

УДК 614.841.332

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.100.118>

Андрій КОВАЛЬОВ¹, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
(ORCID: 0000-0002-6525-7558),

Максим БОНДАРЕНКО², доктор технічних наук, професор
(ORCID: 0000-0002-5927-0326),

Петро ЗАЙКА¹, кандидат технічних наук, доцент (ORCID: 0000-0002-6949-4710),

¹Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля

Національного університету цивільного захисту України,

²Черкаський державний технологічний університет

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ ВОГНЕЗАХИЩЕНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розроблено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, яка включає в себе виконання таких етапів: вибір апарату формалізації, побудова зовнішнього опису, перевірка працездатності моделі, побудова внутрішнього стану, перевірка працездатності та ідентифікація параметрів. Сформульовані початкові та граничні умови при побудові зазначених моделей, які дозволяють з достатньою для інженерних розрахунків точністю прогнозувати вогнестійкість вогнезахисної залізобетонної конструкції. На основі розробленої математичної моделі розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Розглянуто алгоритм застосування запропонованого методу, надано опис процедур його реалізації. Використовуючи метод, можливо оцінювати вогнестійкість як незахищених, так і вогнезахисних залізобетонних конструкцій, враховувати властивості матеріалу конструкції та матеріалу вогнезахисного покриття. Алгоритм оцінювання включає виконання експериментальних та розрахункових процедур при визначенні вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Перевірено працездатність запропонованого методу при виявленні взаємозв'язку між параметрами пасивного вогнезахисного штукатурного покриття та вогнестійкістю вогнезахисного багатопустотного залізобетонного перекриття.

Розроблено структурно-логічну схему забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі запропонованої математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість, метод оцінювання вогнестійкості, вогнезахисні покриття, вогнезахисні будівельні конструкції, температурні режими пожежі, теплофізичні характеристики.

Постановка проблеми. Забезпечення пожежної безпеки є одним із важливих напрямків щодо охорони життя та здоров'я людей, національного багатства і навколишнього середовища. Незважаючи на значний прогрес у науково-технічній сфері, людству ще не вдалося знайти абсолютно надійних засобів щодо забезпечення пожежної безпеки об'єктів. Більше того, статистика свідчить, що при зростанні чисельності населення на 1 %, кількість пожеж збільшується приблизно на 5 %, а збитки від них зростають на 10 %. Сьогодні, коли людство живе в третьому тисячолітті своєї багатовікової історії, питання пожежної безпеки залишаються актуальними.

Оскільки залізобетонні конструкції часто не задовольняють вимогам пожежної безпеки щодо нормованих значень їх межі вогнестійкості, то актуальним є забезпечення та підвищення вогнестійкості таких конструкцій шляхом їх вогнезахисту із використанням різноманітних речовин та матеріалів. При проектуванні вогнезахисту таких конструкцій гостро постає питання щодо точності розрахунку теплового стану як захищених, так і незахищених залізобетонних конструкцій. Результати розрахунку значною мірою визначаються точністю задавання параметрів моделі, що забезпечують її адекватність реальним процесам теплообміну при випробуваннях на вогнестійкість. До таких параметрів відносяться теплофізичні характеристики: коефіцієнт теплопровідності, питома об'ємна теплоємність як бетону, так і вогнезахисного покриття. Не менш значимими параметрами є умови випробувань (кількість зразків, значення середньооб'ємної температури та вологості у випробувальній камері), які потрібно забезпечувати під час процесу визначення ефективності покриттів.

Саме тому створення основ ефективного оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Розрахунок будівельних конструкцій на вогнестійкість включає теплотехнічну та статичну частини. Теплотехнічна частина полягає в розрахунку полів температур у перерізі конструкції, що змінюються в часі при впливі пожежі. Статична частина розрахунку на вогнестійкість полягає у визначенні втрати конструкціями своєї несучої здатності внаслідок зміни механічних властивостей матеріалів. Існуючий світовий досвід випробувань на вогнестійкість залізобетонних конструкцій показує, що за різних умов конструкції з вищими механічними характеристиками зазвичай мають вищий показник вогнестійкості [1].

В [2] представлені результати оціночних розрахунків, що дозволяють передбачити використання згинальних залізобетонних елементів з дисперсними волокнами в умовах підвищених температур залежно від відсотка арматури та від навантаження. Проте, залишилися невирішеними питання поведінки згинальних залізобетонних елементів в умовах пожежі з використанням вогнезахисних покриттів з науково обґрунтованими параметрами для підвищення меж вогнестійкості конструкцій.

В [3] змодельовані залізобетонні конструкційні елементи та проведено термічний аналіз з використанням пакету ABAQUS. Проведено порівняння результатів досліджень з урахуванням впливу граничних умов, температури, конвекції та випромінювання. Встановлено, що задавання конвективних і радіаційних граничних умов надало можливість отримати більш точні результати. Використання теплових характеристик згідно з Eurocode 2 (врахування емісії вологи) дозволило зменшити розбіжності між розрахунковими та експериментальними температурами. Незважаючи на практичну значимість таких результатів, не розглянуті в достатній мірі питання щодо моделювання теплового стану вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

В [4] наведені результати оцінювання вогнестійкості збірних залізобетонних балок-колон, які з'єднуються по торцям з залізобетонними плитами і поєднуються у збірну залізобетонну каркасну конструкцію. Для перевірки точності побудованої моделі використовувався тільки обчислювальний експеримент при оцінюванні вогнестійкості конструкцій, що розглядаються, але без системи вогнезахисту. Це накладає обмеження на використання моделі в каркасних конструкціях вогнезахисних залізобетонних конструкцій з науково обґрунтованими параметрами вогнезахисних покриттів.

В [5] розроблена методика щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних перекриттів. Розвинуто методологію щодо застосування підходів до розрахунку меж

вогнестійкості на основі методу кінцевих різниць. Однак такий підхід не може бути використаний для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Можливо, це може бути пов'язано з відсутністю достовірних даних щодо властивостей вогнезахисних покриттів.

В [6] надано опис теоретичних основ та основних гіпотез щодо моделювання різних типів кінцевих елементів будь-якої структури при впливі температури пожежі за допомогою програмного комплексу SAFIR. Незважаючи на практичну значимість таких результатів, не розглянуті в достатній мірі питання щодо оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Очевидно це пов'язано з труднощами побудови вогнезахисної конструкції в даному програмному комплексі і правильному задаванні параметрів вогнезахисних матеріалів.

В [7] приведені результати параметричного дослідження поведінки бетонних балок під впливом вогню. Дається уявлення про поведінку бетонних балок, що піддаються впливові теплових і механічних навантажень. Розглядаються прогини конструкцій внаслідок теплового впливу. В [8] представлені результати чисельного дослідження характеристик сталезалізобетонного композитного перекриття, що піддавалося впливу пожежі, шляхом проведення тривимірного термомеханічного аналізу з використанням програми ANSYS. Порівнюючи результати реальної пожежі з результатами чисельного моделювання встановлено точність застосування чисельних моделей для прогнозування впливу температури пожежі на поведінку конструкцій. Проте не визначено, як дану методичку можна застосовувати для вогнезахисних залізобетонних конструкцій. З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з врахуванням теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів для підвищення меж вогнестійкості залізобетонних конструкцій.

В [9] представлено розроблену комп'ютерну модель на основі методу скінчених елементів для розширеного аналізу, здатного оцінити поведінку залізобетонних конструкцій, що піддаються впливу вогню. Розрахунки проводилися в програмному комплексі NASEN, який використовується для аналізу конструкцій в умовах пожежі та дозволяє враховувати ефекти геометричної нелінійності, а також зміну властивостей матеріалу з підвищенням температури. Однак, за допомогою розробленої моделі неможливо оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Можливо, це пояснюється відсутністю достовірних даних щодо теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів.

Найбільш значних успіхів в практиці оцінювання вогнестійкості залізобетонних конструкцій досягла наукова школа, яку очолював відомий вчений Фомін С. Л. В [10] приведені дослідження розрахунку вогнестійкості залізобетонних конструкцій за уточненими і спрощеними методами за допомогою програмного комплексу ЛПА на прикладах розрахунку залізобетонних плит перекриття. Авторами розроблено метод, заснований на побудові комп'ютерних моделей в програмі ЛПА, який засновано на використанні нелінійних підходів, що базуються на основних принципах і допущеннях теорії теплопровідності, визначених принципах і допущеннях будівельної механіки, що враховують зміну механічних властивостей матеріалів від температур. Проте, в роботі не розглядаються питання щодо використання методу для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Як видно із проведеного аналізу, експериментальні методи оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій є найбільш точними і такими, що надають найбільш достовірну інформацію щодо меж вогнестійкості будівельних конструкцій в умовах їх випробувань при стандартизованих температурних режимах пожежі. Проте, поряд з перевагами, такі методи мають і достатню кількість недоліків. До таких недоліків відносяться: складність виготовлення,

підготовки і проведення випробувань на вогнестійкість великогабаритних будівельних конструкцій, великі матеріальні затрати при випробуваннях у акредитованих лабораторіях. Також до недоліків можна віднести неможливість перенесення результатів випробування однієї конструкції на конструкції всіх типорозмірів та видів, незадовільна адгезія вогнезахисного покриття до поверхні, що захищається, під час впливу пожежі, проблему збереження цілісності вогнезахисного покриття, та як наслідок, невиконання своїх захисних функцій. Все це накладає деякі обмеження на використання тільки експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій з огляду на вищеперераховані недоліки. Використання розрахункових методів оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій, порівняно з експериментальними, має ряд переваг. Переваги полягають у можливості проведення розрахунків без великих матеріальних затрат, хоча і повинні бути сертифіковані програмні продукти, які можуть коштувати дорого, та висококваліфіковані спеціалісти, що зможуть правильно і обґрунтовано задавати параметри моделі теплового та напружено-деформованого стану вогнезахисних будівельних конструкцій. Адже неточності у задаванні початкових, граничних умов та неточність у використанні математичних та фізичних моделей теплових процесів у вогнезахисних конструкціях при тепловому впливі пожежі, можуть призвести до помилкового оцінювання вогнестійкості вогнезахисних будівельних конструкцій, а відтак до прорахунків при проектуванні будівель та споруд з таких конструкцій.

Систематизація проведених досліджень дає змогу констатувати тенденцію поширення застосування розрахунково-експериментальних методів для оцінювання меж вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних будівельних конструкцій та вогнезахисної здатності покриттів для таких конструкцій. Такий метод дозволяє враховувати значення теплофізичних характеристик вогнезахисних покриттів та процеси теплообміну у конструкції в умовах впливу температурних режимів пожежі. Метод дозволяє враховувати всі вищеперераховані прорахунки та має достатню для інженерних розрахунків точність при оцінюванні меж вогнестійкості вогнезахисних конструкцій з вогнезахисними покриттями, як наукове підґрунтя для підвищення рівня забезпечення пожежної безпеки об'єктів шляхом їх вогнезахисту з унормованими параметрами.

Постановка задачі та її розв'язання.

Метою роботи є розробка розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

- розробити математичну модель та метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій;
- розробити розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій;
- розробити алгоритм застосування розробленого методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій та надати опис процедур його реалізації.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.

При розробці математичної моделі використана структурно-логічна схема, представлена на рис. 1.

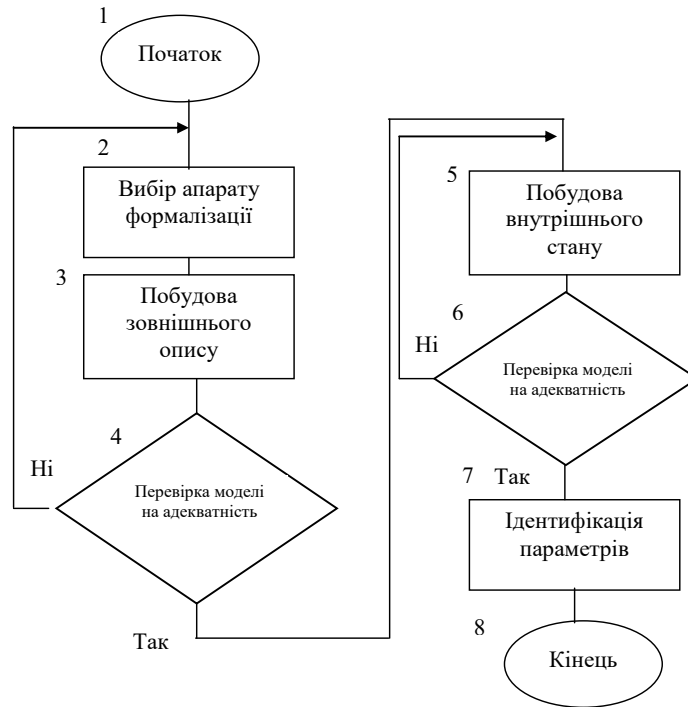


Рисунок 1. Структурно-логічна схема побудови математичної моделі

Одним з етапів створення методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисної залізобетонної конструкції є побудова адекватної моделі фізичних процесів і математичної моделі теплових процесів, що відбуваються в залізобетонних перекриттях з вогнезахисним покриттям.

При розробці математичної моделі [11] використовувалась модель фізичного процесу, як зображено на рис. 2.

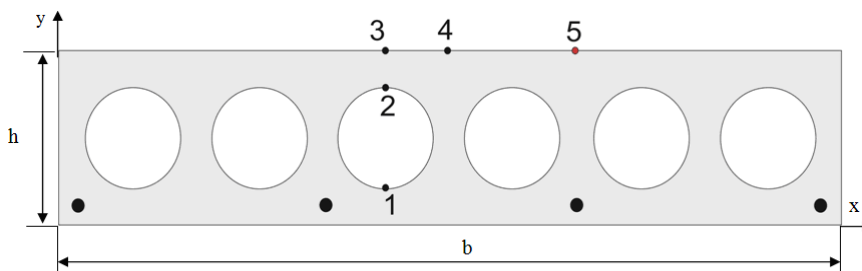


Рисунок 2. Схема залізобетонного перекриття в двохвимірній постановці: h – товщина плити; b – ширина плити; x – координата по ширині конструкції; y – координата по товщині конструкції

При випробуванні нижня поверхня перекриття нагрівається конвективно-радіаційними механізмами теплообміну від гарячих газів в печі з температурою T_{C1} , яка є близькою до кривої стандартної пожежі (або іншого альтернативного режиму пожежі), і коефіцієнтом тепловіддачі $\alpha_{c1}=25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ для стандартного температурного режиму пожежі і $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ для температурного режиму вуглеводневої пожежі. Верхня поверхня перекриття охолоджується конвекцією в навколишнє повітря з температурою T_{C2} , коефіцієнт тепловіддачі з необігрівної поверхні α_{c2} приймається залежним від температури [12].

У середині перекриття тепло передається не тільки теплопровідністю, а й конвективно-радіаційними механізмами теплообміну в порожнинах перекриття. Приймається умова ідеального теплового контакту між окремими шарами перекриття, тобто забезпечується неперервність поля температур.

При нагріванні знизу відповідна кількість теплоти теплопровідністю через нижній шар бетону по всій площі перекриття досягає пустот, прогріваючи спочатку нижню їх частину. Далі тим же механізмом теплопровідності нагріваються від низу до верху бетонні перемички з боків пустот (із значно меншою змінною площею перемичок), і далі – верхній необігрівний шар бетону знову по всій площі перекриття. Паралельно з передачею теплоти теплопровідністю по перемичках через порожнини теплова енергія передається вільною конвекцією повітря і випромінюванням від нижніх більш нагрітих до верхніх більш холодних циліндричних стінок порожнин.

Двовимірною математичною моделлю являється система рівнянь:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1)$$

рівняння руху повітря в порожнині при вільній конвекції:

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

рівняння нерозривності для повітря в порожнині:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

рівняння стану стискання газу для повітря в порожнині:

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (5)$$

рівняння радіаційного теплообміну між стінками порожнин перекриття з повітрям:

$$\frac{\partial q_r(x, y)}{\partial l} = \varepsilon \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} q_r(x, y) d\phi, \quad (6)$$

при цьому радіаційно-конвективний теплообмін з необігрівної поверхні перекриття дорівнює:

$$\alpha_{\phi TC} = 20 + 0,19 \cdot T + 0,029 \cdot C + 0,0082 \cdot \phi \cdot T - 0,0025 \cdot \phi \cdot C - 0,0005 \cdot T \cdot C - 0,001 \cdot \phi^2 - 0,001 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot C^2 \quad (7)$$

У формулі (7) $\alpha_{\text{фТС}}$, Вт/м²·°С – вперше емпірично виведений коефіцієнт теплообміну між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням відносної вологості ϕ , %, температури T , °С, та концентрації твердих домішок в повітрі C , мкг/м³, про що більш детально буде описано нижче. В (7) ϕ , T , C записані в кодованому вигляді.

умови симетрії (відсутності теплообміну) на бічних гранях періодичної частини розглянутої залізобетонної плити (рис. 3, б)

$$\frac{\partial T(0, y, t)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T(a, y, t)}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

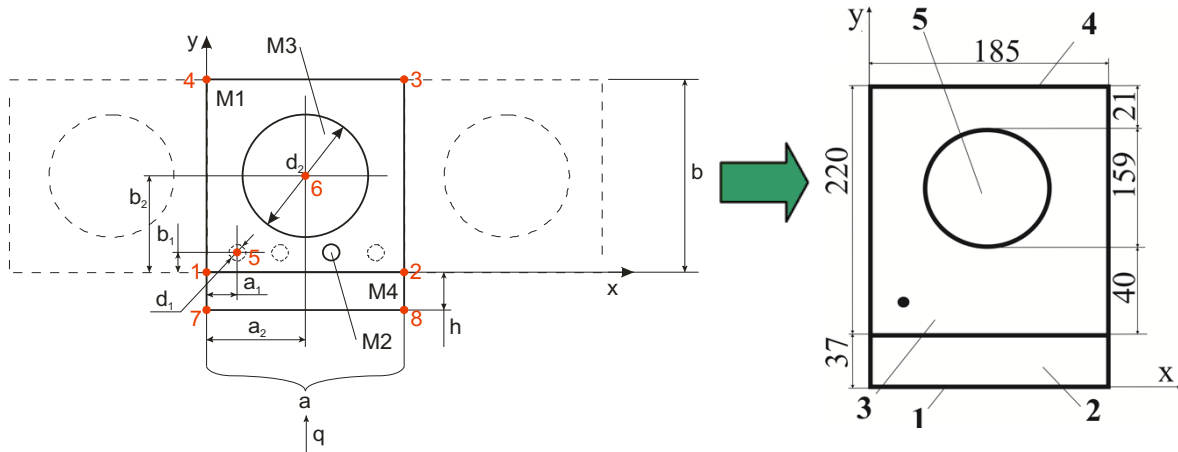


Рисунок 3. Схема періодичної частини залізобетонного перекриття для моделювання: 1 – поверхня нагріву в печі; 2 – штукатурка; 3 – бетон; 4 – необігрівна поверхня; 5 – порожнина; М1 – бетон; М2 – арматура; М3 – повітря; М4 – штукатурне покриття; а – товщина періодичної частини, а=0,185 м

В (1)–(8): t – час, с; V_x , V_y – компоненти швидкості по x та y , м/с; m/M – кількість речовини, моль; ρ – густина, кг/м³; C_p – питома теплоємність, Дж/(кг·°С); μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с; q_r – питомий радіаційний потік на поверхні порожнини з координатою x і y в напрямку l , Вт/м²; $d\phi$ – зміна кутового коефіцієнта; σ – стала Стефана-Больцмана, 5,67·10⁻⁸ Вт/(м²·К⁴); V – об'єм повітря в порожнині, м³; P – тиск повітря в порожнині, Па; g – прискорення вільного падіння, м/с²; R – універсальна газова стала, 8,31 Дж/(моль·К).

Неоднорідність (бетон, повітря в порожнинах, вогнезахисне покриття) в розглянутій моделі враховується залежностями C_v (питома об'ємна теплоємність в Дж/(м³·°С)), ρ і λ від координат x і y .

Існує два підходи у задаванні параметрів при моделюванні теплового стану та вогнестійкості як вогнезахисених, так і незахищених багатопустотних залізобетонних перекриттів: 1) задавання параметрів із нормативних документів (ДБН, ДСТУ, Єврокоди та інші довідкові джерела); 2) задавання параметрів, знайдених за результатами випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість (розв'язання обернених та прямих задач теплопровідності). Обидва підходи знайшли широке використання в практиці розрахунків стаціонарного та нестаціонарного прогріву вогнезахисених багатопустотних залізобетонних перекриттів при проектуванні, реконструкції, будівництві нових об'єктів [13].

Проте, значення межі вогнестійкості багатопустотних залізобетонних плит перекриттів, знайдені при використанні таких підходів різняться між собою, адже неточність у задаванні чи використанні таких параметрів може призвести до помилкового визначення меж вогнестійкості досліджуваних конструкцій. Зазначене може негативно вплинути на основні показники пожежної статистики: загибель та травмування людей на пожежах, кількість пожеж, кількість зруйнованих та пошкоджених будівель.

Система диференціальних рівнянь механічної рівноваги:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + X = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + Y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + Z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

де $\sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}$ – напруження на елементі поверхні $dy \cdot dz$;

$\sigma_{yx}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz}$ – напруження на елементі поверхні $dz \cdot dx$;

$\sigma_{zx}, \sigma_{zy}, \sigma_{zz}$ – напруження на елементі поверхні $dx \cdot dy$;

X, Y, Z – складові вектора об'ємної сили, віднесеної до одиниці об'єму.

У разі деформації тіла, заданої переміщеннями u_x, u_y, u_z , паралельними напрямкам осей, подовження та здвиги будуть відповідно рівні:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y}, & 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z}, & 2\varepsilon_{zx} = \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x}, \end{cases} \quad (10)$$

Якщо в тілі температура змінюється на величину T , то елемент довжини ds буде мати нову довжину $(1+\alpha T)ds$ за умови, що окремі елементи об'єму не зустрічають перешкоди при розширенні a , отже, не виникають температурні напруження внаслідок того, що частинки тіла перешкоджають взаємним змінам об'єму. Внаслідок цього виникають температурні напруження, що зумовлюють додаткові подовження та здвиги згідно з формулами класичної теорії пружності:

$$\sigma_{ik} (I, k=x, y, z). \quad (11)$$

де σ_{ik} – тензор напружень, Па; I – одиничний тензор в дев'яторному просторі k .

Повні подовження складаються з подовжень, спричинених зміною температури, та подовжень, обумовлених напруженнями:

$$\varepsilon_{ik} = \frac{1}{2G} \left[\sigma_{ik} - \frac{\mu}{1+\mu} s \delta_{ik} \right] + \alpha T \delta_{ik}. \quad (12)$$

де G – модуль здвигу, Па; δ_{ik} – одиничний тензор напружень, Па; s – дев'ятор напружень (викликає зміну форми тіла); μ – базисна (координатна, апроксимуюча) функція; α – температурний коефіцієнт напруження; T – зміна температури, К.

Математична модель термонапруженого стану (9)-(12) також інтегрується за допомогою чисельного методу скінчених елементів.

Модель (9)-(12) розглядається у формі переміщень, тобто для випадків, коли шуканою роздільною функцією служить переміщення. Така постановка аналізу термонапруженого стану залізобетонних конструкцій була обрана з міркувань того, що нелінійна залежність між напруженнями та деформаціями проявляється вже на ранніх стадіях деформацій, тобто:

$$a(u,v)=e(v)=0. \quad (13)$$

де дійсне переміщення u та будь-яке можливе переміщення v визначені на ділянці Ω і належить енергетичному простору V . Для нелінійного статичного завдання функціонал $a(u,v)$ не є лінійним за першим аргументом і передбачається безперервним.

Використовується можливість моделювання біматеріальних скінчених елементів (залізобетон) із завданням двох різних законів деформування. При розв'язанні систем нелінійних рівнянь пошук розв'язання здійснюється розв'язком рекурентної послідовності лінійних рівнянь.

Нелінійні властивості основного та армуючого матеріалів задані за допомогою експоненціальних залежностей. Арматурні включення для об'ємних елементів задані як відсоток армування.

Вираз потенційної енергії для тривимірного напруженого стану має вигляд:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \varepsilon^T \sigma d\Omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (Bu)^T D \cdot (Bu) d\Omega, \quad (14)$$

де u – вектор переміщень; ε – вектор деформацій; σ – вектор напруг; B – матриця диференціювання; D – матриця пружності, $u^T=(u_x, u_y, u_z)$; $\varepsilon^T=(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz})$; $\sigma^T=(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$.

Особливістю розроблених моделей є врахування теплофізичних характеристик залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливостей формування режимів пожежі, міцнісних та деформаційних властивостей матеріалів при впливі пожежі.

Коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\varphi T C}$ між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища (7) з урахуванням вологості φ , температури T та концентрації твердих домішок в повітрі C в останньому визначався за емпіричним рівнянням. Вхідні дані для побудови моделі представлені в табл. 1.

Таблиця 1. Вхідні дані для побудови регресійної моделі

X1, відносна вологість	X2, температура	X3, концентрація твердих домішок в повітрі	Y1, коефіцієнт теплообміну
20	0	0	19,3
25	5	5	21,9
30	10	10	23
35	15	15	24,4
40	20	20	27,9

45	25	25	30,6
50	30	30	33,3
55	35	35	35,9
60	40	40	39
65	45	45	41,5
70	50	50	46,7
75	5	55	14,9
80	10	60	16,8
20	11	61	27
25	16	66	29,5
30	21	71	30,7
35	26	76	34
40	31	81	36,2
45	36	86	38,3
50	41	91	42,7
55	46	96	45,1

Для уточнення діапазону параметрів навколишнього середовища (вологості φ , температури T та концентрації твердих домішок в повітрі C), за яких досягаються найоптимальніші показники коефіцієнта тепловіддачі, було використано метод планування багатofакторного експерименту.

В цьому методі, за відгук було обрано коефіцієнт теплообміну $\alpha_{\varphi TC}$. Незалежними змінними (факторами) були обрані: X_1 – відносна вологість (φ), X_2 – температура навколишнього середовища (T), X_3 – концентрація твердих домішок в повітрі (C) (табл. 2).

Таблиця 2. Експериментальні рівні варіювання

Фактори оптимізації	Кодоване значення факторів	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			верхній	основний	нижній
Відносна вологість, φ , %	X_1	30	80	50	20
Температура навколишнього середовища, T , °C	X_2	25	50	25	0
Концентрація твердих домішок в повітрі, C , мкг/м ³	X_3	50	100	50	0

При цьому враховувалися фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів, нормальність розподілу випадкових результатів, стійкість експерименту до перешкод, а порядок виконання досліджень не порушував ортогональність плану.

Отже, було складено план трьохфакторного експерименту. Далі, використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів оптимізації:

$$C_m = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (15)$$

де x – безрозмірна змінна ($x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta X_i}$).

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. На основному рівні проведено три паралельних експерименти, на основі яких встановлено дисперсію досліду при двох ступенях свободи $s_C^2 = 0,0052$.

За даними експерименту та з використанням методу планування багатофакторного експерименту розраховано коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі):

$$\begin{aligned} b_0 &= 20 & b_{11} &= -0,001 & b_{22} &= -0,001 & b_{33} &= 0,0015 \\ b_1 &= 0 & b_{12} &= 0,0082 & b_{23} &= -0,0005 & & \\ b_2 &= 0,19 & b_{13} &= -0,0025 & & & & \\ b_3 &= 0,029 & & & & & & \end{aligned}$$

Табличне значення t-критерію Стьюдента при 9 дослідах та рівні значимості 0,05 складало 2,26. Довірчі інтервали при розрахунку коефіцієнтів регресії, відповідно: $b_0 - 0,30$; $b_i - 0,38$; $b_{ii} - 0,28$; $b_{ij} - 0,31$.

Отримана модель залежності відносної похибки проведення контролю від трьох визначених факторів мала вигляд:

$$\alpha_{\varphi TC} = 20 + 0,19 \cdot T + 0,029 \cdot C + 0,0082 \cdot \varphi \cdot T - 0,0025 \cdot \varphi \cdot C - 0,0005 \cdot T \cdot C - 0,001 \cdot \varphi^2 - 0,001 \cdot T^2 + 0,0015 \cdot C^2 \quad (16)$$

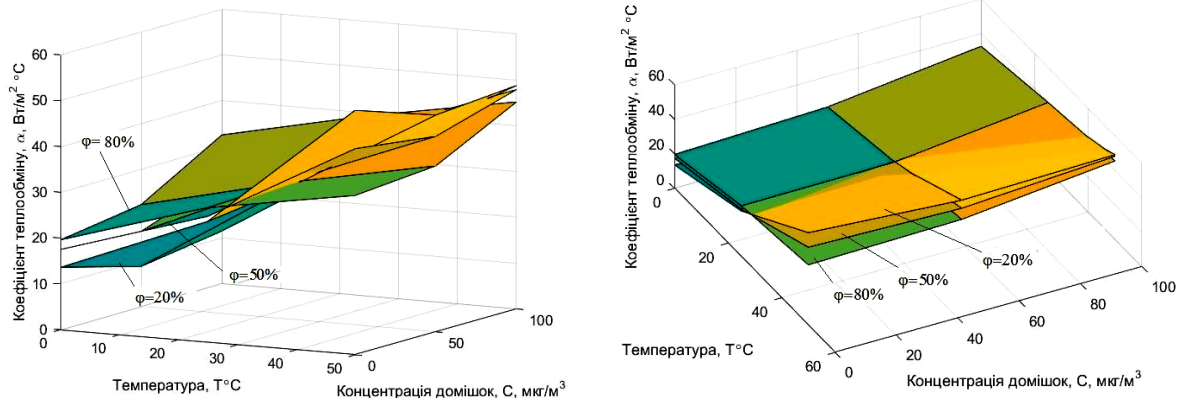


Рисунок 4 – Поверхні залежностей коефіцієнту теплообміну від температури навколишнього середовища, концентрації твердих домішок у повітрі, за різних значень відносної вологості

В результаті дослідження вищенаведеного рівняння регресії були встановлені залежності коефіцієнту теплообміну $\alpha_{\varphi TC}$ від температури навколишнього середовища (T), концентрації твердих домішок у повітрі (C) за різних значень відносної вологості (φ) (рис.4). Домішки, в залежності від марки бетону, виду вогнезахисного покриття та виду пального, що використовується для створення відповідного температурного режиму в печі, можуть бути такими: з'єднання нітрогену (NO_2), з'єднання сульфуру (SO_2), чадний газ (CO).

Як можна побачити із залежностей (рис.4), із збільшенням відносної вологості до 80%, зменшенням температури навколишнього середовища до 0 °С та концентрації у повітрі твердих домішок до 50 мкг/м³, коефіцієнт теплообміну досягає оптимальних значень $\alpha_{\text{фТС}}$ від 8,8 до 11,5 Вт/(м²·°С), що є найбільш раціональним режимом при заданих умовах. В той же час, збільшення температури навколишнього середовища до 25°С при мінімальних значеннях вологості 20%, веде до помітного збільшення значення коефіцієнту теплообміну від 27,8 до 39,5 Вт/(м²·°С).

В табл. 3 представлені результати розрахунку коефіцієнт теплообміну між необігрівною поверхнею та повітрям навколишнього середовища з урахуванням вологості ϕ , температури T та концентрації твердих домішок в повітрі C .

Таблиця 3. Результати розрахунку за регресійною моделлю

X1, відносна вологість	X2, температура	X3, концентрація твердих домішок в повітрі	Y1, коефіцієнт теплообміну експериментальний	Y1*, коефіцієнт теплообміну розрахунковий	ΔY	δY , %
20	0	0	19,3	19,6	0,347	1,77
25	5	5	21,9	21,182	-0,76	3,59
30	10	10	23	23,0	0,016	0,07
35	15	15	24,4	25,05	0,7	2,79
40	20	20	27,9	27,34	-0,515	1,88
45	25	25	30,6	29,863	-0,705	2,36
50	30	30	33,3	32,62	-0,639	1,96
55	35	35	35,9	35,613	-0,266	0,75
60	40	40	39	38,84	-0,097	0,25
65	45	45	41,5	42,303	0,831	1,96
70	50	50	46,7	46,0	-0,648	1,41
75	5	55	14,9	14,058	-0,807	5,74
80	10	60	16,8	16,8	0,018	0,11
20	11	61	27	27,338	0,392	1,43
25	16	66	29,5	29,234	-0,333	1,14
30	21	71	30,7	31,365	0,683	2,18
35	26	76	34	33,731	-0,254	0,75
40	31	81	36,2	36,332	0,137	0,38
45	36	86	38,3	39,17	0,918	2,34
50	41	91	42,7	42,239	-0,491	1,16
55	46	96	45,1	45,545	0,396	0,87

Як видно із табл. 3 середнє арифметичне значення коефіцієнту теплообміну по виборці Y1 склало 31,82, по виборці Y1* – 31,86. Дисперсія експериментальних даних склала 86,94, а розрахункових – 87,4, коефіцієнт кореляції Пірсона – 0,99. При цьому $\max \Delta Y=0,973$, $\min \Delta Y=-1,002$, $\max \delta Y=5,74\%$.

Таким чином, на основі проведеного експериментально-статистичного дослідження методом планування багатофакторного експерименту та аналізуючи

отримані залежності (рис.4), уточнено раціональні діапазони параметрів навколишнього середовища (відносної вологості, температури, концентрації твердих домішок у повітрі), при яких коефіцієнт тепловіддачі набуває найменших значень. Зі збільшенням температури, відносної вологості та концентрації твердих домішок в повітрі, коефіцієнт тепловіддачі прямує до максимуму. При зменшенні температури навколишнього середовища від 50 °С до 0 °С та концентрації твердих домішок в повітрі від 100 мкг/м³ до 0 мкг/м³, коефіцієнт тепловіддачі зменшується і досягає оптимальних значень при відносній вологості повітря 80% від 8,8 до 11,5 Вт/(м²·°С).

За оптимального значення відносної вологості 50% діапазон оптимальних значень температур знаходиться в межах 29,6–33,2°С. При цьому діапазон оптимальних значень коефіцієнта тепловіддачі складає 23,8 – 31,1 Вт/(м²·°С). Подальше збільшення температури навколишнього середовища призводить до надто великих (недопустимих) значень коефіцієнту тепловіддачі, що знаходяться за межами робочих параметрів зовнішніх умов. Вихід за рамки цього діапазону під час обрання робочих параметрів зовнішніх умов веде до великих похибок при оцінюванні вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, що суттєво (на 30%) знижує вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій, як основного матеріалу, що чинить опір тепловому впливу пожежі.

Відповідно до розробленої моделі фізичних процесів, що відбуваються в системі «залізобетонна конструкція-вогнезахисне покриття», та математичної моделі, розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій є способом аналізу, оптимізації та прогнозування процесів, що досліджуються, тепломасообміну у вогнезахисних залізобетонних конструкціях на основі комп'ютерної, чисельної (розрахункової) моделі, адекватність якої забезпечується шляхом параметричної або структурної ідентифікації за допомогою експериментальної інформації про досліджуваний процес і розв'язанні обернених задач теплопровідності. Основою методу є математична (розрахункова, чисельна) модель досліджуваного фізичного процесу, а експеримент (експериментальні дані) є допоміжною складовою, необхідною для забезпечення адекватності обраної моделі.

Основними складовими розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій є:

1. Розрахункова (комп'ютерна реалізація розробленої математичної моделі) модель фізичного процесу.

2. Експериментальні дані, необхідні для забезпечення адекватності моделі процесу.

3. Методи ідентифікації параметрів обраної моделі процесу з метою забезпечення її адекватності.

4. Отримана адекватна модель, яка в подальшому використовується для вирішення поставлених завдань аналізу, оптимізації або прогнозування досліджуваного фізичного процесу.

У підсумку розрахунково-експериментальний метод складається із компонентів, представлених на рис. 5.



Рисунок 5. Схема розрахунково-експериментального методу

При використанні розробленого методу доцільно використовувати спосіб, заснований на розв'язанні тестових задач теплопровідності. При цьому застосовується обчислювальний експеримент, що дозволяє обґрунтувати оптимальні значення параметрів складових розрахункового-експериментально методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисених залізобетонних конструкцій (оптимізація). Це може бути обґрунтування мінімальної кількості зразків залізобетонної конструкції при її випробуванні на вогнестійкість, схеми вимірювання температур у зразку та деформацій зразка, що дозволяють ідентифікувати характеристики матеріалу конструкцій і вогнезахисного покриття та параметрів, що використовуються при розв'язанні обернених задач теплопровідності. Оптимізація моделі полягає в обґрунтуванні значень параметрів складових розрахункового-експериментально методу розв'язанням тестових задач теплопровідності, в яких випробування конструкції на вогнестійкість замінюється обчислювальним експериментом. В якості критерію при оцінці оптимальності доцільно використовувати умову мінімуму середньоквадратичного відхилення розрахункових від точних значень межі вогнестійкості вогнезахисеної залізобетонної конструкції.

Як видно із рис. 5, об'єкт, що досліджується, і математична модель, яка описує основні фізичні процеси, що відбуваються в об'єкті, дозволяють отримувати відповідно експериментальну характеристику температур (T_E) і розраховувати модельну характеристику властивостей (T_M). У свою чергу ці характеристики залежать від ряду вхідних параметрів P фізичного або технологічного характеру. У нашому випадку до таких параметрів P відносяться теплофізичні характеристики бетону і вогнезахисного покриття –

теплопровідність і теплоємність. Параметри P , як правило, невідомі, і їх визначення можливе за допомогою розв'язання обернених задач теплопровідності за даними експериментальних вимірювань T_E .

Отримані розв'язанням обернених задач теплопровідності параметри P досліджуваного процесу використовувалися на основі тієї ж моделі для вирішення основних інженерних задач аналізу – оптимізації параметрів або прогнозу (рис. 5). У нашому випадку – для оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Розв'язання ж обернених задач є допоміжною процедурою, яка покликана забезпечити адекватність обраної моделі фізичним процесам, що розглядаються.

Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій зображені на рис. 6.

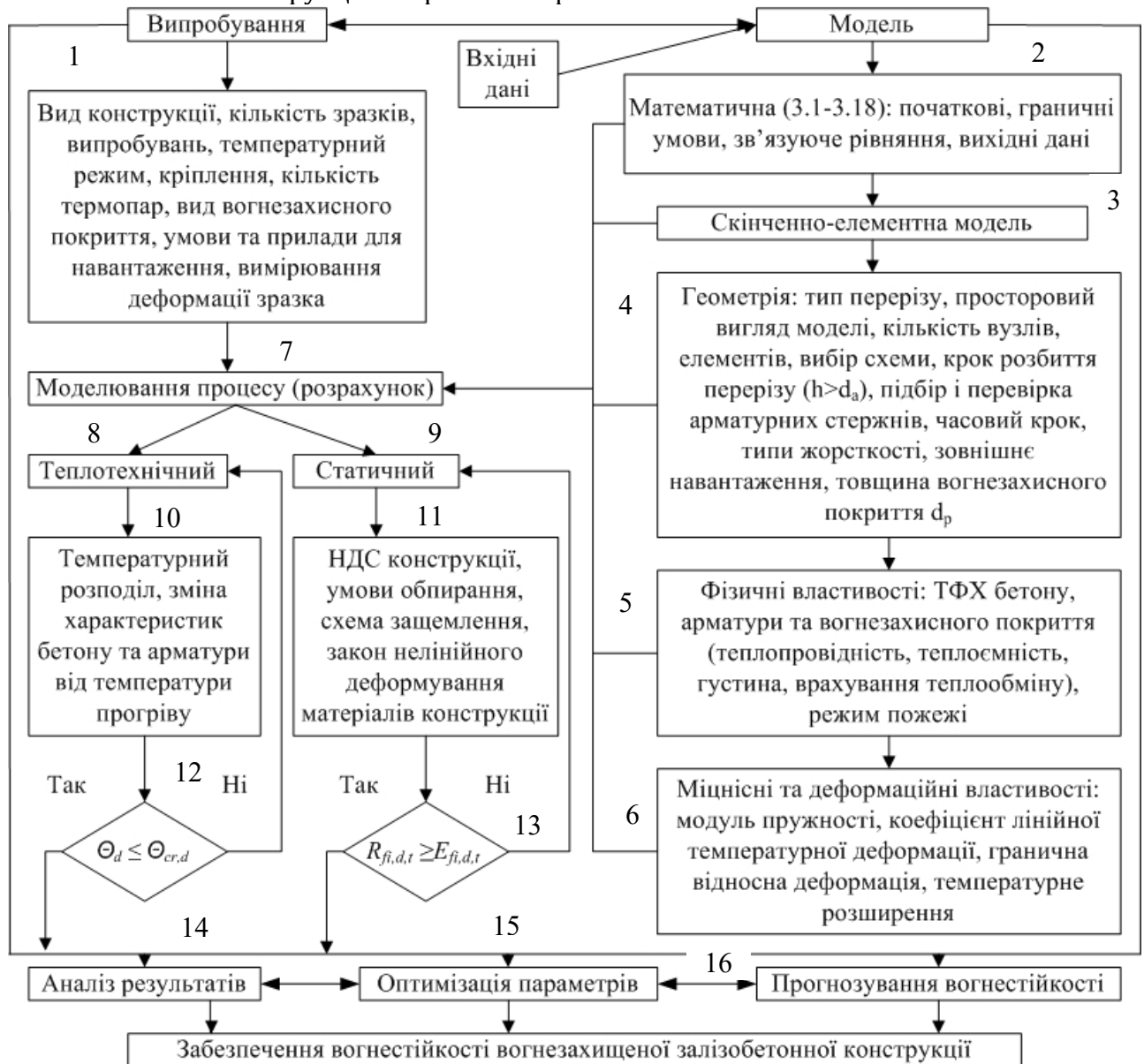


Рисунок 6. Керуючий алгоритм та процедура реалізації розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій

Структурно-логічна схема реалізації запропонованого методу передбачає 9 блоків розташованих на 5 рівнях, пов'язаних логічними зв'язками та включає експериментальну і розрахункову частини. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі (стандартний, зовнішньої, вуглеводневої, тунельної, реальної пожежі). Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу; ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань (температурні режими пожежі, умови закріплення, навантаження зразків, схему вимірювання температур, кліматичні фактори), розрахунок напружено-деформованого стану конструкції.

Висновки.

1. Розроблено математичну модель оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, яка дозволяє враховувати теплофізичні характеристики залізобетонних конструкцій та вогнезахисних покриттів, особливості формування режимів пожежі, міцнісні та деформаційні властивості матеріалів при високих температурах, нелінійні закони деформування матеріалів конструкції, кліматичні фактори. Модель дає можливість оцінювати вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій за граничними станами за ознакою втрати несучої та/або теплоізолювальної здатності.

Встановлено, що зі збільшенням відносної вологості до 80%, зменшенням температури навколишнього середовища до 0 °С та концентрації у повітрі твердих домішок до 50 мкг/м³, коефіцієнт теплообміну з не обігрівної поверхні перекриття досягає оптимальних значень від 8,8 до 11,5 Вт/(м²·°С), що є найбільш раціональним режимом при заданих умовах. В той же час, збільшення температури навколишнього середовища до 25°С при мінімальних значеннях вологості 20%, веде до збільшення значення коефіцієнту теплообміну від 27,8 до 39,5 Вт/(м²·°С).

2. Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій, який відрізняється від наявних ідентифікацією теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності за даними випробувань на вогнестійкість, визначенням мінімальної товщини вогнезахисного покриття за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при різних умовах випробувань та чинників впливу.

3. Розроблена структурно-логічна схема забезпечення вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій на основі розробленої математичної моделі та розрахунково-експериментального методу оцінювання вогнестійкості вогнезахисних залізобетонних конструкцій. Експериментальна частина методу передбачає проведення серії випробувань на вогнестійкість при заданих режимах пожежі. Розрахункова частина містить наступні обов'язкові процедури: побудову розрахункової моделі фізичного процесу (комп'ютерна, скінчено-елементна моделі); ідентифікацію за даними випробувань на вогнестійкість теплофізичних характеристик моделі на основі розв'язання обернених задач теплопровідності; визначення характеристик вогнезахисної здатності покриттів за результатами випробувань на вогнестійкість вогнезахисних залізобетонних конструкцій при

різних умовах випробувань, розрахунок напружено-деформованого стану конструкції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Determination of the influence of deflections in the thickness of a composite material on its physical and mechanical properties with a local damage to its wholeness / A. Kondratiev, V. Gaidachuk, T. Nabokina, V. Kovalenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 4. No. 1 (100). – P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174025>.
2. Vasilchenko A., Doronin E., Chernenko O., Ponomarenko I. Estimation of fire resistance of bending reinforced concrete elements based on concrete with disperse fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 708, № 012075. URL:<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078406506&doi=10.1088%2f1757-899X%2f708%2f1%2f012075&partnerID=DOI:10.1088/1757-899X/708/1/012075>.
3. Lakhani, H., Kamath, P., Bhargava, P., Sharma, U. K., & Reddy, G. R. Thermal analysis of reinforced concrete structural elements. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2013. Vol 4(4). P. 227–243. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.4.4.227>.
4. Li, S., Jiaolei, Z., Zhao, D. and Deng, L. Study on fire resistance of a prefabricated reinforced concrete frame structure. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2021. Vol. 12. № 3. P. 363–376. <https://doi.org/10.1108/JSFE-12-2020-0039>.
5. Hertz, K., Giuliani, L., & Sørensen, L. S. Fire resistance of extruded hollow-core slabs. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 324–336. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0009>.
6. Franssen, J. M., Gernay, T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
7. Walls, R., Viljoen, C. and de Clercq, H. Parametric investigation into the cross-sectional stress-strain behaviour, stiffness and thermal forces of steel, concrete and composite beams exposed to fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2020. Vol. 11. № 1. P. 100–117. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2018-0031>.
8. Mwangi, S. Why Broadgate Phase 8 composite floor did not fail under fire : Numerical investigation using ANSYS® FEA code. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8(3). P. 238–257. <https://doi.org/10.1108/JSFE-05-2017-0032>.
9. Neves, N. S. das, Camargo, R. S., & Azevedo, M. S. de. (2021). Advanced computer model for analysis of reinforced concrete and composite structures at elevated temperatures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(4). <https://doi.org/10.1590/s1983-4195202100040001>.
10. Фомин, С. Л., Плахотникова, И. А., & Парафенко, А. А. (2016). Расчет огнестойкости железобетонных плит перекрытия по уточненным и упрощенным методам. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*, (161), 145-157.
11. Kovalov A., Otrosh Y., Poklonskyi V., Semkiv O. & Tomenko M. Research of fire resistance of fire protected reinforced concrete structures. *Trans Tech Publications Ltd. In Materials Science Forum*. 2022. Volume 1066. P. 224–232.
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shchokolov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61.
13. Kovalov A., Konoval V., Khmyrova A., Dudko K. Parameters for simulation of the thermal state and fire-resistant quality of hollow-core floors used in the mining industry. *E3S Web of Conferences*. 2019. 123. 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301022>.

REFERENCES

1. Determination of the influence of deflections in the thickness of a composite material on its physical and mechanical properties with a local damage to its wholeness / A. Kondratiev, V. Gaidachuk, T. Nabokina, V. Kovalenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2019. – Vol. 4. No. 1 (100). – P. 6 – 13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174025>.
2. Vasilchenko A., Doronin E., Chernenko O., Ponomarenko I. Estimation of fire resistance of bending reinforced concrete elements based on concrete with disperse fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019. Vol. 708, № 012075. URL:<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85078406506&doi=10.1088%2f1757-899X%2f708%2f1%2f012075&partnerID=DOI:10.1088/1757-899X/708/1/012075>.
3. Lakhani, H., Kamath, P., Bhargava, P., Sharma, U. K., & Reddy, G. R. Thermal analysis of reinforced concrete structural elements. *Journal of Structural Fire Engineering.* 2013. Vol 4(4). P. 227–243. <https://doi.org/10.1260/2040-2317.4.4.227>.
4. Li, S., Jiaolei, Z., Zhao, D. and Deng, L. Study on fire resistance of a prefabricated reinforced concrete frame structure. *Journal of Structural Fire Engineering.* 2021. Vol. 12. № 3. P. 363–376. <https://doi.org/10.1108/JSFE-12-2020-0039>.
5. Hertz, K., Giuliani, L., & Sørensen, L. S. Fire resistance of extruded hollow-core slabs. *Journal of Structural Fire Engineering.* 2017. Vol. 8(3). P. 324–336. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0009>.
6. Franssen, J. M., Gernay, T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering.* 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
7. Walls, R., Viljoen, C. and de Clercq, H. Parametric investigation into the cross-sectional stress-strain behaviour, stiffness and thermal forces of steel, concrete and composite beams exposed to fire. *Journal of Structural Fire Engineering.* 2020. Vol. 11. № 1. P. 100–117. <https://doi.org/10.1108/JSFE-10-2018-0031>.
8. Mwangi, S. Why Broadgate Phase 8 composite floor did not fail under fire : Numerical investigation using ANSYS® FEA code. *Journal of Structural Fire Engineering.* 2017. Vol. 8(3). P. 238–257. <https://doi.org/10.1108/JSFE-05-2017-0032>.
9. Neves, N. S. das, Camargo, R. S., & Azevedo, M. S. de. (2021). Advanced computer model for analysis of reinforced concrete and composite structures at elevated temperatures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(4). <https://doi.org/10.1590/s1983-4195202100040001>.
10. Fomin, S. L., Plakhotnikova, I. A., & Parafenko, A. A. (2016). Raschet ognestoykosti zhelezobetonnykh plit perekrytiya po utochnennym i uproshchennym metodam. *Zbírnik naukovikh prats' Ukraïns'kogo derzhavnogo unïversitetu zalïznichnogo transportu*, (161), 145-157.
11. Kovalov A., Otrosh Y., Poklonskyi V., Semkiv O. & Tomenko M. Research of fire resistance of fire protected reinforced concrete structures. *Trans Tech Publications Ltd. In Materials Science Forum.* 2022. Volume 1066. P. 224–232.
12. Kovalov, A., Purdenko, R., Otrosh, Y., Tomenko, V., Rashkevich, N., Shcholokov, E., Pidhornyy, M., Zolotova, N., Suprun, O. (2022). Assessment of fire resistance of fireproof reinforced concrete structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (1 (119)), 53–61.
13. Kovalov A., Konoval V., Khmyrova A., Dudko K. Parameters for simulation of the thermal state and fire-resistant quality of hollow-core floors used in the mining industry. *E3S Web of Conferences.* 2019. 123. 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301022>.

Andrii KOVALOV¹, PhD (ORCID: 0000-0002-6525-7558),
Maksym BONDARENKO², Doctor of Technical Sciences, Professor
(ORCID: 0000-0002-5927-0326),

Petro ZAYIKA¹, PhD in technical sciences, docent (ORCID ID: 0000-0002-6949-4710),

¹*Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes
of National University of Civil Protection of Ukraine,*

²*Cherkasy State Technological University*

CALCULATION-EXPERIMENTAL METHOD OF ASSESSING THE FIRE RESISTANCE OF FIREPROOF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

A mathematical model for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures has been developed, which includes the following stages: selection of the formalization apparatus, construction of the external description, verification of the model's operability, construction of the internal state, verification of operability, and identification of parameters. Formulated initial and boundary conditions during the construction of the specified models, which allow predicting the fire resistance of a fire-resistant reinforced concrete structure with sufficient accuracy for engineering calculations. On the basis of the developed mathematical model, a calculation-experimental method for evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures has been developed. The algorithm of application of the proposed method is considered, a description of its implementation procedures is given. Using the method, it is possible to evaluate the fire resistance of both unprotected and fire-protected reinforced concrete structures, take into account the properties of the construction material and the material of the fire-resistant coating. The evaluation algorithm includes the implementation of experimental and calculation procedures when determining the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures. The performance of the proposed method was verified when identifying the relationship between the parameters of the passive fire-resistant plaster coating and the fire resistance of the fire-resistant multi-hollow reinforced concrete floor.

A structural and logical scheme for ensuring the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures has been developed on the basis of the proposed mathematical model and the calculation-experimental method of evaluating the fire resistance of fire-resistant reinforced concrete structures.

Key words: *fire resistance, fire resistance assessment method, fire-resistant coatings, fire-resistant building structures, fire temperature regimes, thermo physical characteristics.*