

УДК 624.014:697.112.3

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ВІДМОВИ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ СТАЛЕВИХ ХОЛОДНОФОРМОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ТЕПЛОТЕХНІЧНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

СЕМКО В. О.¹, к. т. н., доц.

¹ Кафедра конструкцій із металу, дерева та пластмас, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Першотравневий проспект, 24, 36011, Полтава, Україна, тел. +38 (0532) 56-16-04, e-mail : syom@mail.ru, ORCID ID : 0000-0003-2438-0135

Анотація. *Метою статті* є розроблення методики визначення імовірності теплових відмов огороджувальних конструкцій із сталевих холодноформованих елементів за трьома теплотехнічними показниками. *Актуальність дослідження.* Проектування огороджувальних конструкцій на основі детерміністичних підходів не враховує мінливості багатьох факторів які впливають на результат розрахунку. Отримання математичного апарату для здійснення імовірнісних розрахунків огороджувальних конструкцій дозволить оцінити вплив мінливості різних факторів на безвідмовну роботу теплоізоляційної оболонки. *Методи дослідження :* в дослідженнях використані методи будівельної теплофізики та теорії надійності. *Результати.* Розроблено методику визначення імовірності відмови огороджувальних конструкцій із лінійними теплопровідними включеннями за трьома теплотехнічними показниками. *Практична значимість* отриманої методики розрахунку полягає в отриманні математичного апарату для оцінки впливу різних факторів та їх мінливості на безвідмовність роботи огороджувальних конструкцій із теплопровідними включеннями, наприклад, стінових конструкцій із холодноформованих сталевих елементів.

Ключові слова : тепла надійність; імовірність відмови; лінійні теплопровідні включення; мінливість; лінеаризація; холодноформовані сталеві профілі; ЛСТК

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ТЕПЛОВОГО ОТКАЗА ОГОРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

СЕМКО В. А.¹, к. т. н., доц.

¹ Кафедра конструкций из металла, дерева и пластмасс, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Первомайский проспект, 24, 36011, Полтава, Украина, тел. +38 (0532) 56-16-04, e-mail : syom@mail.ru, ORCID ID : 0000-0003-2438-0135

Аннотация. *Целью статьи* является разработка методики определения вероятности тепловых отказов ограждающих конструкций из стальных холодноформованных элементов по трем теплотехническим показателям. *Актуальность исследования.* Проектирование ограждающих конструкций на основе детерминистических подходов не учитывает изменчивости многих факторов которые влияют на результат расчета. Получения математического аппарата для выполнения вероятностных расчетов ограждающих конструкций позволит оценить влияние изменчивости разных факторов на безотказную работу теплоизоляционной оболочки. *Методы исследования :* в исследованиях использованы методы строительной теплофизики и теории надежности. *Результаты.* Разработано методику определения вероятности отказа ограждающих конструкций с линейными теплопроводными включениями по трем теплотехническим показателям. *Практическая значимость* полученной методики расчета состоит в получении математического аппарата для оценки влияния разных факторов и их изменчивости на безотказность работы ограждающих конструкций с теплопроводными включениями, например, стеновых конструкций из холодноформованных стальных элементов.

Ключевые слова: тепловая надежность; вероятность отказа; линейные теплопроводные включения; изменчивость; линеаризация; холодноформованные стальные профили; ЛСТК

METHOD FOR DETERMINATION OF THE PROBABILITY OF THERMAL FAILURE OF BUILDING ENVELOPES MADE OF STEEL COLD-FORMED ELEMENTS BY USING THE THERMAL CHARACTERISTICS

SEMKO V.O.¹, PhD, Associate Professor

¹Department of Metal, Wooden and Plastic Constructions, Poltava Yuri Kondratyuk National Technical University, 24 Pershotravnevyi avenue, Poltava, 36011, Ukraine, tel. +38 (0532) 56-16-04, e-mail: syom@mail.ru, ORCID ID : 0000-0003-2438-0135

Annotation. The aim of the article is to develop a methodology for determining the probability of thermal failure of building envelopes made of cold-formed steel elements by using three thermal indicators. **The relevance of the research.** Design of building envelopes based on the deterministic approaches does not take into account the variability of many factors that affect the result of the calculation. Obtaining the mathematical apparatus to perform the probability calculations of envelopes will give an insight into the effect of the variability of different factors on the reliable operation of a heat-insulating cover. **Methods:** the study used methods of building thermal physics and the theory of reliability. **Results.** Method for determining the probability of thermal failure of building envelopes with linear heat-conducting inclusions by three thermal indicators. **The practical significance** of the received method of calculation is that a mathematical apparatus of evaluation of the effect of different factors and their variability on the faultness performance of building envelopes with heat-conducting inclusions, such as wall structures made of cold-formed steel elements, was received.

Keywords: thermal reliability; probability of failure; linear heat-conducting inclusions; variability; linearization; cold-formed steel profiles; CFSS

Вступ

Збільшення вартості енергетичних ресурсів призводить до підвищення вимог до енергетичної ефективності будинків. Зменшення витрат на опалювання будинків можливе за рахунок використання як поновлювальних джерел енергопостачання, так і підвищення вимог до огорожувальних конструкцій. За останні 10 років в країні двічі було підвищено нормативи до огорожувальних конструкцій [1, 2]. При цьому кількість температурних зон зменшилось з 4 до 2, а отже вимоги до теплової надійності будинків однакові, як на півночі Сумської, так і на півдні Кіровоградської області. В той же час багато проєктувальників не враховують вплив теплопровідних включень, що завжди наявні в огорожувальних конструкціях, обмежуючись лише розглядом однорідних ділянок. Це може мати негативний вплив для каркасних будівель, до яких належать і будинки із сталевих холодноформованих профілів.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями

Теплова відмова огорожувальної конструкції, на відміну від відмови несучої конструкції, не призводить до людських жертв, а в першу чергу призводить до економічних втрат – таких як збільшення використання енергоресурсів, витрат на ліквідацію наслідків локальних замочувань, боротьби із грибками та цвілью. В деяких випадках, при малій імовірності події, можливо, значно дешевше ліквідувати потенційні наслідки від теплової відмови, чим проєктувати та влаштовувати засоби по її попередженню. Для каркасних будівель, огорожувальні конструкції яких мають багато температурних включень, актуальним питанням є визначення імовірності відмови за трьома теплотехнічними показниками – приведеним опором

теплопередачі, перевищенням значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції та температурою внутрішнього повітря над значеннями температури допустимими за санітарно-гігієнічними вимогами та за критерієм зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вирішення проблеми оцінки теплової надійності огорожувальних конструкцій в Україні розпочав Фаренюк Г. Г. [7], який запропонував 4 стани теплових відмов. В подальшому ці дослідження продовжив Пашинський В. А. яким було запропоновано методи для числової оцінки імовірності відмови однорідних огорожувальних конструкцій за критеріями: недосягнення достатнього рівня опору теплопередачі через мінливість геометричних та теплофізичних характеристик матеріалів огорожувальних конструкцій; перевищення максимального допустимого значення щільності теплового потоку через огорожувальну конструкцію [3, 4]. Для використання запропонованого Пашинським В. А. методу одним із вихідних даних є результати досліджень мінливості теплотехнічних характеристик будівельних матеріалів. Варто зазначити, що такі дослідження в Україні проводяться в обмеженому обсязі. Зокрема відомі дослідження проведені в лабораторії Полтавського національного технічного університету [8, 9]. Також відомі результати литовських [10] та португальських дослідників [11], при цьому остання праця є доволі цінною, адже основана на результатах випробувань декількох тисяч зразків будівельних матеріалів.

Визначення мети та задачі дослідження

Метою даної роботи є розроблення методики визначення імовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевих

холодноформованих елементів за трьома критеріями теплотехнічних показників.

Виклад основного матеріалу

Згідно державних будівельних норм теплоізоляційні огорожувальні конструкції будинків проектується за теплотехнічними показниками їх елементів, тепловитратами будинку на опалення, а також критеріями теплостійкості, повітропроникності та вологісного режиму. Проектування за теплотехнічними показниками має найбільший вплив на геометричні та теплофізичні параметри огорожувальних конструкцій. У більшості випадків виконання умов теплотехнічних показників (1)-(3) призводить до виконання інших умов для розглядуваної огорожувальної конструкції. Виконання умові повітропроникності або вологісного режиму конструкції в сучасних умовах, як правило вирішується конструктивними заходами (оштукатурюванням пористих матеріалів, встановленням паро- або вітробар'єрів і т.п.).

Умови, що повинні бути виконані при проектуванні за теплотехнічними показниками

$$R_{\Sigma np} \geq R_{qmin}; \quad (1)$$

$$\Delta t_{np} \leq \Delta t_{cz}; \quad (2)$$

$$\tau_{\theta min} > t_{min}, \quad (3)$$

де $R_{\Sigma np}$ – приведений опір теплопередачі непрозорі огорожувальної конструкції, R_{qmin} – мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорі огорожувальної конструкції, Δt_{np} – температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, Δt_{cz} – допустима за санітарно-гігієнічними вимогами різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $\tau_{\theta min}$ – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції, t_{min} – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні при розрахункових значеннях температур внутрішнього й зовнішнього повітря.

Тобто оцінка надійності огорожувальної конструкції (за критерієм безвідмовності) за теплотехнічними показниками зводиться до вирішення трьох задач.

Методика визначення ймовірності теплової відмови огорожувальних конструкцій із сталевих холодноформованих елементів за критерієм зниження локальних значень температур детально описана в праці [6]. Ймовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій за критерієм зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря дорівнює ймовірності того, що випадкова величина

мінімального значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції буде меншою за температуру конденсації водяної пари (t_p):

$$Q_{\tau_e} = \text{prob}\{\tau_e < t_p\} = F_{\tau_e}(t_p), \quad (4)$$

де $F_{\tau_e}(\dots)$ – функція нормального розподілу температури внутрішньої поверхні у місці теплопровідного включення з математичним сподіванням (5) і стандартом (6).

$$M_{\tau_e} = t_e - \frac{M_k(t_e - M_{t_3})}{M_C \cdot \alpha_e}, \quad (5)$$

$$S_{\tau_e} = \sqrt{\left(\frac{t_e - M_{t_3}}{M_C \cdot \alpha_e}\right)^2 S_k^2 + \left(\frac{M_k}{M_C \cdot \alpha_e}\right)^2 S_{t_3}^2 + \left(\frac{M_k(t_e - M_{t_3})}{M_C^2 \cdot \alpha_e}\right)^2 S_C^2}, \quad (6)$$

де t_e – розрахункова температура внутрішнього повітря; α_e – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції; M_k , S_k – математичне сподівання та стандарт лінійного коефіцієнту теплопередачі, M_C , S_C – математичне сподівання та стандарт ширини теплопровідного включення (ширини полицки профілю), M_{t_3} , S_{t_3} – математичне сподівання та стандарту розподілу зовнішньої температури повітря.

Чисельно ймовірність теплової відмови за критерієм зниження локальних значень температур внутрішньої поверхні до температури конденсації пари повітря визначається за допомогою характеристики безпеки

$$\beta = \frac{M_{\tau_e} - t_p}{S_{\tau_e}}, \quad (7)$$

$$Q_{\tau_e} = 0,5 - F(\beta), \quad (8)$$

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

З формул (5) та (6) видно, що ймовірність теплової відмови розглянута, як залежність від трьох випадкових факторів – зовнішньої температури, ширини теплопровідного включення та значення лінійного коефіцієнту теплопередачі та визначається для визначеного рівня відносної вологості повітря в приміщенні.

Цю ймовірність теплової відмови можна розглядати, як ймовірність відмови окремого вузла огорожувальної конструкції, адже для кожного типу теплопровідного включення вона може бути різною.

Так як сталеві тонкостінні профілі, представляють собою лінійні температурні включення, то запропонована методика розглядає лише їх, але взявши цю методику за основу можна розробити методику для визначення ймовірності теплової відмови в місцях точкових температурних включень.

Наступні дві перевірки теплової надійності за рівняннями (1) та (2) потребують визначення статистичних характеристик функції нормального розподілу опору теплопередачі однорідних ділянок огорожувальної конструкції. Методику для визначення математичного сподівання та стандарту функції опору теплопередачі в залежності від мінливості товщини шарів та мінливості теплопровідності матеріалів запропоновано Пашинським В. А. [4]:

$$M_{R_{\Sigma}} = \frac{1}{\alpha_3} + \frac{1}{\alpha_6} + \sum_{i=1}^n \frac{M_{\delta_i}}{M_{\lambda_i}}, \quad (9)$$

$$S_{R_{\Sigma}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{S_{\delta_i}}{M_{\lambda_i}} \right)^2 + \left(\frac{S_{\lambda_i} \cdot M_{\delta_i}}{M_{\lambda_i}^2} \right)^2 \right]}, \quad (10)$$

де n – кількість шарів огорожувальної конструкції; M_{δ_i} та S_{δ_i} – математичне сподівання й стандарт товщини i -того шару; M_{λ_i} та S_{λ_i} – математичне сподівання й стандарт коефіцієнту теплопровідності i -того шару.

Функцію температурного перепаду між температурою внутрішнього повітря та температурою внутрішньої поверхні стіни знайдемо за формулою:

$$\Delta t_{np} = t_6 - \tau_6, \quad (11)$$

де

$$\tau_6 = t_6 - \frac{t_6 - t_3}{R_{\Sigma} \alpha_6}. \quad (12)$$

Підставивши (12) в (11) отримаємо

$$\Delta t_{np} = \frac{t_6 - t_3}{R_{\Sigma} \alpha_6}. \quad (13)$$

Імовірність теплової відмови огорожувальних конструкцій за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції та температури внутрішнього повітря над значеннями температури допустимими за санітарно-гігієнічними вимогами дорівнює імовірності того, що випадкова величина мінімального значення температурного перепаду буде більшою за температурний перепад допустимий за санітарно-гігієнічними нормами:

$$Q_{\Delta t_{np}} = \text{prob}\{\Delta t_{np} > \Delta t_{cz}\} = F_{\Delta t_{np}}(\Delta t_{cz}), \quad (14)$$

де $F_{\Delta t_{np}}(\dots)$ – функція нормального розподілу значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції та внутрішньою температурою повітря з математичним сподіванням (15) і стандартом (16).

Для визначення статистичних характеристик функції температурного перепаду між температурою

внутрішнього повітря та температурою внутрішньої поверхні стіни (13) використаємо метод лінеаризації [5].

Математичне сподівання та стандарт функції температурного перепаду між температурою внутрішнього повітря та температурою внутрішньої поверхні стіни будуть визначатись за формулами (15) та (16).

$$M_{\Delta t_{np}} = \frac{t_6 - M_{t_3}}{M_{R_{\Sigma}}} \cdot \frac{1}{\alpha_6}, \quad (15)$$

$$S_{\Delta t_{np}} = \sqrt{\left(\frac{S_{t_3}}{M_{R_{\Sigma}} \alpha_6} \right)^2 + \left(\frac{(t_6 - M_{t_3}) S_{R_{\Sigma}}}{\alpha_6 \cdot M_{R_{\Sigma}}^2} \right)^2}, \quad (16)$$

Чисельно імовірність теплової відмови за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції і значень температури повітря допустимих за санітарно-гігієнічними вимогами визначається за допомогою характеристики безпеки

$$\beta = \frac{M_{\Delta t_{np}} - \Delta t_{cz}}{S_{\Delta t_{np}}}, \quad (17)$$

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

Для визначення ймовірності відмови огорожувальної конструкції із лінійними теплопровідними включеннями за критерієм недостатнього значення приведенного опору теплопередачі необхідно розглянути функцію приведенного опору теплопередачі:

$$R_{np} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{\Sigma i}} F_i + \sum_{j=1}^m k_j L_j}, \quad (19)$$

де $R_{\Sigma i}$ – опір теплопередачі термічно однорідної i -тої непрозорі огорожувальної конструкції; F_i – площа i -тої термічно однорідної зони; F_{Σ} – площа огорожувальної конструкції; k_j – лінійний коефіцієнт теплопередачі j -го теплопровідного включення; L_j – лінійний розмір, j -го теплопровідного включення за внутрішньою поверхнею термічно неоднорідної огорожувальної конструкції.

Якщо знехтувати мінливістю геометричних параметрів огорожувальної конструкції (площа та довжина температурних включень), то залишаються два параметри (опір теплопередачі однорідної ділянки конструкції та лінійний коефіцієнт теплопередачі), мінливість яких буде впливати на мінливість функції приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції із лінійними теплопровідними включеннями. Виходячи із цього припущення можна отримати методом лінеаризації статистичні характеристики функції розподілу.

Імовірність теплової відмови огорожувальної конструкції із лінійними теплопровідними включеннями за критерієм недостатнього значення

приведеного опору теплопередачі дорівнює імовірності того, що приведений опір теплопередачі конструкції буде меншим за допустиме значення опору теплопередачі:

$$Q_{R_{np}} = \text{prob}\{R_{np} < R_{q \min}\} = F_{R_{np}}(R_{q \min}), \quad (20)$$

де $F_{R_{np}}(\dots)$ – функція нормального розподілу приведеного опору теплопередачі огорожувальної конструкції із лінійними теплопровідними включеннями з математичним сподіванням (21) і стандартом (22).

$$M_{R_{np}} = \frac{F_{\Sigma}}{\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{M_{R_{\Sigma i}}} + \sum_{j=1}^m M_{kj} \cdot L_j}, \quad (21)$$

$$S_{R_{np}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{\Sigma} \cdot F_i}{M_{R_{\Sigma i}}^2 \left(\frac{F_i}{M_{R_{\Sigma i}}} + \sum_{j=1}^m M_{kj} \cdot L_j \right)^2} \times S_{R_{\Sigma i}} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{F_{\Sigma} \cdot L_j}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{F_i}{M_{R_{\Sigma i}}} + M_{kj} \cdot L_j \right)^2} \times S_{kj} \right)^2}, \quad (22)$$

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

$$\beta = \frac{M_{R_{np}} - R_{q \min}}{S_{R_{np}}}, \quad (23)$$

$$Q_{R_{np}} = 0,5 - F(\beta). \quad (24)$$

Формула (20) є також і умовою теплової відмови термічно однорідної огорожувальної конструкції при визначенні математичного сподівання функції за формулою (9), стандарту за формулою (10).

Приклад

Необхідно визначити імовірність теплової відмови фрагмента стінової конструкції із однаковими теплопровідними включеннями у вигляді сталевих стійок за теплотехнічними показниками. Розрахункова схема вузла представлена на рисунку 1. Місто будівництва – м. Полтава, $R_{q \min} = 3,3 \text{ м}^2 \times \text{К}/\text{Вт}$. Відносна вологість повітря в приміщенні – 60% ($t_p = 12^\circ\text{C}$), $\Delta t_{cz} = 4^\circ\text{C}$.

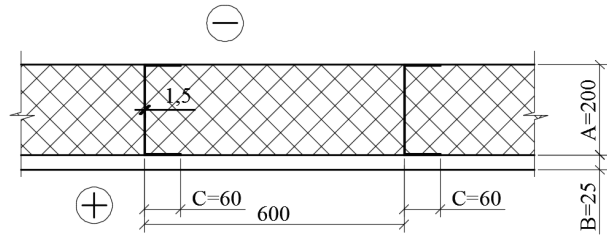


Рис. 1. Фрагмент стінової конструкції / Fig. 1. The fragment of the wall structure

Маємо наступні вихідні дані:

- математичне сподівання та стандарт функції лінійного коефіцієнту теплопередачі k $M_k = 0,0895 \text{ Вт}/\text{м} \times \text{К}$; $S_k = 0,002945 \text{ Вт}/\text{м} \times \text{К}$ (згідно роботи [6]);
- математичне сподівання та стандарт функції температури зовнішнього повітря для найбільш холодної доби (м. Полтава) (згідно роботи [6]): $M_{t_s} = -21,92^\circ\text{C}$, $S_{t_s} = 4,15^\circ\text{C}$;
- математичне сподівання та стандарт функції ширини теплопровідного включення $M_C = 0,06 \text{ м}$; $S_C = 0,000457317 \text{ м}$ (згідно роботи [6]);
- математичне сподівання та стандарт функцій товщини гіпсокартонного оздоблення $M_B = 0,025 \text{ м}$; $S_B = 0,00054878 \text{ м}$ та висоти сталевого стінового профілю $M_A = 0,2 \text{ м}$; $S_A = 0,000457317 \text{ м}$ (згідно роботи [6]);
- математичне сподівання та стандарт функцій теплопровідності гіпсокартону $M_{\lambda_{гк}} = 0,2055 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$; $S_{\lambda_{гк}} = 0,0071 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ та утеплювача з базальтової вати $M_{\lambda_{бв}} = 0,0423 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$; $S_{\lambda_{бв}} = 0,0015 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$ (згідно роботи [9]).

Розглянемо фрагмент стіни розміром $1 \times 1 \text{ м}^2$. В такому фрагменті може бути розташовано 1 або 2 сталевих профіля розташованих із кроком 600 мм. Тобто довжина теплопровідних включень буде становити 1м, або 2м. Прийемо для подальших розрахунків $L = 1,5 \text{ м}$.

Зображена на рисунку 1 конструкція має 1 тип теплопровідних включень та 1 тип термічно однорідних ділянок. Площа термічно однорідної ділянки буде становити $1 - 1,5 \times 0,06 = 0,91 \text{ м}^2$.

Результати визначення математичного сподівання та стандарту функції представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Математичне сподівання та стандарт функцій / Mean of distribution functions and standard deviation

	τ_b	R	Δt_{np}	R_{np}
M	12,813	5,00	0,962	3,165
S	0,7518	0,168	0,100	0,075

Таблиця 2

Показники надійності / Reliability indicators

	τ_b	R	Δt_{np}	R_{np}
β	1,081	10,16	30,2	-1,789
Q	0,1399	0	0	0,963

З таблиць 1 видно, що за детерміністичним підходом огорожувальна конструкція задовольняє вимогам (2) та (3) та не задовольняє умові (1), не зважаючи на те, що термічно однорідна частина стіни має опір теплопередачі, що маже на 50% перевищує мінімально допустимий.

В той же час результати імовірнісного розрахунку таблиці 2 вказують на доволі високу імовірність (близько 14%) відмови за критерієм появи конденсату на внутрішній поверхні стіни в місцях лінійних теплопровідних включень. Приведений опір теплопередачі на 4,1% не досягає необхідного мінімально допустимого рівня опору теплопередачі стіни, але за рахунок малого значення стандарту приведенного опору теплопередачі імовірність відмови за критерієм недостатнього значення приведенного опору теплопередачі становить більше 96%.

Для порівняння змінимо в умовах задачі наступні показники: відносна вологість в приміщенні – 50% ($t_p=9,28^\circ\text{C}$), математичне сподівання функції теплопровідності базальтової вати $M_{\lambda_{об}}=0,039$ Вт/(м×К). Отримані результати представимо в таблицях 3 та 4.

Дані таблиці 3 свідчать про відповідність огорожувальної конструкції вимогам ДБН [1] за теплотехнічними показниками (1)-(3). Результати таблиці 4 свідчать про практично нульову імовірність відмов за критеріями (4) та (14). В той же час імовірність відмови за критерієм (24) доволі висока і становить 47,26%.

Таблиця 3

**Математичне сподівання та стандарт функцій /
Mean of distribution functions and standard
deviation**

	τ_b	R	$\Delta t_{пр}$	$R_{пр}$
M	12,813	5,408	0,891	3,306
S	0,7518	0,198	0,094	0,083

Таблиця 4

Показники надійності / Reliability indicators

	τ_b	R	$\Delta t_{пр}$	$R_{пр}$
β	4,698	10,66	-33	0,068
Q	0	0	0	0,4726

Результати таблиць 1-4 вказують на те, що за умов досягнення високих значень опору теплопередачі імовірність відмови за критерієм (14) майже нульова.

Для перевірки цього твердження збільшимо теплопровідність утеплювача до $M_{\lambda_{об}}=0,2$ Вт/(м×К). Всі інші вихідні дані залишимо як на початку задачі. Отримані результат представимо у вигляді таблиць 5 та 6.

Таблиця 5

**Математичне сподівання та стандарт функцій /
Mean of distribution functions and standard
deviation**

	τ_b	R	$\Delta t_{пр}$	$R_{пр}$
M	12,813	1,28	3,764	1,183
S	0,7518	0,0093	0,373	0,0095

Таблиця 6

Показники надійності / Reliability indicators

	τ_b	R	$\Delta t_{пр}$	$R_{пр}$
β	1,081	>-10	-0,631	>-10
Q	0,1399	1	0,2639	1

Згідно розрахунків видно, що стінова конструкція не відповідає умові досягнення мінімального опору теплопередачі (1), в той же час задовольняє умовам (2) та (3). З таблиці 6 видно, що не зважаючи на відповідність конструкції вимогам (2) та (3) імовірність відмови за цими критеріями знаходиться на рівні 26,4% та 14% відповідно. Тобто припущення про те, що відмова огорожувальної конструкції за критерієм перевищення значень перепаду температур між приведеною температурою внутрішньої поверхні конструкції та температури внутрішнього повітря над значеннями температури допустимими за санітарно-гігієнічними вимогами (14), можлива лише при 100% імовірності відмови за критерієм недосягнення мінімального опору теплопередачі.

Порівнюючи значення характеристик безпеки $\beta_{те}$ в таблицях 2, 4 та 6 видно, що ймовірність відмови за даним критерієм залежать не тільки від зовнішньої температури, ширини та лінійного коефіцієнту теплопередачі теплопровідного включення, а і від відносної вологості в приміщенні.

Проведемо порівняння впливу місця розташування будинку на імовірність відмови за теплотехнічними показниками. Змінимо в умовах задачі місто Полтаву на м. Кропивницький (колишній Кіровоград). Результати представимо в таблицях 7, 8.

Таблиця 7

**Математичне сподівання та стандарт функцій /
Mean of distribution functions and standard
deviation**

	τ_b	R	$\Delta t_{пр}$	$R_{пр}$
M	13,433	5,00	0,962	3,165
S	0,7028	0,168	0,100	0,075

Таблиця 8

Показники надійності / Reliability indicators

	τ_b	R	$\Delta t_{пр}$	$R_{пр}$
β	2,039	10,16	30,2	-1,789
Q	0,0207	0	0	0,963

Порівнявши результати таблиці 2 і таблиці 8 можна зробити висновок, що місце будівництва (розподіл функції зовнішніх температур) впливає безпосередньо на імовірність відмови впливів із теплопровідними включеннями, перевірка умови (3). В той же час можна відмітити той факт, що однакові конструкції розташовані в одній температурній зоні згідно з ДБН [2] мають різну надійність елементів.

Так імовірність відмови за критерієм появи конденсату на поверхні стіні в місці температурного включення становить 14% для м. Полтави, а для м. Кропивницького – 2%.

Висновки

В статті представлена методика визначення імовірності відмови огорожувальних конструкцій із лінійними теплопровідними включеннями за теплотехнічними показниками. Дана методика може бути застосована не тільки для огорожувальних конструкцій із сталевих холодноформованих профілів.

Проведені дослідження охоплюють лише декілька факторів, що впливають на надійність

огорожувальних конструкцій. В чисельному прикладі показано як ці фактори можуть змінювати імовірність відмови елемента за різними показниками.

Дана робота може бути продовжена в напрямку дослідження мінливості геометричних та теплофізичних показників будівельних матеріалів, натурному вивченні мінливості лінійних коефіцієнтів теплопередачі теплопровідних включень, натурному вивченню впливу дефектів монтажу та експлуатації на імовірність відмови огорожувальних конструкцій.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДБН В.2.6-31:2006. Теплова ізоляція будівель. – К. : Мінбуд. України, 2006. – 65 с. Режим доступу : <http://old.minregion.gov.ua/attachments/files/bydivnitstvo/tehnichne-regulyuvannya/normuvannja/DBN%20V26312006.zip>
2. ДБН В.2.6-31:2006. Теплова ізоляція будівель. Зміна №1 [Текст]// Інформаційний бюлетень МРУ. – № 5. – 2013. – С. 3–11. Режим доступу : <http://old.minregion.gov.ua/attachments/files/bydivnitstvo/tehnichne-regulyuvannya/normuvannja/DBN%20V26312006.zip>
3. Пашинський В. А. Температурні впливи на огорожувальні конструкції будівель / В. А. Пашинський, Н. В. Пушкар, А. М. Карюк. – Одеса: ОДАБА, 2012. – 180 с.
4. Пашинський В. А. Методика оцінювання теплової надійності стін за критерієм тепловитрат / В. А. Пашинський, О. А. Плотніков, А. М. Карюк // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Випуск 45., - Луцьк, 2014. – С. 417-423. Режим доступу : http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=A SP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=Nn_2014_45_67
5. Пичугин С. Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий : монография / С. Ф. Пичугин. – М. : Ассоциация строительных вузов, 2011. – 456 с.
6. 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. Режим доступу : <http://csw.kart.edu.ua/article/view/69985>
7. Фаренюк Г. Г. Методологічні аспекти забезпечення енергоефективності та теплової надійності будинків / Г. Г. Фаренюк // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. науч. трудов. – Вып. 50, – Днепропетровск : ГВУЗ ПГАСА, 2009. – С. 593-597.
8. Шульгін В. В. Імовірнісне подання технічних характеристик теплоізоляційних матеріалів / В. В. Шульгін, А. М. Карюк // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Випуск 4(39). – Том 2. – Полтава : ПолтНТУ. – 2013. – С. 257–262. Режим доступу : [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=A SP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=Znpgmb_2013_4\(2\)_34](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=A SP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=Znpgmb_2013_4(2)_34)
9. 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. – ПолтНТУ, 2016. – Вип. 1 (46). – С. 60–67. Режим доступу : http://znp.pntu.edu.ua/files/archive/ua/46_2016/9.pdf
10. Stankevičius V. The Effect of Stochastically Dependent Physical Parameters on the Materials' Thermal Receptivity Coefficient / Vytautas Stankevičius, Liutauras Kairys // Materials science (Medžiagotyra). – Vol. 11. – No. 2. – 2005. –P.188-192. Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/238077874_The_Effect_of_Stochastically_Dependent_Physical_Parameters_on_the_Materials'_Thermal_Receptivity_Coefficient
11. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / Fernando Domínguez-Muñoz, Brian Anderson, José M. Cejudo-López, Antonio Carrillo-Andrés // Energy and Buildings. – Volume 42. – Issue 11. – November 2010, – PP. 2159-2168. Режим доступу : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810002227>

REFERENCES

1. DBN V.2.6-31:2006. *Teplava izolyacia budivel* [Thermal insulation of buildings]. – Kyiv. : Minbud. Of Ukraine, 2006. – 65 p. (in Ukrainian) Available at: <http://old.minregion.gov.ua/attachments/files/bydivnitstvo/tehnichne-regulyuvannya/normuvannja/DBN%20V26312006.zip>

2. DBN V.2.6-31:2006. *Теплова ізоляція будівел.Зміна #1* [Thermal insulation of buildings. Change #1] // *Informacynii bulletin MRU* [Newsletter MRU]. – № 5. – 2013. – P. 3–11. (in Ukrainian) Available at: <http://old.minregion.gov.ua/attachments/files/bydivnitstvo/tehnichne-regulyuvannya/normuvannya/DBN%20V26312006.zip>
3. Pashynskiy V.A., Pushkar N.V. and Kariuk A.M. *Temperaturni vplyvy na ogorodzhuvalni konstrukcii budivel* [Temperature effects on the envelope of buildings]. – Odesa: ODABA, 2012. – 180 p. (in Ukrainian)
4. Pashynskiy V.A., Plotnikov O.A. and Kariuk A.M. Methodology of the evaluation of thermal reliability of the walls by the criteria of the heat losses // *Mizhvuzivskiy zbirnyk «Naukovi notatky»* [Interuniversity collection "Science notes"]. – Issue 45., - Lutsk, 2014. – pp. 417-423. (in Ukrainian) Available at: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=A SP_meta&C21COM=S&2 S21P03=FILE=&2 S21STR=Nn_2014_45_67
5. Pichigin S. F. Reliability of industrial building steel structures. – Moscow. : ASV, 2011. – 456 p. (in Russian)
6. Pichigin S. An Semko V. The probability of the thermal failure of building envelopes made of cold-formed steel elements based on local temperature decrease criterion // Collected scientific works of Ukrainian state university of railway. – Kharkiv, 2016. – Issue 160. – pp. 25-34. (in Ukrainian) Available at: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/69985>
7. Farenuk G.G. *Metodologichni aspekty zabezpechennya energoefektyvnosti ta teplovoi nadiynosti budynkiv* [Methodological aspects of energy efficiency and thermal reliability of buildings] // *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie* – [Construction, materials science, mechanical engineering]. PDABA. Dnipropetrovsk, 2009, no. 50, pp. 593-597. (in Ukrainian)
8. Shul'hin V.V. and Kariuk A.M. Probabilistic presentation of heat insulation materials specifications // *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. – PoltNTU, 2013. – No. 4(39). – Volume 2. – pp.257-262. Available at: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=A SP_meta&C21COM=S&2 S21P03=FILE=&2 S21STR=Znpgmb_2013_4\(2\)_34](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=A SP_meta&C21COM=S&2 S21P03=FILE=&2 S21STR=Znpgmb_2013_4(2)_34)
9. Semko V.O., Leshchenko M.V. and Rud A.G. Experimental study of variability of thermal conductivity of insulation materials // *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. – PoltNTU, 2016. – No. 1(46). – pp.60-67. Available at: http://znp.pntu.edu.ua/files/archive/ua/46_2016/9.pdf
10. Stankevičius V. The Effect of Stochastically Dependent Physical Parameters on the Materials' Thermal Receptivity Coefficient / Vytautas Stankevičius, Liutauras Kairys // *Materials science (Medžiagotyra)*. – Vol. 11. – No. 2. – 2005. –P.188-192. Available at: https://www.researchgate.net/publication/238077874_The_Effect_of_Stochastically_Dependent_Physical_Parameters_on_the_Materials'_Thermal_Receptivity_Coefficient
11. Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials / Fernando Domínguez-Muñoz, Brian Anderson, José M. Cejudo-López, Antonio Carrillo-Andrés // *Energy and Buildings*. – Volume 42. – Issue 11. – November 2010, – PP. 2159-2168. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810002227>

Стаття рекомендована до публікації д-ром. техн. наук, проф. Пічугіним С.Ф. (Україна); д-ром техн. наук, проф. Воскобійник О.П. (Україна)

Поступила до редколегії 22.08.2016