

УДК 004.9:614.841.45

AUTOMATION OF CONTROLLING THE THERMAL STATE OF STEEL STRUCTURES OF FOOD INDUSTRY BUILDINGS BASED ON THE VALIDATION OF MODIFIED METHODS FOR DETERMINING THE THERMAL PERFORMANCE OF THEIR FIRE PROTECTION COATINGS**M. Novak, Y. Smityukh***National University of Food Technologies***Key words:**

*Automation
Validation
Fire protection coating
Control
Steel structure
Thermal performance
Thermal state
Food industry*

Article history:

Received 09.09.2024
Received in revised form
23.09.2024
Accepted 11.10.2024

Corresponding author:

Y. Smityukh

E-mail:

smityuh1@gmail.com

Citation: Новак М. С., Смітюх Я. В. (2024). Автоматизація керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх вогнезахисних покривів. *Наукові праці НУХТ*, 30(5), 7—24.

DOI: 10.24263/2225-2924-2024-30-5-3

ABSTRACT

To determine the thermal performance of coatings intended for fire protection of steel structures in food industry buildings, it is relevant to develop and implement modified methods with a minimum number of test samples based on the experimental and calculation procedures given in EN 13381-4:2013 and EN 13381-8:2013.

The task of validating these modified methods as a task of automated control of the thermal state of steel structures under the influence of a standard temperature regime in accordance with EN 1363-1:2020 was formulated. The procedure for automated control of this thermal state was proposed, which allows determining the range of deviation of calculated from actual values of thermal performance of the coating and the optimal parameters in the applied calculation model, and is also acceptable for ensuring automation of experimental and calculation operations. According to this procedure, the values of the coating thickness on each sample were determined, at which, under the influence of the standard temperature regime, the conditions for compliance with the experimental and specified values of the time intervals until the critical steel temperature is reached on the samples are met, and also determine the range of deviation of the calculated from the actual values of the thermal parameters of the coating.

The tasks that need to be solved for further practical implementation of the proposed control procedure were outlined. They relate to the creation of algorithmic and software, justification of the value or procedure for determining the permissible deviation of the time interval until the critical steel temperature is reached, and verification of the control procedure with the created software through the use of simulation and natural experimentation methods.

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ СТАНОМ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ НА ОСНОВІ ВАЛІДАЦІЇ МОДИФІКОВАНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПОКАЗНИКІВ ЇХНІХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИВІВ

М. С. Новак, Я. В. Смітюх

Національний університет харчових технологій

Для визначення теплових показників покровів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій будівель харчової промисловості, актуальними є розробка і впровадження модифікованих методів з мінімальною кількістю випробних зразків, які засновано на експериментальних і розрахункових процедурах, наведених в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013.

У статті сформульовано задачу валідації цих модифікованих методів як задачу автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020. Запропоновано процедуру автоматизованого керування цим тепловим станом, яка дає змогу визначати діапазон відхилу розрахункових від дійсних значень теплових показників покрову й оптимальні параметри у застосовній розрахунковій моделі, а також є прийнятною для забезпечення автоматизації експериментальних і розрахункових операцій. Ця процедура містить етапи створення зразків сталевих конструкцій (колон) з покривом певної товщини, ідентифікації теплового стану зразків в умовах впливу стандартного температурного режиму, визначення дійсних і розрахункових значень теплових показників покрову і їхнього відхилу, мінімізації цього відхилу і визначення оптимальних параметрів застосованої розрахункової моделі. За цією процедурою визначають значення товщини покрову на кожному зразку, за яких при впливі стандартного температурного режиму виконуються умови щодо відповідності експериментальних і заданих значень проміжків часу до досягнення на зразках критичної температури сталі, а також діапазон відхилу розрахункових від дійсних значень теплових показників покрову.

Викладено задачі, які треба вирішити для подальшої практичної реалізації запропонованої процедури керування. Вони стосуються створення алгоритмічного та програмного забезпечення, обґрунтування значення або процедури визначення допустимого відхилу проміжку часу до досягнення критичної температури сталі, верифікації процедури керування зі створеним програмним забезпеченням через застосування методів імітаційного та натурного експериментів.

Ключові слова: автоматизація, валідація, вогнезахисний покрив, керування, сталева конструкція, тепловий показник, тепловий стан, харчова промисловість.

Постановка проблеми. Для забезпечення умов, прийнятних для виробництва і зберігання продуктів харчування, крім існуючих вимог до параметрів навколишнього середовища в приміщеннях, висувуються вимоги щодо забезпечення безпечності цих процесів в умовах впливу на конструкції будівель харчової про-

мисловості (колон, балок, стін, перекриттів) високих температур, пов'язаних з пожежами, які подано в ДБН В.1.1-7:2016, ДБН В.2.2-42:2021 і ДБН В.2.2-43:2021. Під час вогневого впливу ці конструкції можуть втратити свою несучу здатність, що призводить до їхнього руйнування і обвалення, а також до припинення процесу виробництва продуктів харчування або до втрати харчової продукції, яка зберігається. Умовою збереженості несучої здатності цих конструкцій є обмеження підвищення температури металеві поверхні (для сталевих будівельних конструкцій) або сталеві арматури (для залізобетонних будівельних конструкцій) під час вогневого впливу. Згідно з EN 1992-1-2:2023 і EN 1993-1-2:2024 значення цієї температури не повинно перевищувати критичної температури сталі. Для виконання цієї умови на зовнішню поверхню конструкцій наносять спеціальний вогнезахисний покрив (далі — покрив), виготовлений зі штукатурки, фарби, лаку, плит або матів, що повинен мати певну проєктну товщину, за якої під час вогневого впливу ці конструкції зберігають свою несучу здатність. Визначення цієї проєктної товщини здійснюють за даними щодо теплових показників покриття, які мають бути відомі для кожного покриття конкретного типу.

Для сталевих конструкцій (колон і балок) ці теплові показники встановлюють нормативні значення мінімальної товщини покриття d_p на їхній металевій поверхні, необхідні для забезпечення збереженості несучої здатності цих конструкцій протягом певних нормованих проміжків часу $t_{fr,requ}$ впливу стандартного температурного режиму, регламентованого в EN 1363-1:2020. Дані щодо теплових показників покриття для цих конструкцій подають у табличній формі згідно з EN 13381-4:2013 або EN 13381-8:2013. У цих таблицях наводять значення мінімальної товщини покриття d_p , визначені для широких діапазонів коефіцієнта перерізу сталеві конструкції A_m/V (від 40 м^{-1} до 300 м^{-1} , з кроком 10 м^{-1}), критичної температури θ_{cr} (від 350°C до 700°C , з кроком 50°C) і нормованого проміжку часу $t_{fr,requ}$ (від 15 хв до 360 хв, з кроком від 15 хв до 120 хв). Загальна кількість значень мінімальної товщини покриття, поданих в таких таблицях, є значною і відповідно до EN 13381-4:2013, EN 13381-8:2013 і EN 13501-2:2016 може досягати 1728. Для сталевих конструкцій, які мають певні значення показників A_m/V і θ_{cr} , за даними, наведеними в цих таблицях, визначають проєктну товщину покриття конкретного типу, і в заводських умовах або на об'єкті будівництва створюють цей вогнезахисний покрив, наприклад, методом розпилювання, що забезпечує збереженість несучої здатності конструкцій під час вогневого впливу.

Методи визначення теплових показників покриттів, призначених для сталевих конструкцій, наведено в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. У цих стандартах подано експериментальні і розрахункові процедури, необхідні для визначення теплових показників покриттів, призначених для конструкцій, які мають широкий діапазон нормованого проміжку часу $t_{fr,requ}$ (від 15 хв до 360 хв). Ці методи не потребують виконання складних розрахунків із застосуванням спеціально створеного для них програмного забезпечення, що є прийнятним для їхнього практичного застосування. Розрахунки можуть виконуватися, наприклад, із застосуванням програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel. Однак ці методи вимагають суттєвих витрат на створення значної кількості (до кількох десятків) великогабаритних зразків конструкцій і проведення їх випробувань у вогневих печах, що не завжди можливо реалізувати.

Для сталевих конструкцій будівель харчової промисловості, відповідно до ДБН В.1.1-7:2016, ДБН В.2.2-42:2021 і ДБН В.2.2-43:2021, діапазон нормованого проміжку часу $t_{fr,requ}$ збереженості їхньої несучої здатності становить від 30 хв до 150 хв і є значно менший діапазону, який встановлено в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Через це кількість значень мінімальної товщини покриття d_p , які необхідно визначати для цих конструкцій і наводити в табличній формі, є значно меншою порівняно зі стандартними методами, наведеними в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013, що обумовлює можливість зменшення кількості випробних зразків у методах визначення теплових показників покриттів, призначених для сталевих конструкцій будівель харчової промисловості.

З огляду на цю особливість і необхідність зменшення витрат на випробування й отримування достовірних результатів для визначення теплових показників покриттів, призначених для сталевих конструкцій будівель харчової промисловості, можливо можна застосовувати модифіковані методи з мінімально допустимою кількістю випробних зразків конструкцій і розрахункові процедури, наведені в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Однак для підтвердження цього припущення необхідно здійснити валідацію цих модифікованих методів для виявлення ступеня, за якого визначені за ними результати наближені до дійсних теплових показників покриття. Задачу валідації цих модифікованих методів доцільно розглядати як задачу автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму. Процедура цього керування має забезпечувати автоматизацію процесів ідентифікації теплового стану сталевих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020 та валідації модифікованих методів, що сприятиме підвищенню достовірності (об'єктивності) отримуваних результатів, а також визначати діапазон відхилю розрахункових від дійсних значень теплових показників покриттів і оптимальні параметри у застосовних розрахункових моделях. Недостатня визначеність такої процедури автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій для зазначених модифікованих методів обумовлює актуальність проведення досліджень у цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найбільш поширених способів валідації методів визначення фізичних величин, як зазначено в праці (Archambeault, & Connor, 2008), є валідація з використанням результатів, отриманих експериментальним шляхом. Під час застосування цього способу показники, визначені за методом, який валідують, порівнюють з результатами валідаційного експерименту. Проте застосування цього способу є проблематичним у разі, якщо прогноз визначальних показників неможливо здійснити в контрольованому середовищі, тому в праці (Paquette-Rufiange, Prudhomme, & Laforest, 2023) розглянуті питання, які стосуються планування валідаційних експериментів за такої ситуації.

Саме така ситуація, як показано в праці (Круковський, Новак, Поклонський, Єременко, & Фролов, 2021), характерна для валідаційних експериментів, призначених для методів визначення теплових показників покриттів сталевих конструкцій. Визначальним показником для цих методів є мінімальна товщина покриття, за якої температура металевої поверхні не перевищує критичної температури протягом нормованого проміжку часу збереженості несучої здатності конструкції в

умовах теплового впливу за стандартного температурного режиму. Однак визначити цей показник безпосередньо у валідаційному експерименті неможливо.

Для подолання цієї проблеми в праці (Новак, & Харкянен, 2024) запропоновано як валідаційний експеримент для методів визначення теплових показників покривів застосовувати експеримент, який полягає у вимірюванні в різні проміжки часу теплового впливу температури металевої поверхні зразків сталевих конструкцій, оснащених вогнезахисним покривом, а визначення значень необхідної мінімальної товщини покриття здійснювати за отриманими експериментальними даними розрахунковим шляхом із застосуванням математичних моделей. Слід зазначити, що недоліком процедури валідації, наведеної у цій праці, є наявність лише порівняння розрахункових значень необхідної мінімальної товщини покриття з дійсними (умовно точними) величинами і відсутність додаткового (контрольного) експерименту для оцінювання відповідності розрахункових значень проміжку часу до досягнення критичної температури нормованим проміжкам часу збереженості несучої здатності конструкції.

Під час проведення таких валідаційних експериментів необхідно здійснювати нормований тепловий вплив на зовнішню поверхню покриття зразків сталевих конструкцій, встановлених у спеціальних камерних печах, розрахованих на споживання рідкого або газоподібного пального, які відповідають вимогам щодо забезпечення протягом експерименту стандартного температурного режиму — номінального підвищення середньої температури газового середовища в печі від кімнатної до 945 °C (для тривалості 60 хв) і більше за логарифмічним законом згідно з EN 1363-1:2020. При цьому вважається (Keltner, Nash, Beitel, Parker, Welsh, & Gilda, 2003), що тепловий вплив на зовнішню (обігрівну) поверхню конструкції є відтворюваним і може бути оцінений за значенням вимірної температури в печі.

У працях (Sultan, Séguin, Latour, Leroux, & Henrie, 2006; Bula, Boiko, Lysyuk, Kurtyak, & Fall, 2014; Chaturvedi, Vedrtam, Youssef, Palou, Barluenga, & Kalauni, 2023) наведено описи конструкції печей, призначених для визначення теплового стану будівельних конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020. У них, зокрема, висвітлено дані щодо типів і розмірів цих печей, кількості й місць розташування пальників, обладнання для подавання пального і регулювання його витратою.

У праці (Pozdieiev, Nizhnyk, Feshchuk, Nekora, Nuianzin, & Shnal, 2021) шляхом комп'ютерного моделювання процесів тепло- та масообміну в печі із використанням програмного комплексу FlowVision 2.5 досліджено вплив конструктивних і експлуатаційних параметрів печі на її температурний режим. Результати цього дослідження дають змогу визначати прогнольні значення параметрів подавання пального і повітря в пальники печі, які забезпечують створення стандартного температурного режиму в печі згідно з EN 1363-1:2020.

У праці (Oktiawati, Alfata, Fahmizal, Rahayu, Ridwan, Kusuma, & Vidia, 2021) запропоновано систему автоматичного моніторингу температури в печі й температури зразків конструкцій, встановлених в ній, яка складається з апаратного і програмного забезпечення з використанням мікропроцесорної платформи з відкритим вихідним кодом Arduino. Ця система забезпечує перетворення аналогового сигналу термопар у цифровий, розрахунок середньої температури в печі й

відхилю фактичного температурного режиму в ній від номінального (стандартного), графічне відображення на моніторі й збереженість отриманих даних у форматі Excel (.xls). Слід зазначити, що цю систему моніторингу, завдяки використанню в ній платформи Arduino, може бути застосовано як елемент автоматизованої системи керування температурним режимом в печі згідно з EN 1363-1:2020. Приклад автоматизованої системи керування піччю для термічного оброблення сталі із застосуванням платформи Arduino наведено в (Zambaldi, Magalhaes, Barbosa, Silva, & Ferreira, 2017).

У праці (Mentsiev, & Mutaev, 2020) обговорюються існуючі системи і сучасні технології керування тепловими процесами в печах. Серед них певну зацікавленість викликає технологія цифрового двійника, що представляє фізичну піч, яка вимагає точного відображення всіх фізичних компонентів печі у комп'ютері. Цифровий двійник розглядається як новий вдосконалений крок у технології керування завдяки можливості еволюції фізичних систем у більш складні об'єкти шляхом додавання програмних функцій у деякі частини, наприклад, приводи та перетворювачі, та забезпечення зв'язку через кібер-фізичні системи. Стосовно сучасних систем керування тепловим режимом у печах, призначених для визначення теплового стану будівельних конструкцій за умов впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020, то це питання розглянуто в (Chaturvedi, Vedrtanam, Youssef, Palou, Barluenga, & Kalauni, 2023). У цій праці показано, що зазначені системи містять програмований логічний контролер, який має вбудований інтерфейс оператора, і забезпечують роботу печі як в автоматичному, так і в ручному режимах керування.

Підсумовуючи, варто зазначити, що існуючі системи керування і моніторингу забезпечують нормований тепловий вплив на будівельні конструкції, встановлені в печах, як в автоматичному, так і в ручному режимах керування, а також автоматизоване визначення їхнього теплового стану в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020. Є потреба в розробці процедури, придатної для визначення значень товщини покриття на зразках сталевих конструкцій, за яких в умовах впливу стандартного температурного режиму фактичний тепловий стан цих зразків відповідає нормованому. Перспективним у цій розробці є здійснення автоматизації процесу керування тепловим станом зразків сталевих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму на основі застосування процедури валідації методів визначення теплових показників їхніх вогнезахисних покриттів.

Мета дослідження: розробка процедури автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020 на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх покриттів, яка дає змогу визначати діапазон відхилю розрахункових від дійсних значень цих показників і оптимальні параметри в розрахункових моделях, а також забезпечує автоматизацію експериментальних і розрахункових операцій.

Матеріали і методи. Застосовано метод дослідження, складовими якого є аналізування, порівняння, узагальнення. Основні матеріали для дослідження — наукові публікації зарубіжних і вітчизняних учених у провідних періодичних і спеціалізованих світових виданнях, що стосуються автоматизації керування тепловими

процесами і виконання розрахункових процедур, а також валідації методів оцінювання визначальних показників у фізичних системах.

Викладення основних результатів дослідження. Для визначення теплових показників покривів, призначених для сталевих конструкцій будівель харчової промисловості, за зменшеними (порівняно з EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013) витратами на створення і проведення випробувань зразків конструкцій (колон і балок), доцільно застосовувати методи, модифіковані методам, наведеним в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Слід зазначити, що методи, подані в EN 13381-4:2013, призначені для визначення теплових показників покривів сталевих конструкцій, створених із пасивних вогнезахисних матеріалів (штукатурок, плит або матів), а методи, подані в EN 13381-8:2013, — для покривів із реактивних вогнезахисних матеріалів (фарб, лаків). Наведена в цих європейських стандартах процедура визначення теплових показників покривів містить експериментальну і розрахункову складові. Під час випробування за цими стандартами здійснюють ідентифікацію теплового стану зразків сталевих конструкцій з покривом в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020. За отриманими експериментальними даними щодо температури цих зразків у різні проміжки часу теплового впливу ($\theta_{a,1}(t)$, $\theta_{a,2}(t)$, ..., $\theta_{a,n}(t)$, де n — кількість зразків) розраховують значення мінімальної товщини покриву d_p на їхній металевій поверхні, необхідні для забезпечення збереженості несучої здатності цих конструкцій протягом певних нормованих проміжків часу $t_{fr,requ}$, і подають їх у табличній формі згідно з EN 13381-4:2013 або EN 13381-8:2013. Для розрахунку товщини покриву d_p , як в EN 13381-4:2013, так і в EN 13381-8:2013, використовують один з трьох альтернативних методів. Два із них засновано за застосуванні алгебраїчного рівняння (формули) теплопровідності за явною схемою кінцево-різницевої апроксимації. В одному з цих методів коефіцієнт теплопровідності покриву вважають незалежним від температури, в іншому — залежним від неї. Третій альтернативний метод засновано на використанні рівняння лінійної регресії.

Зазначену стандартизовану процедуру, включаючи ці три альтернативи розрахункові методи (через нескладність їхнього практичного застосування), є доцільним застосовувати як основу для модифікованих методів визначення теплових показників покривів, призначених для сталевих конструкцій будівель харчової промисловості, з такими відмінностями.

В експериментальній частині процедури для модифікованих методів слід зменшити кількість випробних зразків до чотирьох, а в їх розрахункових моделях слід застосовувати оптимальні параметри, які відповідають мінімальному відхиленню розрахункових значень теплових показників покривів від дійсних величин. Значення цих оптимальних параметрів необхідно визначати шляхом калібрування розрахункових моделей під час валідації цих модифікованих методів.

Задачу валідації модифікованих методів визначення теплових показників покривів, призначених для сталевих конструкцій будівель харчової промисловості, сформулюємо як задачу автоматизованого керування тепловим станом цих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020 таким чином: об'єкт керування — чотири зразки конструкцій (колон) зі сталі однієї марки заввишки 1,0 м, які мають різні значення товщини покриву ($d_{p,1}$, $d_{p,2}$, $d_{p,3}$, $d_{p,4}$), виконаного з вогнезахисного матеріалу одного типу, і певні значення

коефіцієнта поперечного перерізу (співвідношення між площею зовнішньої поверхні A_m , що піддається тепловому впливу, сталевій конструкції без урахування покриття та об'ємом поперечного перерізу V): $(A_m/V)_{\min} = 40 \text{ м}^{-1}$ — для зразків 1 і 2, $(A_m/V)_{\max} = 300 \text{ м}^{-1}$ — для зразків 3 і 4 (рис. 1). Його можна віднести до об'єктів з однією регульованою величиною і однією управляючою (регулюючою) величиною (параметром) з одним зовнішнім впливом.

Регульована (вихідна) величина (параметр) Y об'єкта керування — проміжки часу $t_{fr,1}$ і $t_{fr,2}$ до досягнення критичної температури 700°C ($\theta_{cr,max}$) на зразках 1 і 2 та $t_{fr,3}$ і $t_{fr,4}$ до досягнення критичної температури 350°C ($\theta_{cr,min}$) на зразках 3 і 4 в умовах впливу стандартного температурного режиму $\theta_s(t)$.

Задане значення регульованої величини Y_{set} об'єкта керування — нормовані проміжки часу $t_{fr,requ,1} = 30 \text{ хв}$ ($t_{fr,requ,min}$) і $t_{fr,requ,2} = 150 \text{ хв}$ ($t_{fr,requ,max}$) до досягнення критичної температури 700°C ($\theta_{cr,max}$) на зразках 1 і 2 та $t_{fr,requ,3} = 30 \text{ хв}$ і $t_{fr,requ,4} = 150 \text{ хв}$ до досягнення критичної температури 350°C ($\theta_{cr,min}$) на зразках 3 і 4 в умовах впливу стандартного температурного режиму $\theta_s(t)$ (рис. 2).

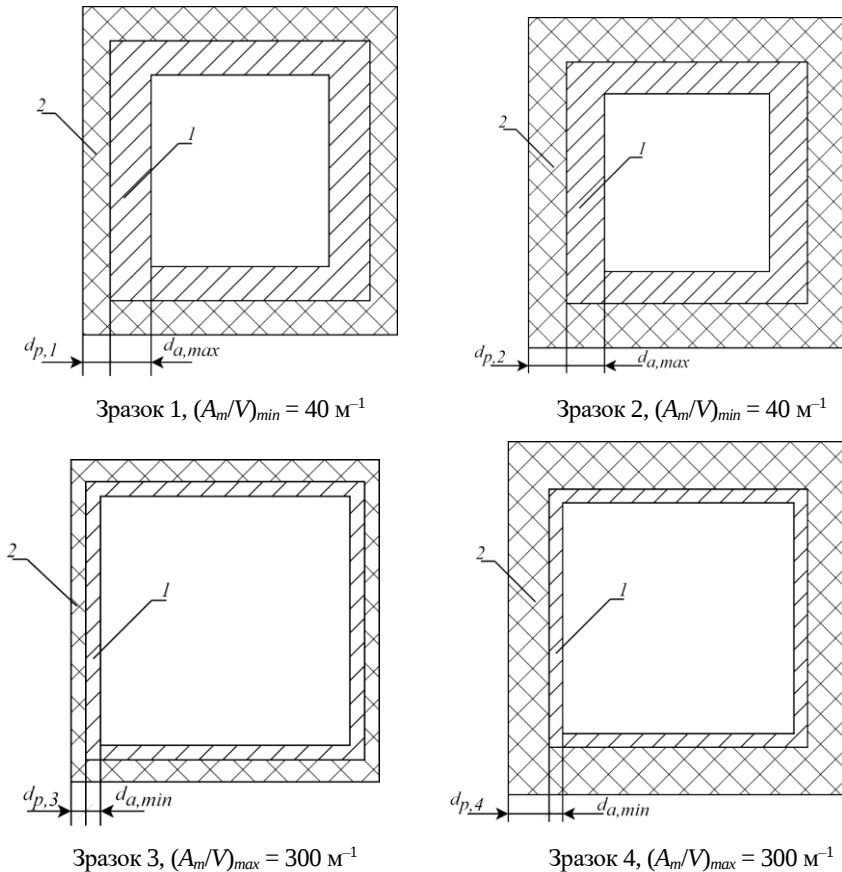


Рис. 1. Конструкція зразків сталевих конструкцій (поперечний переріз):

1 — сталеві стінки з мінімальною або максимальною товщиною ($d_{a,min} = 1/(A_m/V)_{\max} = 3,33 \text{ мм}$; $d_{a,max} = 1/(A_m/V)_{\min} = 25,0 \text{ мм}$); 2 — покриття

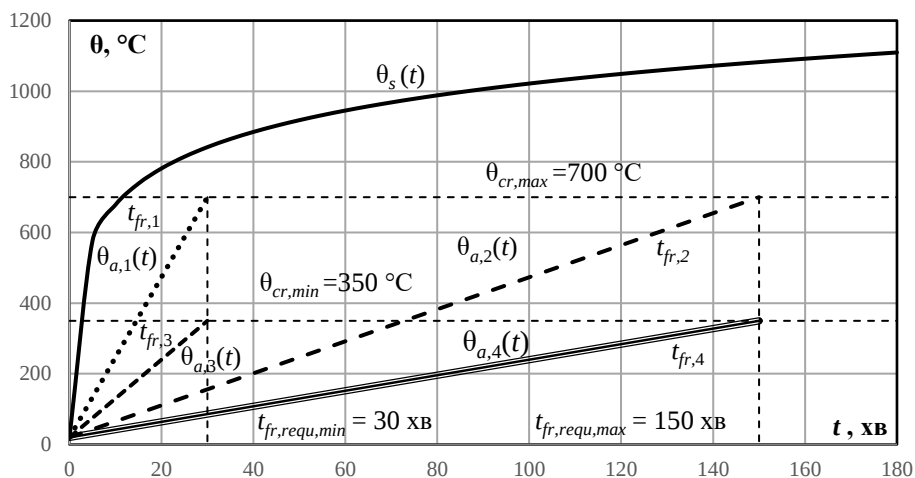


Рис. 2. Залежності температури зразків від проміжку часу впливу стандартного температурного режиму $\theta(t)$ для заданого значення регульованої величини Y_{set} об'єкта керування

Вхідна величина (управляючий параметр) X об'єкта керування — товщина покриття $d_{p,1}$, $d_{p,2}$, $d_{p,3}$, $d_{p,4}$ на зазначених вище чотирьох зразках конструкцій.

Зовнішній вплив — нормований тепловий вплив (тепловий потік) на зовнішню поверхню об'єкта керування, інтенсивність якого визначається номінальною (стандартною) температурою в печі $\theta_s(t)$.

Схему процесу керування наведено на рис. 3. Для здійснення автоматизованого керування застосовують інтелектуальну систему керування, призначену для визначення значення управляючого параметра X об'єкта керування (товщини покриття $d_{p,1}$, $d_{p,2}$, $d_{p,3}$, $d_{p,4}$), яке забезпечує максимальне наближення регульованого параметра Y (проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$) до його заданого значення Y_{set} (нормованих проміжків часу $t_{fr,requ,1}$, $t_{fr,requ,2}$, $t_{fr,requ,3}$, $t_{fr,requ,4}$). Ця система містить розрахункову модель з рівняннями (теплопровідності або регресії, залежно від застосованого розрахункового методу), яке встановлює взаємозв'язок між регульованою (вихідною) величиною об'єкта керування і його вхідною величиною (управляючим параметром).



Рис. 3. Схеми керування тепловим станом сталевих конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму

Принцип запропонованого процесу керування полягає в тому, що створюють об'єкт керування — чотири зразки сталевих конструкцій (рис. 1), які мають задані мінімальне (для зразків 1, 3) і максимальне (для зразків 2, 4) значення товщини покриття ($d_{p,1,min}$, $d_{p,2,max}$, $d_{p,3,min}$, $d_{p,4,max}$). Задавання таких значень товщини покриття обумовлене розрахунковими процедурами, поданими в трьох альтернативних методах згідно з EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. Ці значення товщини задають, зважаючи на наявну інформацію щодо здатності покриття забезпечувати належні умови експлуатації, зокрема його зчеплення з металевою поверхнею, та (або) прогнозних апріорних даних щодо залежності теплового стану сталевих конструкцій від товщини покриття. Створення цих покриттів здійснюють автоматизовано, використовуючи обладнання, призначене для нанесення матеріалів методом розпилювання. Витрату будівельного розчину через розпилювачі регулюють таким чином, щоб забезпечити відповідність фактичної товщини покриття на зразках заданим значенням. Стосовно автоматизації, то задані значення товщини покриття забезпечуються шляхом використання у зазначеному обладнанні програмних пристроїв, які надають необхідну тривалість подавання будівельного розчину через розпилювачі. Dürr Systems Karlstein GmbH та AIN розробили таке обладнання під час виконання проєкту STEELPROST DEMO, який фінансувався Комісією Європейських Співтовариств в рамках 7-ї рамкової програми. Створення покриттів на металевій поверхні конструкцій може здійснюватись іншим способом залежно від типу вогнезахисного матеріалу, застосовного для їхнього нанесення.

Створений об'єкт керування піддають зовнішньому тепловому впливу за стандартного температурного режиму в печі $\theta_s(t)$ (рис. 2) і визначають його поточне (проміжне) значення регульованого параметра — проміжки часу до досягнення критичної температури на чотирьох зразках. Це проміжне значення порівнюють із заданою величиною регульованого параметра та із застосуванням розрахункової моделі визначають кориговане значення управляючого параметра об'єкта керування — товщини покриття $d_{p,1}$, $d_{p,2}$, $d_{p,3}$, $d_{p,4}$ на чотирьох зразках. Створюють нові покриття на чотирьох зразках завтовшки $d_{p,1}$, $d_{p,2}$, $d_{p,3}$, $d_{p,4}$ (замість $d_{p,1,min}$, $d_{p,2,max}$, $d_{p,3,min}$, $d_{p,4,max}$). Ці зразки піддають зовнішньому тепловому впливу за стандартного температурного режиму і визначають їхні проміжки часу до досягнення критичної температури. Отримані значення проміжків часу порівнюють із заданими. Керування завершують, якщо різниця між цими проміжками часу не перевищує заданої величини.

Автоматизація зазначеного процесу керування здійснюється шляхом:

- застосування обладнання, яке забезпечує автоматизоване нанесення вогнезахисного матеріалу (будівельного розчину) методом розпилювання і створення на поверхні об'єкту керування покриттів заданої товщини;

- застосування обладнання, яке забезпечує нормований тепловий вплив на зовнішню поверхню об'єкту керування, який встановлено в піч, шляхом автоматизованого створення стандартного температурного режиму в печі згідно з умовами, поданими в EN 1363-1:2020;

- застосування обладнання, яке забезпечує автоматизоване вимірювання температури об'єкту керування із застосуванням термоелектричних перетворювачів (термопар), аналого-цифрових перетворювачів і програмного забезпечення;

- виконання розрахункових операцій із найменшим залученням оператора шляхом максимальної автоматизації процесів вводу, виводу і передавання інформації в програмному забезпеченні.

Сутність процесу керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості в умовах впливу стандартного температурного режиму полягає в:

- експериментальному визначенні регульованої (вихідної) величини (проміжків часу $t_{fr,1}, t_{fr,2}, t_{fr,3}, t_{fr,4}$) за заданого значення вхідної величини (управляючого параметра) об'єкта керування (товщини покриття $d_{p,1,min}, d_{p,2,max}, d_{p,3,min}, d_{p,4,max}$), в умовах впливу стандартного температурного режиму;

- розрахунковому визначенні системою керування коригованого значення управляючого параметра ($d_{p,1}, d_{p,2}, d_{p,3}, d_{p,4}$), яке забезпечує максимальне наближення регульованого параметра ($t_{fr,1}, t_{fr,2}, t_{fr,3}, t_{fr,4}$) до його заданого значення ($t_{fr,requ,1}, t_{fr,requ,2}, t_{fr,requ,3}, t_{fr,requ,4}$);

- експериментальному визначенні поточного (проміжного) значення регульованої (вихідної) величини ($t_{fr,1}, t_{fr,2}, t_{fr,3}, t_{fr,4}$) за коригованого значення вхідної величини (управляючого параметру) об'єкта керування ($d_{p,1}, d_{p,2}, d_{p,3}, d_{p,4}$), в умовах впливу стандартного температурного режиму;

- розрахунку відхилю між поточним і заданим значеннями регульованої величини і перевіряння його відповідності допустимому значенню.

Під час керування тепловим станом сталевих конструкцій необхідно визначати значення товщини покриття на кожному зразку $d_{p,1}, d_{p,2}, d_{p,3}, d_{p,4}$, за яких при впливі стандартного температурного режиму виконуються такі умови (рис. 2):

- проміжок часу $t_{fr,1}$ до досягнення температури 700 °С, яка відповідає максимальному значенню критичної температури $\theta_{cr,max}$, на зразку 1 дорівнює мінімальному нормованому проміжку часу збереженості несучої здатності сталевих конструкції $t_{fr,requ,min} = 30$ хв;

- проміжок часу $t_{fr,2}$ до досягнення температури 700 °С, яка відповідає максимальному значенню критичної температури $\theta_{cr,max}$, на зразку 2 дорівнює максимальному нормованому проміжку часу збереженості несучої здатності сталевих конструкції $t_{fr,requ,max} = 150$ хв;

- проміжок часу $t_{fr,3}$ до досягнення температури 350 °С, яка відповідає мінімальному значенню критичної температури $\theta_{cr,min}$, на зразку 3 дорівнює мінімальному нормованому проміжку часу збереженості несучої здатності сталевих конструкції $t_{fr,requ,min} = 30$ хв;

- проміжок часу $t_{fr,4}$ до досягнення температури 350 °С, яка відповідає мінімальному значенню критичної температури $\theta_{cr,min}$, на зразку 4 дорівнює максимальному нормованому проміжку часу збереженості несучої здатності сталевих конструкції $t_{fr,requ,max} = 150$ хв.

З урахуванням невизначеності (похибки) вимірювання проміжків часу $t_{fr,1}, t_{fr,2}, t_{fr,3}, t_{fr,4}$, зазначені вище умови можна подати таким чином:

$$\delta_{t,1} \leq \delta_{t,permis}; \quad (1)$$

$$\delta_{t,2} \leq \delta_{t,permis}; \quad (2)$$

$$\delta_{t,3} \leq \delta_{t,permis}; \quad (3)$$

$$\delta_{t,4} \leq \delta_{t,permis}, \quad (4)$$

де $\delta_{t,permis}$ — допустимий відхил проміжку часу до досягнення критичної температури, %; $\delta_{t,1}$, $\delta_{t,2}$, $\delta_{t,3}$, $\delta_{t,4}$ — відхили проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ від нормованих (заданих) проміжків часу $t_{fr,requ,1}$, $t_{fr,requ,2}$, $t_{fr,requ,3}$, $t_{fr,requ,4}$ збереженості несучої здатності сталевій конструкції, %, які розраховують за такими формулами:

$$\delta_{t,1} = 100(t_{fr,1} - t_{fr,requ,min}) / t_{fr,requ,min}; \quad (5)$$

$$\delta_{t,2} = 100(t_{fr,2} - t_{fr,requ,max}) / t_{fr,requ,max}; \quad (6)$$

$$\delta_{t,3} = 100(t_{fr,3} - t_{fr,requ,min}) / t_{fr,requ,min}; \quad (7)$$

$$\delta_{t,4} = 100(t_{fr,4} - t_{fr,requ,max}) / t_{fr,requ,max}. \quad (8)$$

З урахуванням вищезазначеного, сутність процедури керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх покривів полягає в:

- експериментальному визначенні проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ до досягнення критичних температур 350 °C і 700 °C на чотирьох зразках конструкцій, які мають різну комбінацію значень товщини покриву ($d_{p,min}$, $d_{p,max}$) і коефіцієнта поперечного перерізу ($(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$, $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$), в умовах впливу на них стандартного температурного режиму;

- розрахунку відсоткових відхилів $\delta_{t,1}$, $\delta_{t,2}$, $\delta_{t,3}$, $\delta_{t,4}$ цих проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ від нормованих проміжків часу збереженості несучої здатності сталевій конструкції ($t_{fr,requ,min} = 30 \text{ хв}$, $t_{fr,requ,max} = 150 \text{ хв}$) і перевірянні відповідності цих відхилів критерію прийнятності (допустимому значенню $\delta_{t,permis}$);

- розрахунку за модифікованим методом коригованих значень товщини покриву $d_{p,calc,1}$, $d_{p,calc,2}$, $d_{p,calc,3}$, $d_{p,calc,4}$ на зазначених вище чотирьох зразках конструкцій з різним коефіцієнтом поперечного перерізу ($(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$, $(A_m/V)_{max} = 300 \text{ м}^{-1}$), які максимально наближені до дійсних значень мінімальної товщини покриву $d_{p,ac,1}$, $d_{p,ac,2}$, $d_{p,ac,3}$, $d_{p,ac,4}$, за якими для проміжків часу 30 хв і 150 хв досягаються критичні температури 350 °C і 700 °C;

- експериментальному визначенні проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ до досягнення критичних температур 350 °C і 700 °C на зазначених вище чотирьох зразках конструкцій, які мають кориговані значення товщини покриву $d_{p,calc,1}$, $d_{p,calc,2}$, $d_{p,calc,3}$, $d_{p,calc,4}$, і перевірянні відповідності їхніх відхилів $\delta_{t,1}$, $\delta_{t,2}$, $\delta_{t,3}$, $\delta_{t,4}$ від нормованих проміжків часу збереженості несучої здатності сталевій конструкції критерію прийнятності (допустимому значенню $\delta_{t,permis}$).

За отриманими результатами визначають діапазон відхилу розрахункових від дійсних значень теплових показників покриву [$\delta_{d,min}$, $\delta_{d,max}$] і оптимальні параметри розрахункової моделі в модифікованому методі, які відповідають критерію прийнятності.

На рис. 4 подано схематичне зображення процедури керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх покривів.

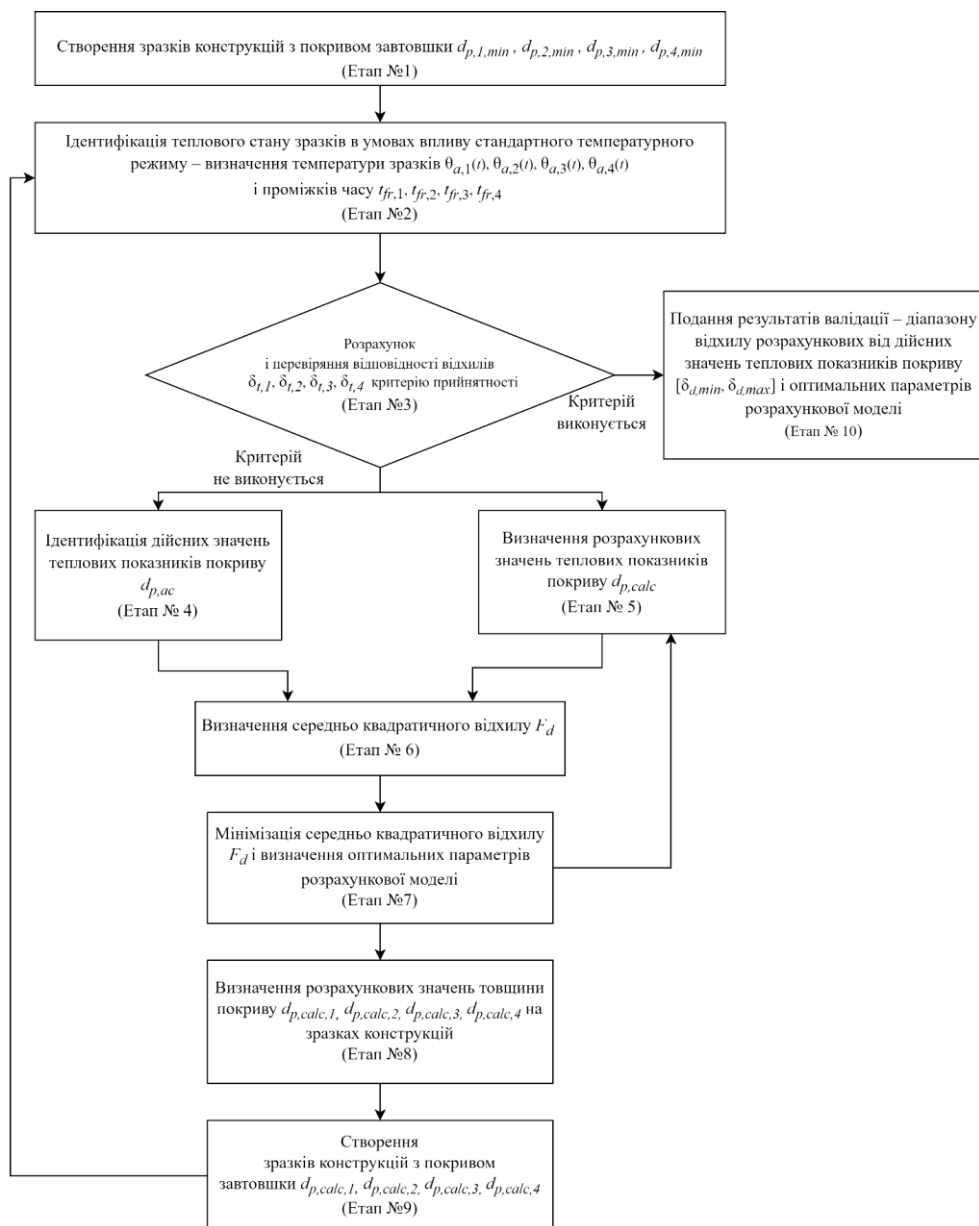


Рис. 4. Схематичне зображення процедури керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості

Розглядається система підтримки прийняття рішень для реалізації функцій керування.

На першому етапі створюють чотири зразки сталевих конструкцій (колон) заввишки 1,0 м, які мають мінімальне $(A_m/V)_{min} = 40 \text{ м}^{-1}$ і максимальне $(A_m/V)_{max} =$

300 м⁻¹ значення коефіцієнта поперечного перерізу (рис. 1). На зразки 1, 3 наносять покрив, який має мінімальну товщину $d_{p,min}$, а на зразки 2, 4 — покрив з максимальною товщиною $d_{p,max}$. На металеву поверхню зразків (під шаром покриття) посередині їх висоти з кожного боку встановлюють термоелектричні перетворювачі (термопари типу К).

На наступному етапі ці зразки у вертикальному положенні встановлюють у піч, піддають впливу стандартного температурного режиму, який відповідає номінальній залежності (9) і допустимим відхилам від неї, поданим в EN 1363-1:2020, і здійснюють ідентифікацію їхнього теплового стану. На цьому етапі визначають експериментальні дані щодо температури зразків $\theta_{a,1}(t)$, $\theta_{a,2}(t)$, $\theta_{a,3}(t)$, $\theta_{a,4}(t)$ і проміжки часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ до досягнення критичних температур $\theta_{cr,min} = 350$ °C і $\theta_{cr,max} = 700$ °C.

$$\theta_s = 345lg(8t + 1) + 20, \quad (9)$$

де θ_s — номінальна (стандартна) температура в печі, °C; t — проміжок часу, який відраховують від початку впливу стандартного температурного режиму (початку нагрівання), хв.

На третьому етапі за формулами (5)—(8) розраховують відхили проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ від нормованих (заданих) проміжків часу $t_{fr,requ,1}$, $t_{fr,requ,2}$, $t_{fr,requ,3}$, $t_{fr,requ,4}$, а за формулами (1)—(4) перевіряють виконання умов (критерію) щодо їх допустимого відхилу.

Якщо цей критерій не виконується, то на наступному етапі за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків $\theta_{a,1}(t)$, $\theta_{a,2}(t)$, $\theta_{a,3}(t)$, $\theta_{a,4}(t)$ шляхом застосування валідованого розрахункового методу, який наведено в праці (Круковський, Новак, Поклонський, Єременко, & Фролов, 2021) і містить точну диференційну математичну теплову модель, подану в (Новак, Дріжд, Добростан, & Новак, 2022), здійснюють ідентифікацію дійсних (умовно точних) значень теплових показників покриття $d_{p,ac}$. Ці розрахунки виконують за номінальної температури в печі θ_s , номінальної початкової температури зразків $\theta_{a,ном}$, яка становить 20 °C, діапазонів коефіцієнта поперечного перерізу сталевих конструкцій A_m/V від 40 м⁻¹ до 300 м⁻¹ (з кроком 10 м⁻¹) і критичної температури θ_{cr} від 350 °C до 700 °C (з кроком 50 °C), а також за значень нормованого проміжку часу $t_{fr,requ}$, які складають 30 хв, 60 хв, 120 хв і 150 хв.

На п'ятому етапі за отриманими експериментальними даними щодо температури зразків $\theta_{a,1}(t)$, $\theta_{a,2}(t)$, $\theta_{a,3}(t)$, $\theta_{a,4}(t)$, використовуючи розрахункову процедуру і модель, наведені в модифікованому методі, який валідують, визначають розрахункові значення теплових показників покриття $d_{p,calc}$. Під час цих розрахунків використовують математичну модель, яка містить одномірне скінченно-різницеve рівняння теплопровідності або рівняння лінійної регресії, подані в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013. На цьому етапі визначають значення параметрів моделі (коефіцієнтів теплопровідності покриття або регресії), які задовольняють умови, подані в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013:

- для кожного з чотирьох зразків (рис. 1) жодне розраховане за математичною моделлю значення проміжку часу t_{calc} до досягнення критичної температури (від $\theta_{cr,min} = 350$ °C до $\theta_{cr,max} = 700$ °C, з кроком 50 °C) не перевищує відповідного експериментального значення t_{exp} більше ніж на $P_1 = 15\%$;

- більшим за нуль є менше ніж $P_2 = 30\%$ окремих значень усіх відсоткових відмінностей t_{calc} від t_{exp} .

Значення параметрів моделі, що задовольняють цим умовам, використовують для розрахунків товщини покритву $d_{p,calc}$, які здійснюють за тих же нормованих параметрів $(\theta_s, \theta_{a,nom}, A_m/V, \theta_{cr}$ і $t_{fr,requ})$, що й на попередньому етапі під час визначення дійсної товщини $d_{p,ac}$.

На наступному етапі за формулою (10) визначають середньо квадратичний відхил F_d розрахункових значень теплових показників покритву $d_{p,calc}$ від їхніх дійсних величин $d_{p,ac}$:

$$F_d = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_{di})^2}, \quad (10)$$

де n — кількість визначених значень $d_{p,calc}$; δ_d — відсотковий відхил розрахункового значення товщини покритву $d_{p,calc}$ від її дійсної величини $d_{p,ac}$, %, який розраховують за такою формулою:

$$\delta_d = 100(d_{p,calc} - d_{p,ac}) / d_{p,ac}. \quad (11)$$

На цьому етапі здійснюють мінімізацію середньо квадратичного відхилю F_d і визначають такі значення (оптимальні) параметрів моделі, за яких цей відхил має найменшу величину. Під час цієї мінімізації також визначають відповідні кориговані значення розрахункових теплових показників $d_{p,calc}$ і кориговані величини параметрів P_1 і P_2 у вищенаведених умовах щодо відмінностей t_{calc} від t_{exp} .

На наступному етапі за отриманими коригованими розрахунковими величинами теплових показників $d_{p,calc}$ визначають значення товщини покритву $d_{p,calc,1}$, $d_{p,calc,2}$, $d_{p,calc,3}$, $d_{p,calc,4}$ на чотирьох зразках конструкцій (рис. 1) для проміжку часу 30 хв (для зразків 1 і 3) і 150 хв (для зразків 2 і 4) та критичної температури 350 °C (для зразків 3 і 4) і 700 °C (для зразків 1 і 2).

На дев'ятому етапі створюють чотири зразки конструкцій, ідентичні тим, які застосовували на першому етапі, з покритвом завтовшки $d_{p,calc,1}$, $d_{p,calc,2}$, $d_{p,calc,3}$, $d_{p,calc,4}$.

Ці зразки у вертикальному положенні встановлюють у піч, піддають впливу стандартного температурного режиму, здійснюють ідентифікацію їхнього теплового стану, перевіряють виконання критерію щодо його допустимого відхилю (1)—(4). У разі виконання цього критерію наводять отримані результати валідації — діапазон відхилю розрахункових від дійсних значень теплових показників покритву $[\delta_{d,min}, \delta_{d,max}]$ і оптимальні параметри розрахункової моделі (коефіцієнтів теплопровідності покритву або регресії, а також P_1 і P_2) (етап № 10). Якщо ці умови не виконуються, то здійснюють четвертий і наступні етапи.

Слід зазначити, що у запропонованій процедурі об'єктом керування є зразки порожнистих сталевих конструкцій квадратного перерізу, але вона є придатною і для інших типів сталевих конструкцій, які наведено в EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013, зокрема для конструкцій двотаврового перерізу. У цьому разі іншими будуть лише конструкція і параметри зразків.

Для практичної реалізації зазначеної вище процедури керування необхідно розв'язати такі завдання:

а) створити алгоритмічне і програмне забезпечення для автоматизації процесів ідентифікації теплового стану зразків конструкцій і валідації модифікованих ме-

тодів визначення теплових показників покривів сталевих конструкцій, призначених для будівель харчової промисловості;

б) обґрунтувати значення або процедуру визначення допустимого відхилення $\delta_{t,permis}$ проміжку часу до досягнення критичної температури, з урахуванням можливих впливів відхилення фактичного від номінального температурного режиму в печі й відхилення фактичної від номінальної початкової температури зразків на значення проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ до досягнення критичних температур 350 °C і 700 °C. Стандартами EN 13381-4:2013, EN 13381-8:2013 і EN 1363-1:2020 допускаються відхилення фактичного від номінального температурного режиму в печі до 15%, а фактичної від номінальної початкової температури зразків — до 100%. Результати досліджень (Новак, Дріжд, Добростан, & Новак, 2022; Новак, Новак, & Пустовий, 2023) підтверджують, що ці відхилення можуть суттєво впливати на тепловий стан сталевих конструкцій і через це їх необхідно враховувати під час оцінювання проміжків часу до досягнення критичної температури;

в) провести верифікацію запропонованої процедури керування зі створеним програмним забезпеченням шляхом застосування методів імітаційного і натурального експериментів. У цьому імітаційному експерименті ідентифікацію теплового стану чотирьох зразків конструкцій (температур $\theta_{a,1}(t)$, $\theta_{a,2}(t)$, $\theta_{a,3}(t)$, $\theta_{a,4}(t)$) і проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ до досягнення критичних температур 350 °C і 700 °C здійснювати шляхом розв'язання прямої задачі теплопровідності з використанням заданих (відомих, умовно точних) теплофізичних властивостей покриву. Під час проведення імітаційного експерименту для врахування можливих впливів відхилення фактичної температури в печі від номінального температурного режиму і відхилення фактичної від номінальної початкової температури зразків на значення температур $\theta_{a,1}(t)$, $\theta_{a,2}(t)$, $\theta_{a,3}(t)$, $\theta_{a,4}(t)$ і проміжків часу $t_{fr,1}$, $t_{fr,2}$, $t_{fr,3}$, $t_{fr,4}$ до досягнення критичних температур 350 °C і 700 °C розв'язання прямої задачі теплопровідності здійснювати за номінальними і гранично допустимими значеннями температурного режиму в печі і початкової температури зразків. Натурний експеримент здійснювати із застосуванням обладнання, яке забезпечує автоматизоване створення стандартного температурного режиму в печі згідно з умовами, визначеними в EN 1363-1:2020, і автоматизоване вимірювання температури зразків сталевих конструкцій.

Висновки

Обґрунтовано застосування модифікованих методів зі зменшеною кількістю випробних зразків порівняно з EN 13381-4:2013 і EN 13381-8:2013 з метою зниження витрат на їх створення і випробування для визначення теплових показників покривів, призначених для вогнезахисту сталевих конструкцій будівель харчової промисловості.

Сформульовано задачу валідації цих модифікованих методів як задачу автоматизованого керування тепловим станом зазначених конструкцій в умовах впливу стандартного температурного режиму згідно з EN 1363-1:2020.

Розроблено процедуру автоматизованого керування тепловим станом сталевих конструкцій будівель харчової промисловості на основі валідації модифікованих методів визначення теплових показників їхніх покривів, яка дає змогу визначати

діапазон відхилу розрахункових від дійсних значень цих показників та оптимальні параметри в розрахунковій моделі, а також є прийнятною для забезпечення автоматизації експериментальних і розрахункових операцій.

Окреслено завдання, які необхідно розв'язати для практичної реалізації зазначеної процедури керування, пов'язані зі створенням алгоритмічного і програмного забезпечення, обґрунтуванням значення або процедури визначення допустимого відхилу проміжку часу до досягнення критичної температури, верифікацією процедури керування зі створеним програмним забезпеченням шляхом застосування методів імітаційного і натурального експериментів.

Визначено напрями подальших досліджень, орієнтовані на виявлення впливів відхилу фактичного від номінального температурного режиму в печі й відхилу фактичної від номінальної початкової температури зразків на значення проміжку часу до досягнення критичної температури сталевих конструкцій та розроблення методики проведення імітаційних і натурних експериментів для верифікації запропонованої процедури керування.

Література

Круковський, П., Новак, С., Поклонський, В., Єременко, С., Фролов, Г. (2021). *Оцінка вогнестійкості металевих будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів (розрахунково-експериментальний підхід)* (російською мовою). Київ: Франко Пак.

Новак, М., Харкянен, О. (2024). Автоматизація процесу валідації методів визначення теплових показників вогнезахисних покривів на конструкціях будівель харчової промисловості. *Наукові праці НУХТ*, 30(3), 7—21. doi: 10.24263/2225-2924-2024-30-3-3.

Новак, С., Дріжд, В., Добростан, О., Новак, М. (2022). Вплив теплофізичних властивостей вогнезахисних матеріалів на тепловий стан сталевих колон за стандартного температурного режиму. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, № 1(13), 88—110. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.1.88-110>.

Новак, С., Новак, М., Пустовий, М. (2023). Вплив відхилу температури в печі від номінального режиму на результати випробування сталевих конструкцій на вогнестійкість. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(16), 88—104. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.88-104>.

Новак, С., Добростан, О., Пустовий, М. (2023). Визначення проміжку часу збереженості вогнестійкості несучих сталевих конструкцій з різною початковою температурою. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2(16), 4—21. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.2.4-21>.

Archambeault, B., Connor, S. (2008). Proper model validation is important for all EMI/EMC applications. *Proc. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC 2008* (pp. 1—8). doi: 10.1109/ISEMC.2008.4652152.

Bula, S., Boiko, R., Lysiuk, S., Kurtyak, Y., Fall, Y. (2014). Analysis and implementation of new models of fire furnaces. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*, 781, 20—26.

Chaturvedi, S., Vedrtam, A., Youssef, M., Palou, M., Barluenga, G., Kalauni, K. (2023). Fire-resistance testing procedures for construction elements — a review. *Fire*, 6(1), 5. <https://doi.org/10.3390/fire6010005>.

Keltner, N., Nash, L., Beitel, J., Parker, A., Welsh, S., Gilda, B. (2003). Fire safety test furnace characterization unit. *ASTM eBooks*, 128—146. doi: 10.1520/STP10952S.

Mentsiev, A., Mutaev, I. (2020). Automation and control of thermal processes in the furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 734, 012212. doi:10.1088/1757-899X/734/1/012212.

Oktiawati, U., Alfata, M., Fahmizal Rahayu, S., Ridwan, A., Kusuma, D., Vidia, C. (2021). Development of monitoring system of furnace temperature for fire resistance test. *Conference: 2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*. doi:

10.1109/ICECCE52056.2021.9514091.

Paquette-Rufiange, A., Prudhomme, S., Laforest, M. (2023). Optimal design of validation experiments for the prediction of quantities of interest. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 414. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.116182>.

Pozdieiev, S., Nizhnyk, V., Feshchuk, Y., Nekora, V., Nuianzin, O., Shnal, T. (2021). Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(112)), 34—40. doi:10.15587/1729-4061.2021.239235.

Sultan, M., Séguin, Y., Latour, J., Leroux, P., Henrie, J. (2006). Intermediate-scale furnace: a new fire resistance test facility at the National Research Council Canada. *Research Report (National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction)*, no. RR—213 (1 January 2006). 19. doi:10.4224/20377352.

Zambaldi, E., Magalhaes, R., Barbosa, B., Silva, S., Ferreira, D. (2017). Lowcost automated control for steel heat treatments. *Applied Thermal Engineering*, 114, 163—169. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.177>.