + 4,84\hat{C}^2 + 625\hat{D}^2}, \quad (15)$$

де $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}, \bar{D}$ та $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}, \hat{D}$ – математичне сподівання та стандарт геометричних параметрів елементів вузла, м.

Стандарт геометричних параметрів товщини шарів огорожувальних конструкцій та розмірів елементів сталевих профілів можна визначити за формулою

$$S_i = \frac{\Delta_i}{1,64}, \quad (16)$$

де Δ_i – величина допуску для розглядуваного елемента, що визначена згідно з державними стандартами України або інших країн, м.

Імовірність теплової відмови за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою внутрішнього повітря визначається за допомогою характеристики безпеки

$$\beta = \frac{\Delta t_{cz} - \Delta \bar{t}_{np}}{\Delta \hat{t}_{np}}, \quad (17)$$

$$Q_{\Delta t_{np}} = 0,5 - F(\beta). \quad (18)$$

Математичне сподівання та стандарт функції температурного перепаду між температурою внутрішнього повітря та температурою внутрішньої поверхні стіни будуть визначатись за формулами (19) та (20):

$$\Delta \bar{t}_{np} = \frac{t_6 - \bar{t}_3}{\bar{R}_\Sigma} \cdot \frac{1}{\alpha_6}, \quad (19)$$

$$\Delta \hat{t}_{np} = \sqrt{\left(\frac{\hat{t}_3}{\bar{R}_\Sigma \alpha_6} \right)^2 + \left(\frac{(t_6 - \bar{t}_3) \hat{R}_\Sigma}{\alpha_6 \cdot \bar{R}_\Sigma^2} \right)^2}. \quad (20)$$

Чисельно імовірність теплової відмови огорожувальної конструкції із лінійними теплопровідними включеннями за критерієм недостатнього значення приведенного опору теплопередачі визначається за допомогою характеристики безпеки:

$$\beta = \frac{\bar{R}_{\Sigma np} - R_{q \min}}{\hat{R}_{\Sigma np}}, \quad (21)$$

$$Q_{R np} = 0,5 - F(\beta). \quad (22)$$

Математичне сподівання і стандарт опору теплопередачі огорожувальної конструкції із лінійними теплопровідними включеннями визначається згідно наступними формулами:

$$\bar{R}_{\Sigma np} = \frac{F_\Sigma}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{\bar{R}_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^m \bar{k}_j^{eyz} \cdot L_j}, \quad (23)$$

$$\hat{R}_{\Sigma np} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_\Sigma \cdot F_i}{\bar{R}_{\Sigma i}^2 \left(\frac{F_i}{\bar{R}_{\Sigma i}} + \sum_{j=1}^m \bar{k}_j^{eyz} \cdot L_j \right)^2} \times \hat{R}_{\Sigma i} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{F_\Sigma \cdot L_j}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{\bar{R}_{\Sigma i}} + \bar{k}_j^{eyz} \cdot L_j \right)^2} \times \hat{k}_j^{eyz} \right)^2}, \quad (24)$$

де $\bar{R}_{\Sigma i}$, $\hat{R}_{\Sigma i}$ – математичне сподівання та стандарт функції розподілу опору теплопередачі термічно однорідної i -тої непрозорої огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$;

$\bar{k}_j^{eyz}$, $\hat{k}_j^{eyz}$ – математичне сподівання та стандарт функції розподілу лінійного коефіцієнта теплопередачі j -го теплопровідного включення (k_{eyz}), $\text{Вт}/(\text{м} \times \text{К})$.

При використанні в теплотехнічних розрахунках мінімально допустимого опору теплопередачі огорожувальних конструкцій, що спираються на середні значення показників теплопровідності матеріалів, товщини шарів і т.п., державні будівельні норми встановлюють рівень забезпеченості (імовірність безвідмовної роботи) розрахункового значення приведенного опору теплопередачі на рівні 0,5. Іншими словами, половина запроектованих конструкцій може мати фактичний опір теплопередачі, значно нижчий за значення $R_{q \min}$, а інша половина – вищий. Виконання умови надійності огорожувальної конструкції (6) призводить лише до економічних втрат і не пов'язана з людськими жертвами, а отже, питання нормування ймовірності безвідмовної роботи конструкції за критерієм

недостатнього значення приведенного опору теплопередачі знаходиться в суто економічній площині. Прийmemo основні передумови для нормування необхідного рівня ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм недостатнього значення приведенного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій:

1. Мінімально допустиме значення опору теплопередачі R_{qmin} приймається як розрахункове із забезпеченістю, яка дорівнює ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм недостатнього значення приведенного опору теплопередачі.

2. Середнє значення приведенного опору теплопередачі конструкції відповідає мінімальному значенню сумарного ризику витрат на спорудження огорожувальної конструкції та оплати енерговитрат через неї.

3. Варіювання конструктивних рішень відбувається шляхом зміни лише одного параметра – товщини огорожувальної конструкції, кроку, товщини сталевих профілів і т.п. Для поєднання впливу цих факторів необхідно розв'язувати декілька задач. У подальшому будемо розглядати випадок збільшення товщини огорожувальної конструкції.

4. При розв'язанні задачі розглядаємо не абсолютні, а відносні економічні витрати – тобто витрати, які відрізняють базову конструкцію від конструкції, що оцінюється.

5. За базову приймаємо конструкцію, приведений опір теплопередачі якої дорівнює мінімально допустимому опору теплопередачі, встановленому нормативними документами.

6. Розрахунки проводимо для огорожувальної конструкції площею 1 м^2 .

Виходячи із вищеперелічених передумов, значення середнього приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції буде відповідати мінімальному значенню сумарного ризику витрат на зведення й опалення $\sum R$:

$$\sum R = R_K + R_{ОП}, \quad (25)$$

де R_K – ризик витрат на збільшення опору теплопередачі огорожувальної конструкції, грн;

$R_{ОП}$ – ризик додаткових енерговитрат порівняно із витратами через огорожувальну конструкцію для базового сценарію, грн.

Ризик витрат на збільшення опору теплопередачі огорожувальної конструкції дорівнює добутку ймовірності перевитрат (Q_K) на вартість збільшення товщини огорожувальної конструкції (B_K , грн):

$$R_K = Q_K \cdot B_K. \quad (26)$$

У разі збільшення опору теплопередачі огорожувальної конструкції шляхом збільшення товщини конструкції ймовірність перевитрат буде дорівнювати 1.

Підвищення вартості конструкції через збільшення її товщини (B_K) будемо вираховувати через вартість додаткових сталевих конструкцій та утеплювача. Зовнішні шари конструкції вважаємо незмінними для всіх варіантів огорожувальної конструкції, а отже, вони не впливають на збільшення вартості конструкції.

Ризик додаткових енерговитрат порівняно із енерговитратами через огорожувальну конструкцію для базового сценарію дорівнює добутку ймовірності відмови за критерієм перевищення мінімально допустимого значення опору теплопередачі ($Q_{оп}$) на вартість додаткових енерговитрат ($B_{оп}$, грн):

$$R_{оп} = Q_{оп} \cdot B_{оп}. \quad (27)$$

Ймовірності відмови за критерієм перевищення мінімально допустимого значення опору теплопередачі $Q_{оп}$ знаходиться за формулою (22).

Річні витрати тепла через 1 м^2 огорожувальної конструкції знайдемо за формулою

$$TB_Q = \chi_1 \cdot K_{бод} \cdot D_d \cdot F_{\Sigma}, \quad (28)$$

де $\chi_1=0,024$ – розмірний коефіцієнт;

F_{Σ} – площа огорожувальної конструкції, в нашому випадку приймаємо рівною 1 м^2 ;

$K_{бод}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі будинку. Так як ми розглядаємо окрему конструкцію, можемо прийняти рівним $1,13/R_{\Sigma np}$ для житлових будинків та $1,11/R_{\Sigma np}$ для всіх інших;

D_d – кількість градусо-днів опалювального періоду, визначається згідно з діючими нормативними документами;

$R_{\Sigma np}$ – приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$.

Додаткові тепловитрати через огорожувальну конструкцію ΔTB_Q будуть дорівнювати

$$\Delta TB_Q = TB_Q(R_{\Sigma np}) - TB_Q(R_{qmin}), \quad (29)$$

де $TB_Q(R_{qmin})$ – тепловитрати через огорожувальну конструкцію, для якої приведений опір теплопередачі дорівнює мінімально допустимому опору теплопередачі, $\text{кВт} \times \text{год}$;

$TB_Q(R_{\Sigma np})$ – тепловитрати через розглядувану огорожувальну конструкцію, $\text{кВт} \times \text{год}$.

У випадку, коли приведений опір теплопередачі огорожувальної конструкції більший за мінімально допустиме значення, то додаткові витрати тепла будуть від’ємними, що означає економію енергоресурсів.

Вартість додаткових енерговитрат $B_{оп}$ знайдемо за формулою

$$B_{оп} = \Delta TB_Q \cdot 0,0009 \cdot B_{\text{г кал}}, \quad (30)$$

де $0,0009$ – перехідний коефіцієнт від $\text{кВт} \times \text{год}$ до Гкал ;

$B_{\text{г кал}}$ – вартість 1 Гкал , грн.

Зважаючи на те, що приведений опір теплопередачі, визначений згідно з діючими нормативними документами, описує середнє значення опору теплопередачі огорожувальної конструкції, то складова формули (29) $TB_Q(R_{\Sigma np})$ не враховує можливого збільшення тепловитрат через фактично менший опір теплопередачі реальної конструкції.

Урахувати теплові витрати, пов’язані з мінливістю величини приведенного опору теплопередачі, можна шляхом заміни середнього значення приведенного опору теплопередачі на розрахункове із заданою забезпеченістю. У рамках наукових досліджень можна розглянути різні рівні (від $0,5$ до $0,99$) забезпеченості

розрахункового значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції.

Тоді формулу (29) можна записати в наступному вигляді:

$$\Delta TB_Q = TB_Q(R_{\Sigma np}^n) - TB_Q(R_{q \min}), \quad (31)$$

де $TB_Q(R_{\Sigma np}^n)$ – тепловитрати через огорожувальну конструкцію, для якої приведений опір теплопередачі дорівнює розрахунковому опору теплопередачі із заданою забезпеченістю, кВт×год.

Графіки сумарних ризиків витрат на зведення й опалення представлені на рисунку 9. З графіків можна встановити значення приведенного опору теплопередачі перекриття, для якого сумарний ризик витрат на зведення й опалення буде мінімальним. Це значення опору теплопередачі буде відповідати середньому значенню, у той час, коли розрахунковим значенням буде значення мінімально допустимого опору теплопередачі з деяким рівнем забезпеченості P . Щоб знайти значення забезпеченості розрахункового опору теплопередачі, необхідно визначити відстань від середнього до розрахункового значення

$$n = \frac{\bar{R}_{\Sigma np} - R_{\Sigma np}}{\hat{R}_{\Sigma np}}. \quad (32)$$

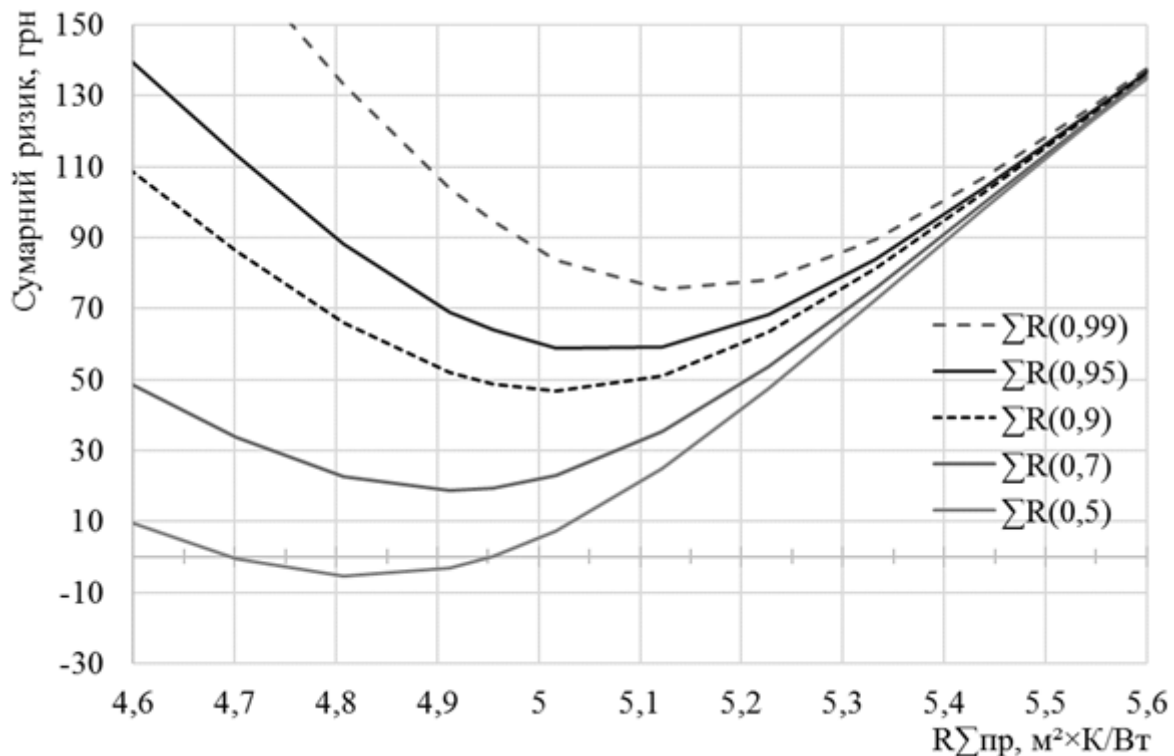


Рисунок 9 – Графік залежності сумарних ризиків витрат на зведення та опалення від приведенного опору теплопередачі горищного перекриття житлової будівлі у м. Полтава

Для кривої сумарних ризиків, що враховує 95% імовірності врахування всіх теплових витрат огорожувальної конструкції, $\Sigma R(0,95)$, значення середнього опору

теплопередачі становить $\bar{R}_{\Sigma np} = 5,09 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$. Розрахункове значення дорівнює мінімально допустимому: $R_{\Sigma np} = 4,95 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, стандарт $\hat{R}_{\Sigma np} = 0,29 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

$$n = \frac{5,09 - 4,95}{0,29} = 0,483.$$

Необхідний рівень забезпеченості розрахункового значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції знайдемо за формулою

$$P = 0,5 + F(n) = 0,6855, \quad (33)$$

де $F(n)$ – функція Лапласа для значення n .

Визначений рівень забезпеченості розрахункового значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції буде відповідати нормативному значенню ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведенного опору теплопередачі.

Проводячи аналіз графіків на рисунку 9, можна зробити висновок, що із підвищенням рівня ймовірності врахування всіх теплових витрат огорожувальної конструкції збільшується величина середнього значення опору теплопередачі, а отже, підвищується нормативне значення ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведенного опору теплопередачі.

Восьмий розділ присвячено питанням визначення ймовірності безвідмовної роботи несучих елементів із сталевих холодноформованих тонкостінних профілів та вибору раціонального рішення конструкцій, що поєднують несучі й огорожувальні функції.

Мінливість геометричних параметрів перерізу впливає на надійність (безвідмовність) елемента за несучою здатністю поперечного перерізу. Як показали результати розрахунків третього розділу, при розрахунку на стійкість суттєвий вплив на несучу здатність мають розміри початкових недосконалостей. Також до мінливих параметрів відносяться межа міцності сталі та товщина елемента.

Установити залежність граничної несучої здатності елемента від трьох параметрів можна, провівши чисельні розрахунки елементів МСЕ. Для цього було виконано чисельний експеримент. Умова задачі: оцінювання надійності (безвідмовності роботи) стиснутого П-подібного елемента із розмірами перерізу 120x30x1 мм при навантаженні на нього 6,5 кН. Сталь елемента – S350, висота стійки – 1,5 м.

Із розрахунків розділу 3 відомо, що для стиснутого елемента із заданими розмірами характерною недосконалістю може бути випучування плоских ділянок перерізу або загальний вигин елемента. Прийнято розмір початкового вигину на рівні 1/2500 довжини елемента. Значення коефіцієнта варіації розміру початкових недосконалостей прийнято 10%, а рівень розрахункової забезпеченості становить 0,95, звідки значення математичного сподівання та стандарту:

$$\bar{i} = \frac{i}{1 - 1,64 \cdot V_i} = \frac{1500 / 2500}{1 - 1,64 \cdot 0,1} = 0,72 \text{ мм}; \quad (34)$$

$$\hat{i} = \bar{i} \cdot V_i = 0,72 \cdot 0,1 = 0,072 \text{ мм}. \quad (35)$$

Фактори чисельного експерименту та межі їх зміни представлені в таблиці 3. Межі зміни значення факторів установимо в інтервалі $\pm 3 \hat{x}$.

Представлений діапазон вихідних факторів описується функцією, яку можна встановити за допомогою повного трифакторного експерименту. Функція відгуку має загальний вигляд:

$$Y = a_0 + a_1 X_i + a_2 X_f + a_3 X_t + a_4 X_i^2 + a_5 X_f^2 + a_6 X_t^2 + a_7 X_i X_f + a_8 X_i X_t + a_9 X_f X_t + a_{10} X_i X_f X_t. \quad (36)$$

Таблиця 3 – Значення змінюваних факторів чисельного експерименту

Позначення	Фактор	Значення реальні (значення закодовані)
i	Початкова недосконалість у вигляді загального вигину, мм	0,5 (-1); 0,72 (0); 0,94 (+1)
f_y	Межа міцності сталі, Н/мм ²	306 (-1); 403 (0); 500 (+1)
t	Товщина профілю, мм	0,85 (-1); 1,0 (0); 1,15 (+1)

Для встановлення коефіцієнтів функції несучої здатності було виконано розрахунок 27 моделей МСЕ згідно з матрицею планування експерименту. Оцінку впливу вхідних факторів на вихідну функцію несучої здатності елемента виконано за діаграмою Парето. Встановлено, що на несучу здатність найбільше впливає мінливість міцності сталі. Також до вагомого фактора відноситься товщина профілю, при збільшенні якої збільшується несуча здатність елемента. Мінливість розміру початкової недосконалості практично не впливає на несучу здатність елемента.

Була отримана функція зміни несучої здатності елемента

$$\tilde{N}_{Rd} = 2856 + 7,697 \tilde{X}_f - 1902 \tilde{X}_t + 5,875 \cdot 10^{-3} X_f^2 + 508,6 \tilde{X}_t^2 + 3,557 \tilde{X}_f \tilde{X}_t. \quad (37)$$

Стандарт несучої здатності на стиск визначається як

$$\hat{N}_{Rd} = \sqrt{(D_f \hat{X}_f)^2 + (D_t \hat{X}_t)^2}, \quad (38)$$

де D_f , D_t – коефіцієнти для обчислення стандарту несучої здатності, що визначаються за формулами:

$$D_f = \frac{\partial N_{Rd}}{\partial f} = 11,75 \cdot 10^{-3} \bar{X}_f + 3,577 \bar{X}_t + 7,697 = 0,01175 \cdot 403 + 3,577 \cdot 1 + 7,697 = 16,01;$$

$$D_t = \frac{\partial N_{Rd}}{\partial t} = 1017,2 \bar{X}_t + 3,577 \bar{X}_f - 1902 = 1017,2 \cdot 1 + 3,577 \cdot 403 - 1902 = 556,73.$$

Визначено математичне сподівання та стандарт граничної несучої здатності елемента:

$$\bar{N}_{Rd} = 2856 + 7,697 \cdot 406 - 1902 \cdot 1 + 5,875 \cdot 10^{-3} \cdot 406^2 + 508,6 \cdot 1^2 + 3,557 \cdot 406 \cdot 1 = 7000 \text{ H.}$$

$$\hat{N}_{Rd} = \sqrt{(16,01 \cdot 32,24)^2 + (556,73 \cdot 0,05)^2} = 516,9 \text{ H.}$$

Оцінку надійності стиснутого елемента за критерієм стійкості проведено за такими формулами:

$$\beta = \frac{\bar{N}_{ult} - N_{cal}}{\hat{N}_{ult}} = \frac{7000 - 6500}{516,9} = 0,967; \quad (39)$$

$$Q_N(\beta) = 0,5 - F(\beta) = 0,167. \quad (40)$$

Незважаючи на те, що середня міцність елемента перевищує задане навантаження, урахування впливу ймовірнісної природи параметрів, що впливають на несучу здатність, дозволяє зробити висновок про низький рівень надійності розглянутої стійки та неможливість її застосування.

Було проведено порівняння ймовірностей безвідмовної роботи конструкції, отриманих за методикою, яка розглядає розрахункове зусилля в елементі як постійну величину, із методикою визначення ймовірності безвідмовної роботи конструкції, яка завантажена сніговим навантаженням, що описано у формі квазістаціонарного диференційованого випадкового процесу. Також виконано порівняння ефективності використання матеріалу при застосуванні в конструкції покриття традиційних гарячекатаних профілів та холодноформованих елементів. За результатами розрахунку побудовано графіки залежності ймовірності безвідмовної роботи балок із гарячекатаних швелерів та балок із холодноформованих профілів С-подібного перерізу (рисунок 10). З отриманих графіків видно, що при однаковому рівні ймовірності безвідмовної роботи елемента більш ефективною з точки зору матеріалоємності є балки із холодноформованих елементів. У середньому при однаковій надійності елементів різниця у вазі балок становить 35% від ваги балок із гарячекатаних профілів.

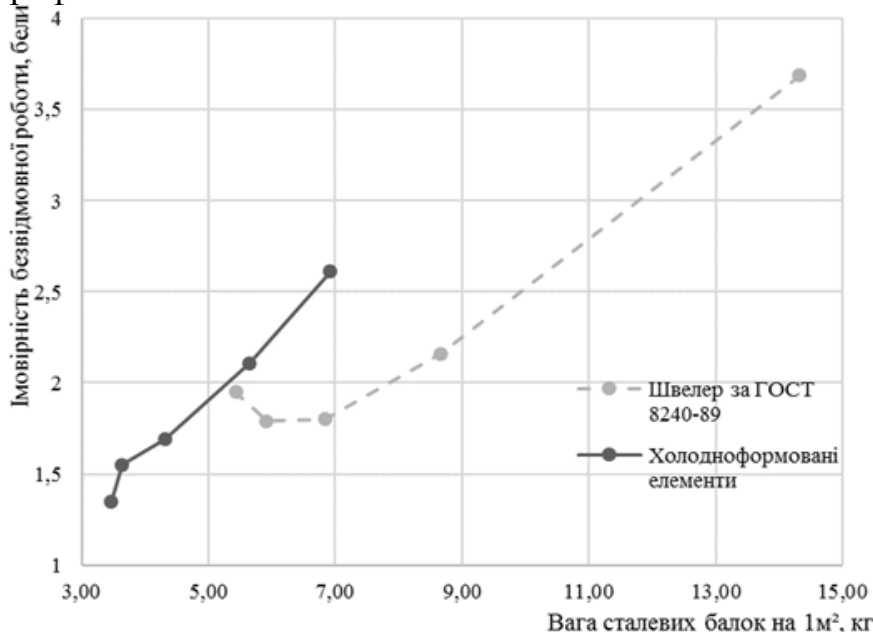


Рисунок 10 – Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи від ваги сталевих балок на 1м² площі перекриття (при дії постійного та снігового навантаження) для м. Полтава

Також було оцінено ймовірність безвідмовної роботи сталевих балок, виконаних із С-подібних холодноформованих профілів С300х60х3,0 та С200х60х1,5 момент опору W_{eff} яких визначено із різним рівнем забезпеченості: 0,5; 0,95 та 0,9985.

Статистичні характеристики функції розподілу ефективного моменту опору $\tilde{W}_{eff}$ визначені за допомогою методу Монте-Карло та вибірок випадкових значень товщини сталевих профілю $\tilde{t}$ і висоти перерізу сталевих профілю $\tilde{h}$. Результати розрахунків представлено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Статистичні характеристики моменту опору

Переріз елемента	$\bar{W}_{eff} = W_{0,5},$ $см^3$	$\hat{W}_{eff}, см^3$	V_W	$W_{0,95},$ $см^3$	$W_{0,9985},$ $см^3$
С200х60х1,5	27,83	1,65	0,059	25,13	22,88
С300х60х3,0	106,55	3,42	0,032	100,95	92,30

З таблиці 4 видно, що коефіцієнт варіації ефективного моменту опору для елемента, виготовленого з листа товщиною 1,5 мм, більший майже в два рази, ніж для елемента, виконаного із листа товщиною 3,0 мм. Різниця між середнім значення та значенням, визначеним із забезпеченістю 0,9985, становить 17,7% та 13,4% для перерізів товщиною 1,5 мм і 3,0 мм відповідно. Результати розрахунків ймовірності безвідмовної роботи (ІБР) сталевих балок, завантажених постійним і сніговим навантаженням, представлені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Значення ймовірності безвідмовної роботи балок

Переріз елемента	Забезпеченість ефективного моменту опору	Момент опору, $см^3$	ІБР, бели	ІБР
С200х60х1,5	0,5	27,83	2,61	0,9975
	0,95	25,13	2,13	0,9926
	0,9985	22,88	1,69	0,9796
С300х60х3,0	0,5	106,55	1,35	0,9553
	0,95	100,95	1,09	0,9187
	0,9985	92,30	0,68	0,7911

Аналіз результатів у таблиці 5 свідчить, що існуючі допуски на товщину листа, який використовуються для виготовлення холодноформованих конструкцій, можуть суттєво знижувати надійність таких конструкцій – у представленому випадку на 1 бел.

Розроблено розрахунково-графічний метод обрання раціонального перерізу конструкції. Фактором раціоналізації прийнято вагу сталевих балок. Для прийняття рішення необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи за критерієм несучої здатності ($P(M)$) та ймовірність безвідмовної роботи конструкції перекриття за теплотехнічними параметрами: ймовірність безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря ($P(\tau_s)$), ймовірність безвідмовної

роботи огорожувальних конструкцій за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою повітря, допустимих за санітарно-гігієнічними вимогами ($P(\Delta t_{np})$), та імовірність безвідмовної роботи за критерієм недостатнього значення приведенного опору теплопередачі ($P(R_{\Sigma np})$). Імовірність безвідмовної роботи $P(\tau_e)$ визначено для значень відносної вологості в приміщенні 50% та 60% і температури внутрішнього повітря 20°C. Імовірність безвідмовної роботи $P(R_{\Sigma np})$ визначено із припущення, що конструкція може бути використана як перекриття під неопалюваним горищем ($R_{qmin}=4,95 \text{ м}^2 \times \text{К/Вт}$) або як суміщене перекриття ($R_{qmin}=5,35 \text{ м}^2 \times \text{К/Вт}$). Результати представлено у вигляді таблиці 6.

У представлених результатах розрахунків (таблиця 6) варто звернути увагу на те, що ймовірність безвідмовної роботи за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою внутрішнього ($P(\Delta t_{np})$) знаходиться на рівні ≈ 1 . При цьому $P(R_{\Sigma np})$ за критерієм недостатнього приведенного опору теплопередачі знаходиться на рівні ≈ 0 .

Таблиця 6 – Значення імовірності безвідмовної роботи балок перекриттів

Переріз елемента	$P(M)$	$P(\Delta t_{np})$	$P(\tau_e)$ $\varphi=50\%$	$P(\tau_e)$ $\varphi=60\%$	$P_{4,95}(R_{\Sigma np})$	$P_{5,35}(R_{\Sigma np})$
Швелер 10	1	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999999	0,852061	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
Швелер 12	0,999999	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999531	0,462527	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
Швелер 14	0,999994	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,985383	0,174667	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
Швелер 16	0,999995	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,896754	0,052589	0,000086	$<10^{-5}$
Швелер 18	0,999998	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,696127	0,014631	0,015136	0,000327
C200x60x1,5	0,999994	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999999	0,891434	$<10^{-5}$	$<10^{-5}$
C200x60x2,5	0,999988	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999312	0,434258	0,000003	$<10^{-5}$
C250x60x2,5	0,999902	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999852	0,559572	0,627392	0,198860
C300x60x2,5	0,999814	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999975	0,685459	0,992967	0,927780
C300x60x3,0	0,99962	$>1 \cdot 10^{-9}$	0,999591	0,478009	0,997104	0,966560

Тобто при збільшенні $P(R_{\Sigma np})$ до мінімально необхідного значення 0,5 значення $P(\Delta t_{np})$ залишиться незмінним, адже температурний перепад між температурою повітря всередині приміщення та температурою на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції залежить від опору теплопередачі огороження і не може збільшуватися при збільшенні приведенного опору теплопередачі огороження. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що при виборі раціонального рішення огорожувальної конструкції критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою внутрішнього повітря можна знехтувати. Також виникає питання про доцільність наявності такого теплотехнічного параметра в будівельних нормах при проектуванні огорожувальних конструкцій цивільних будинків.

Результати розрахунків дають змогу говорити про низький рівень безвідмовності $P(R_{\Sigma np})$ огорожувальної конструкції із прокатних швелерів, що дозволяє зробити висновок про недоцільність використання такого конструктивного рішення для цивільних будівель, але воно є цілком можливим при проектуванні

промислових будівель, для яких вимоги до приведеного опору теплопередачі дещо нижчі.

Виконані розрахунки вказують на доцільність використання для розглянутої конструкції холодноформованих профілів висотою 250 – 300 мм. Більш детально розглянуто надійність сталевих профілів С-подібного перерізу, виконаних із листа товщиною 1,5 мм, 2,0 мм та 2,5 мм. Крок балок прийнято змінним – від 0,6 м до 3,0 м. Результати визначення імовірності безвідмовної роботи для балки з профілю С300х60х2,5 представлено у вигляді графіків на рисунку 11.

Чорні кола, позначені на рівні ймовірності безвідмовної роботи $ІБР=5$ белів (рисунк 11), показані для інформативності та вказують на значення кроку балок, якому відповідає вага, позначена на горизонтальній осі. Імовірність безвідмовної роботи $P(\tau_{\theta})$ не залежить від ваги балок та має постійне значення для однотипних конструктивних вузлів.

Рациональним рішенням конструкції перекриття буде варіант, для якого найменша вага прогонів за умов виконання нормативних вимог щодо безвідмовності за несучою здатністю $P(M)$ та за теплотехнічними показниками $P(\tau_{\theta})$, $P(R_{\Sigma np})$.

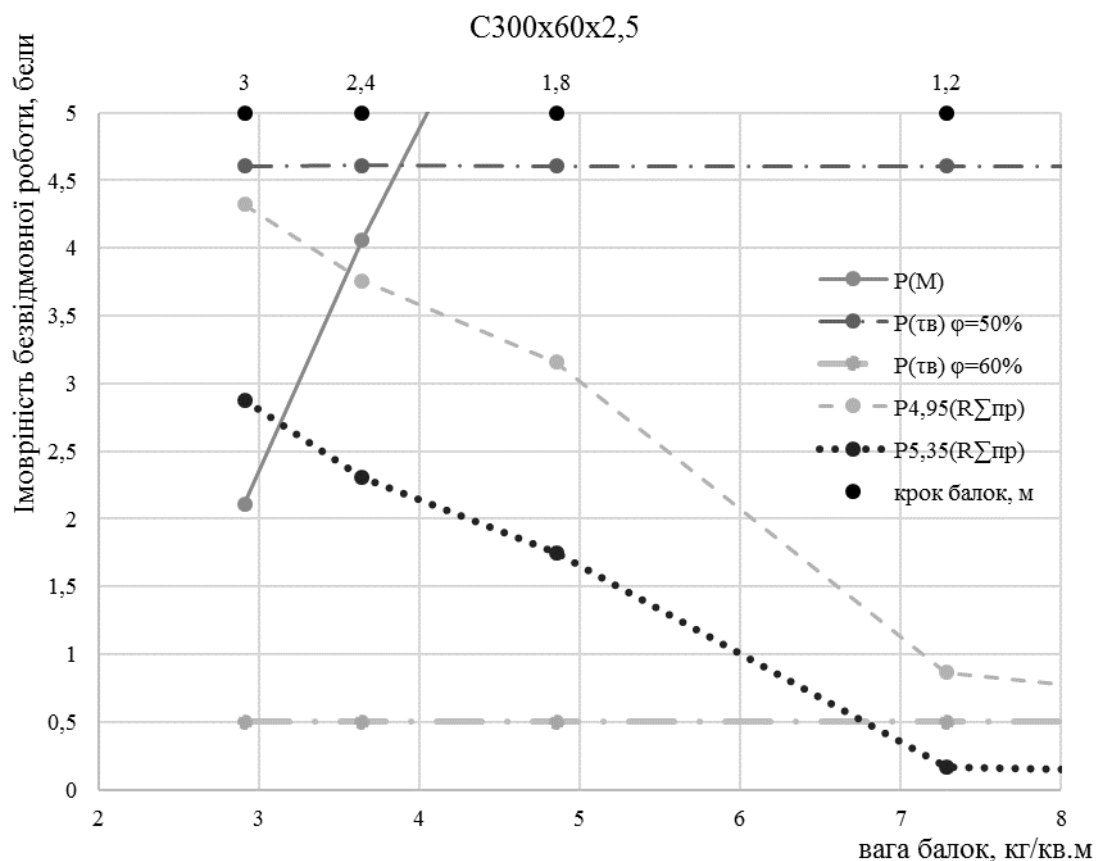


Рисунок 11 – Графік імовірності безвідмовної роботи конструкції перекриття за різними параметрами (для профілю С300х60х2,5)

Для несучих елементів нормами встановлена характеристика безпеки, рівна 3,8, що відповідає ймовірності відмови 0,999928, або 4,14 бела. Для приведеного опору теплопередачі конструкцій нормами не встановлені показники надійності, але в розділі 7 цієї роботи пропонується метод, згідно з яким можна визначити нормативну ймовірність безвідмовної роботи. Для подібного конструктивного рішення перекриття встановлено показник надійності за критерієм опору

теплопередачі на рівні 0,7, що відповідає 0,52 белам. Імовірність безвідмовної роботи за критерієм зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря встановлено на рівні 1 бела.

З отриманих результатів видно, що раціональним варіантом огорожувальної конструкції буде варіант із розташуванням балок із профілю С300х60х2,5 з кроком 2,36 м.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ І ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено важливу науково-технічну проблему оцінювання надійності та проектування раціональних несучих і огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів. Виконані дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. На основі експериментальних випробувань було апробовано методику досліджень профільованих настилів за EN1993-1-3:2006. Установлено, що випробування одного листа може призводити до отримання прогину, на 20% більшого за розрахунковий. У той же час випробування групи листів дає зменшення деформативності середнього листа з диска на 15 – 20%. Експериментально підтверджено підвищення міцності багатопролітних настилів при влаштуванні напуску листів на опори або додаткової накладки. Підвищення міцності становить 37% та 25% відповідно при однакових витратах сталі на 1 м².

2. У ході лабораторних та чисельних досліджень установлено, що наявність сталевих елементів у стінах зменшує опір теплопередачі практично у двічі. Використання замість суцільних профілів термопрофілів дозволяє підвищити опір теплопередачі стіни в 1,5 раза. Наявність теплоізолюючої накладки із зовнішнього боку сталевого профілю дозволяє підвищити опір теплопередачі стіни на 10–15%. Установлено, що при одношаровому розташуванні утеплювача його теплопровідність практично не впливає на лінійний коефіцієнт теплопередачі і місце розташування сталевих елементів.

3. Експериментально встановлені статистичні характеристики теплопровідності основних матеріалів, що використовуються в огорожувальних конструкціях зі сталевих холодноформованих елементів, а саме коефіцієнти варіації: пінополістирол ($\rho=25 \text{ кг/м}^3$) – 2,3%, мінеральна вата ($\rho=135 \text{ кг/м}^3$) – 3,5%, плити із гіпоскартону та OSB – 3,5...3,7%, пінополістиролбетон ($\rho=309 \text{ кг/м}^3$) – 2,8%.

4. Розроблено метод визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій за трьома основними теплотехнічними показниками. Згідно з розрахунками надійності вузлів огорожувальних конструкцій установлено недосконалість районування температурних зон України згідно із ДБН В.2.6-31. Так для міст однієї температурної зони ймовірність теплової відмови може відрізнятись до 7 разів.

5. На основі мінімізації можливих економічних збитків запропоновано метод нормування необхідного рівня ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведення опорного теплопередачі. Для конструкцій із терміном експлуатації 50 років нормативна ймовірність відмови знаходиться в межах від 0,5 до 0,9.

6. Розвинуто метод визначення імовірності відмови сталевих конструкцій за першою групою граничних станів для оцінювання сталевих холодноформованих тонкостінних конструкцій за критеріями несучої здатності перерізу, втрати стійкості та мінливості зміни жорсткості. Виявлено, що встановлені нормами допуски на товщину листа, який призначений для виготовлення холодноформованих профілів, можуть знижувати ймовірність безвідмовної роботи конструкцій на порядок, тобто на 1 бел.

7. Порівняльний аналіз значень імовірності безвідмовної роботи за різними критеріями дає змогу говорити про недоцільність перевірки огорожувальної конструкції (для цивільних будівель) за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і температурою внутрішнього повітря, адже цей критерій буде завжди виконуватися при забезпечені умови за критерієм приведенного опору теплопередачі (характеристика безпеки знаходиться в межах $\beta=0,1\dots3$).

8. Представлений розрахунково-графічний метод дозволяє прийняти рішення при обранні раціонального перерізу конструкції, спираючись на оцінювання її надійності за несучою здатністю та теплотехнічними показниками. Для розглядуваних конструкцій нормативному рівню ймовірності безвідмовної роботи за міцністю (4,14 бели) будуть відповідати значення ймовірності безвідмовної роботи за опором теплопередачі, що дорівнюють 0,2–1,1 бели (для суміщеного перекриття I температурної зони) та 0,7–2,3 (для суміщеного перекриття II температурної зони).

9. Результати досліджень упроваджено при новому будівництві з використанням конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів, а також при оцінюванні надійності конструкцій, що знаходяться в експлуатації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Семко В. О. До розрахунку стиснутих тонкостінних гнутих металевих елементів [Текст] / В. О. Семко, Д. А. Прохоренко // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». – К. : Техніка, 2009. – Вып. 90. – С. 254 – 262.
2. Семко В.О. Про вплив радіусу гину легких сталевих тонкостінних конструкцій на визначення редукованих геометричних характеристик [Текст] / В. О. Семко, Д. А. Прохоренко, К. О. Фаліна // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сб. науч. тр. – Одесса : ООО «Внешрекламсервис», 2010. – Вып. 14. – Часть 2. – С.135 – 140.
3. Пічугін С. Ф. Застосування при новому будівництві легких систем, що швидко монтуються [Текст] / С. Ф. Пічугін, В. О. Семко, Д. А. Прохоренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Випуск 2(27). – Полтава: ПолтНТУ. – 2010. – С.62 – 67.
4. Семко О. В. Експериментально-теоретичне дослідження роботи коротких стійок із холоднокатаних сталевих профілів / О. В. Семко, В. О. Семко, Ю. О. Авраменко, Д. А. Прохоренко // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського / Відп. ред. О.В. Шимановський. – Випуск 6. – К. : Видавництво «Сталь», 2010. – С.74 – 82.

5. Семко В. А. Анализ конструктивных мер для повышения надежности покрытий из легких стальных тонкостенных профилей [Текст] / В. А. Семко, Д. А. Прохоренко // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. тр. – Москва, 2011. – Вып. 10. – С. 253 – 266.
6. Семко В. О. До питання вогнестійкості конструкцій із легких сталевих тонкостінних елементів в житловому будівництві [Текст] / В. О. Семко, А. А. Орліковський, Д. А. Прохоренко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2011. – Вип. 21. – С. 532 – 537.
7. Семко В.О. Експериментальне дослідження міцності балок із легких сталевих тонкостінних профілів [Текст] / В. О. Семко, Д. А. Прохоренко, В. В. Плотнік // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сб. науч. тр. – Одесса : ООО «Внешрекламсервис», 2011. – Вып. 15. – Часть 2. – С.198 – 203.
8. Чернявський В.В. Вплив перфорації легких сталевих тонкостінних профілів на теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій [Текст] / В. В. Чернявський, В. О. Семко, О. І. Юрін, Д. А. Прохоренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Випуск 1(29). – Полтава: ПолтНТУ. – 2011. – С.194 – 199.
9. Семко В. О. Експериментальні дослідження нових способів з'єднання легких сталевих тонкостінних конструкцій [Текст] / В. О. Семко, С. П. Лебединський, К. О. Шумейко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2012. – Вип. 23. – С. 410 – 417.
10. Семко В. О. Дослідження впливу конструктивних параметрів на теплопровідність легких сталевих огорожувальних конструкцій [Текст] / В. О. Семко, М. В. Лещенко, Н. О. Котько // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. науч. трудов. – Вып. 65. – Днепропетровск : ГВУЗ «ПГАСА», 2012. – С. 567 – 571.
11. Семко О.В. Нові способи з'єднання легких сталевих тонкостінних конструкцій / О. В. Семко, В. О. Семко, К. О. Шумейко, С. П. Лебединський // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського / Відп. ред. О.В. Шимановський. – Випуск 9. – К.: Видавництво «Сталь», 2012. – С.62 – 71.
12. Семко В. О. Шляхи підвищення енергетичної ефективності огорожувальних конструкцій на основі сталевих тонкостінних профілів [Текст] / В. О. Семко, М. В. Лещенко // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний зб. наук. пр. – К. : ДП НДІБК, 2013. – Вип. 77. – С.283 – 287.
13. Семко В. О. Експериментальні дослідження теплопровідності огорожувальних конструкцій із сталевих тонкостінних профілів [Текст] / В. О. Семко, М. В. Лещенко, Л. М. Філіпович, А. А. Резников // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2013. – Вип. 25. – С. 606 – 611.
14. Семко В. О. Експериментальні дослідження міцності та деформативності сталевих профільованих настилів / В. О. Семко, С. О. Складенко, Д. А. Прохоренко

// Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сб. науч. тр. – Одесса : ООО «Внешрекламсервис», 2013. – Вып. 17. – С.212 – 217.

15. Пичугин С. Ф. Подбор и испытания стальных профилированных настилов в покрытиях зданий / С. Ф. Пичугин, В. А. Семко // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. науч. трудов. – Вып. 68. – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2013. – С. 276 – 280.

16. Пичугин С. Ф. Анализ причин отказов несущих каркасов из стальных холодноформованных профилей / С.Ф. Пичугин, В. А. Семко, С. А. Скляренко, Д. А. Прохоренко // Современные строительные конструкции из металла и древесины. Сб. науч. тр. – Одесса : ООО «Внешрекламсервис», 2014. – Вып. 18. – С.154 – 158.

17. Semko V. Linear heat-transfer coefficient equation for a wall structure made of steel profiles / V. Semko, B. Gorb, A. Akamsin // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. науч. трудов. – Вып. 75. – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2014. – С. 227 – 230.

18. Семко В. А. Упрощенная инженерная методика расчета сжатых легких стальных тонкостенных профилей / В. А. Семко, Д. А. Прохоренко // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. науч. трудов. – Вып. 77. – Днепропетровск: ГВУЗ ПГАСА, 2014. – С. 212 – 216.

19. Семко В. О. До розрахунку згинаних холодноформованих сталевих елементів [Текст] / В. О. Семко, Д. А. Прохоренко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2014. – Вип. 29. – С. 341 – 348.

20. Шумейко К. О. Аналіз результатів дослідження болтових та гвинтових з'єднань, розрахунков часткового коефіцієнта надійності [Текст] / К. О. Шумейко, В. О. Семко // Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського / Під заг. ред. О.В. Шимановського. – Випуск 14. – К.: Видавництво «Сталь», 2014. – С.86 – 94.

21. Semko V. Complex experimental investigation into light steel and steel-concrete composite structures made of z-shaped sections under compound stress [Text] / Volodymyr Semko, Olena Voskobiinyk, Alexandra Skyba, Kateryna Shumeiko, Dmytro Prokhorenko // Металлические конструкции. – 2014. – Том 20. – № 1. – С. 65 – 76.

22. Семко В. О. Експериментальні дослідження міцності та деформативності хвилястих сталевих профільованих настилів [Текст] / В. О. Семко, Д. А. Прохоренко // Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава : ПолтНТУ, 2014. – Вип. 3(42). – С. 161 – 165.

23. Семко В. О. Метод підвищення енергоефективності стінових огорожувальних конструкцій із ЛСТК та полістиролбетону / В. О. Семко, Ю. О. Авраменко, М. В. Лещенко // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. – Днепропетровск: ПГАСА, 2015. – Вып. 82. – С. 205 – 211.

24. Лещенко М. В. Теплотехнические свойства стеновых ограждающих конструкций из стальных тонкостенных профилей и полистиролбетона /

- М. В. Лещенко, В. А. Семко // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №8 (60). – С. 44 – 55. (doi: 10.5862/MCE.60.6).
25. Semko V.O. Experimental study of variability of thermal conductivity of insulation materials / V. O. Semko, M. V. Leshchenko, A. G. Rud // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип. 1 (46). – С. 60 – 67.
26. Пічугін С.Ф. Імовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевих холодноформованих елементів за критерієм зниження локальних значень температур / С. Ф. Пічугін, В. О. Семко // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – Харків, 2016. – Вип. 160. – С. 25 – 34.
27. Семко В. О. Методика визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевих холодноформованих елементів за теплотехнічними показниками / В. О. Семко // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сб. научн. трудов. – Днепр: ПГАСА, 2016. – Вып. 91. – С. 140 – 147;
28. Semko V. Effect of Bracing Systems on Overall Stability and Deformability of Cold-Formed Steel Roofing Structures / V. Semko, D. Prohorenko // Design, Fabrication and Economy of Metal Structures: International Conference Proceedings 2013, Miskolc, Hungary, April 24 – 26, 2013. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 229 – 234.
29. Пичугин С. Ф. Анализ конструктивных мер по увеличению несущей способности двухпролетных стальных профилированных настилов [Текст] / С. Ф. Пичугин, В. А. Семко, Е. В. Гранько, Д. А. Прохоренко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XIX Международного научно-методического семинара; Брест, 23 – 25 октября 2014 года. – Брест: БрГТУ, 2014. – Ч. 1. – С.175 – 182.
30. Семко В. А. Исследование значений теплотехнических показателей стены из ЛСТ-профилей при разных конструктивных параметрах [Текст] / В. А. Семко, М. В. Лещенко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XIX Международного научно-методического семинара; Брест, 23 – 25 октября 2014 года. – Брест: БрГТУ, 2014. – Ч. 2. – С.159 – 165.
31. Надольский В. В. Особенности работы и расчета тонкостенных холодноформованных элементов согласно требованиям Еврокода 3 / В. В. Надольский, М. Г. Дергачев, В. А. Семко // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: материалы XX Международного науч.-метод. семинара (Гродно, 17 – 19 февраля, 2016 год). – Гродно: ГрГУ, 2016. – С.136 – 143;
32. Семко В. А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с Еврокодом 3 [Текст] / В. А. Семко. – Киев: ООО «НПП «Интерсервис», 2015. – 143 с.
33. Семко А.В. Расчет легких стальных тонкостенных изгибаемых элементов по нормативным документам разных стран [Текст] / А. В. Семко, В. А. Семко, А. А. Скальская // Современные строительные конструкции из металла и древесины.

- Сб. науч. тр. – Одесса : ООО «Внешрекламсервис», 2010. – Вып. 14. – Часть 1. – С.195 – 200.
34. Семко В.О. Моделювання дії високих температур на колону з ЛСТК, захищену гіпсокартоном [Текст] / В. О. Семко, А. А. Орліковський // Містобудування та територіальне планування : Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2011. – Вип. 40. У 2 ч. Ч. 2. – С. 311 – 318.
35. Семко В.О. Особливості конструювання прогонних систем із легких сталевих тонкостінних конструкцій [Текст] / В. О. Семко, Д. А. Прохоренко // Містобудування та територіальне планування : Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2011. – Вип. 40. – Ч. 2. – С. 319 – 327.
36. Абсіметов В. Е. Застосування конструкцій із легких сталевих тонкостінних профілів у нафтогазовому комплексі [Текст] / В. Е. Абсіметов, В. О. Семко, Ю. О. Авраменко, Д. А. Прохоренко // Науковий журнал (Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа). – Вип. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С.39 – 45.
37. Семко В. О. Дослідження теплових показників огорожувальних конструкцій зі сталевих тонкостінних профілів багатоповерхових цивільних будівель [Текст] / В. О. Семко, М. В. Лещенко, І. С. Криворотько // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – Рівне : Видавництво Національного університету водного господарства та природокористування, 2014. – Вип. 29. – С. 491 – 498.
38. Пат. 66655 Україна, МПК Е 04 С 3/30 (2006.01). Проміжна Т-подібна опора буксиру вальної канатної дороги з гнутих профілів / заявники Скляренко С.О., Семко В.О., Коба Н.О.; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № у 2011 080401; заяв. 25.06.11; публ. 10.01.2012, Бюл. №1. – 4 с.
39. Пат. 75090 Україна, МПК Е 04 В 1/08 (2006.01). Спосіб з'єднання легких сталевих тонкостінних елементів / заявники Семко В.О., Шумейко К.О., Лебединський С.П.; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № у 2012 04111; заяв. 03.04.12; публ. 26.11.2012, Бюл. №22. – 4 с.
40. Пат. 102289 Україна, МПК (2015.01) Е04В1/76. Енергоефективна стінова огорожувальна конструкція із сталевих холодноформованих елементів / В.О. Семко, М.В. Лещенко; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № у 2015, 03613; заявл. 17.04.15; опубл. 26.10.15, Бюл. № 20/2015. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Семко В.О. Надійність несучих та огорожувальних конструкцій із сталевих холодноформованих тонкостінних профілів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – Полтава, 2017.

Дисертацію присвячено розв'язанню проблеми оцінювання надійності та проектування раціональних несучих і огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів.

Проведено експериментально-теоретичний аналіз особливостей роботи несучих та огорожувальних конструкцій зі сталевих холодноформованих тонкостінних профілів, на основі якого встановлено фактори, що впливають на їх надійність. Також експериментально встановлені статистичні характеристики теплопровідності

основних матеріалів, що використовуються в огорожувальних конструкціях зі сталевих холодноформованих елементів.

Розроблено метод визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій за трьома основними теплотехнічними показниками. На основі мінімізації можливих економічних збитків запропоновано метод нормування необхідного рівня ймовірності безвідмовної роботи огорожувальних конструкцій за критерієм приведення опору теплопередачі. Розвинуто метод визначення ймовірності відмови сталевих конструкцій за першою групою граничних станів для оцінювання сталевих холодноформованих тонкостінних конструкцій за критеріями несучої здатності перерізу, втрати стійкості та мінливості зміни жорсткості.

Представлений розрахунково-графічний метод дозволяє прийняти рішення при обранні раціонального перерізу конструкції, спираючись на оцінювання її надійності за несучою здатністю та теплотехнічними показниками.

Ключові слова: теорія надійності, сталеві конструкції, несучі конструкції, огорожувальні конструкції, холодноформовані елементи, тонкостінні сталеві конструкції, ймовірність безвідмовної роботи, теплопровідність, теорія ризиків.

АННОТАЦИЯ

Семко В.А. Надежность несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных тонкостенных профилей. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка. – Полтава, 2017.

Содержание диссертации. Во **введении** обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, дана ее общая характеристика.

В **разделе 1** раскрывается состояние проблемы оценки надежности и проектирования рациональных несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных тонкостенных профилей.

В **разделе 2** на основе сравнительного анализа методов расчета несущей способности стальных холодноформованных тонкостенных конструкций по нормативам разных стран установлены основные их отличия. Основная разница между методами Еврокодов и североамериканских норм при расчете сжатых элементов на устойчивость заключается в том, что по-разному оценивается влияние дополнительных изгибающих моментов, действующих в элементе за счет эксцентриситета между полным и эффективным сечением. Расчет элементов методом DSM, как правило, показывает высокие значения несущей способности, т.к. не учитывает дополнительные изгибающие моменты от эксцентриситетов приложения нагрузки. В то же время такой метод является наименее трудозатратным, по сравнению с другими нормативными методиками.

Раздел 3 работы посвящен расчету стальных холодноформованных тонкостенных конструкций методом конечных элементов (МКЭ). В разделе представлено алгоритм для создания моделей для расчета конструкций из стальных холодноформованных профилей. Подтверждено, что для расчета МКЭ

рекомендуется использовать модель с нелинейными свойствами стали и геометрической нелинейностью в виде начальных несовершенств.

В разделе 4 работы получены новые экспериментальные результаты несущей способности элементов, соединений и систем из стальных холодноформованных профилей. В ходе натурных экспериментальных исследований доказано, что включение прогонов и кровельного настила в работу стропильных конструкций уменьшает их деформативность. Этот эффект наблюдается как для деформаций из плоскости рамы, так и для вертикального прогиба стропильных элементов. Экспериментально доказано, что раскрепление изгибаемых стальных элементов кровли несимметричного сечения из плоскости действия нагрузки системой прогонов и настилом позволяет уменьшить влияние крутильной формы потери устойчивости.

В разделе 5 работы было получено новые экспериментальные данные о характере работы, несущей способности и деформативности стальных профилированных настилов при различных конструктивных схемах. Проведены лабораторные исследования группы стальных, профилированных листов, работающих в составе диска покрытия (или перекрытия). Выявлено, что применение двухпролетных профнастилов, усиленных накладками на промежуточных опорах, может приводить к повышению эффективности использования материала до 28% по прочности и до 17% – по деформативности. Использование двухпролетных профилированных настилов, образованных нахлестом двух листов на средней опоре, может приводить к повышению эффективности использования материала до 37% по прочности и деформативности.

Раздел 6 работы посвящен исследованию теплотехнических свойств ограждающих конструкций из стальных холодноформованных элементов. В ходе лабораторных испытаний ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей подтверждено влияние на линейный коэффициент теплопередачи таких факторов, как перфорация стенки и установка накладок с внешней стороны профилей. Также выполнено сравнение лабораторных данных с результатами расчета двумерных конечно-элементных моделей. Расхождение находится в пределах 2 – 16%, что позволяет использовать метод конечных элементов для дальнейших исследований надежности ограждающих конструкций.

В ходе исследований раздела 7 работы был разработан метод определения вероятности теплового отказа ограждающих конструкций по трем основным теплотехническим показателям. Согласно расчетам надежности узлов ограждающих конструкций установлено несовершенство районирования температурных зон Украины по ДБН В.2.6-31. Так, для городов одной температурной зоны вероятность теплового отказа может отличаться до 7 раз.

На основе минимизации возможных экономических убытков предложен метод нормирования необходимого уровня вероятности безотказной работы ограждающих конструкций по критерию приведенного сопротивления теплопередаче. Для конструкций со сроком эксплуатации 50 лет нормативная вероятность отказа находится в пределах от 0,5 до 0,9.

В разделе 8 работы развит метод определения вероятности отказа стальных конструкций по первой группе предельных состояний для оценки стальных

холодноформованные тонкостенных конструкций по критериям несущей способности сечения и потери устойчивости. Представленный расчетно-графический метод позволяет принять решение при выборе рационального сечения конструкции, опираясь на оценку ее надежности по несущей способности и теплотехническим показателям.

Ключевые слова: теория надежности, стальные конструкции, несущие конструкции, ограждающие конструкции, холодноформованные элементы, тонкостенные стальные конструкции, вероятность безотказной работы, теплопроводность, теория рисков.

ABSTRACT

V. Semko. Reliability of bearing and enclosing structures of steel cold-formed thin-walled profiles. – Manuscript.

Thesis for Doctor of Technical Sciences degree by speciality 05.23.01 – building structures, buildings and constructions. – Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – Poltava, 2017.

The dissertation is devoted to solving the problem of evaluating the reliability and efficient design of bearing and enveloping structures made of steel cold-formed thin-walled profiles.

Experimental and theoretical analysis of the characteristics of bearing and enveloping structures were completed, based on which the factors affecting their reliability are determined. Besides, the statistical characteristics of thermal conductivity of basic materials used in the building envelopes made of steel cold-formed elements are experimentally established.

A method for determining the probability of thermal failure of envelopes by three main thermo-technical indicators is developed. Based on minimization of economic losses, the method of normalization of required failure probability level of envelopes by the reduced thermal resistance criterion is proposed. A method of determining the probability of failure of steel structures by the first group of limit states is advanced for evaluating steel cold-formed thin-walled structures by the criteria of section bearing capacity, buckling and variability of stiffness shift.

The presented computational and graphical method allows to make a decision when selecting rational cross-section of the structure based on evaluation of its reliability by bearing capacity and heat indicators.

Keywords: reliability theory, steel structures, load-bearing structures, building envelopes, cold-formed elements, thin-walled steel structures, probability of failure-free operation, thermal conductivity, risk theory.