

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

ПАЗЕН ОЛЕГ ЮРІЙОВИЧ



УДК 614.841.12:539.377

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСУ В
БАГАТОШАРОВИХ ПЛОСКИХ КОНСТРУКЦІЯХ ЗА УМОВ ПОЖЕЖІ**

21.06.02 – пожежна безпека

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, **Тацій Роман Мар'янович**, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, завідувач кафедри прикладної математики і механіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор **Поздєєв Сергій Валерійович**, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, головний науковий співробітник відділу науково-дослідної роботи

кандидат технічних наук, доцент **Шналь Тарас Миколайович**, Національний університету «Львівська політехніка», доцент кафедри будівельних конструкцій та мостів

Захист відбудеться „31” березня 2016 року о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35

Автореферат розіслано „25” лютого 2016 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 35.874.01
к.т.н., доцент



В.М. Баланюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. За даними звітів «Про пожежі та їх наслідки», за останні 5 років в Україні виникло 322 тисячі 30 пожеж, унаслідок яких загинуло 13 тисяч 76 людей та знищено або пошкоджено 119 тисяч 213 будівель та споруд. Прямі збитки від пожеж склали близько 5 млрд. грн.

Аналіз наслідків цих пожеж свідчить про те, що в більшості випадків не була забезпечена вогнестійкість будівельних конструкцій через недостатню обґрунтованість прийнятих у розрахунках температурних режимів пожеж. Температурні режими пожеж визначають у середовищі навколо конструкції, а в середині конструкції, за умов пожежі, визначають нестационарні температурні поля. Отже задачі про дослідження нестационарних температурних полів у будівельних конструкціях є актуальними і сьогодні. Багатошаровими конструкціями у будівельній галузі є несучі та стіни та стіни сходових кліток, самонесучі, зовнішні не несучі, внутрішні не несучі стіни, колони, міжповерхові перекриття, елементи суміщених перекриттів (плити, настили, прогони, балки, ферми, арки, рами). Часткове або повне пошкодження несучих стін або колон може призвести до руйнування будівлі. Пошкодження або руйнування внутрішніх перегородок, стін сходових кліток, елементів міжповерхового перекриття призводить до поширення пожежі на інші приміщення (поверхи), загородження шляхів евакуації. Обвал елементів конструкції може спричинити тілесні ушкодження чи загибель людей, які перебувають у приміщенні. Тому, відповідно до вимог будівельних норм України, актуальним є забезпечення вогнестійкості багатошарових конструкцій.

Під дією високих температур у багатошарових конструкціях виникають великі температурні напруження. Відомо, що виявлення таких напружень можливе лише після розв'язку відповідних задач теплопровідності, яким присвячено ряд робіт. У таких елементах будівельних конструкцій, як несучі стіни та стіни сходових кліток, самонесучі, зовнішні не несучі, внутрішні не несучі стіни, колони, міжповерхові перекриття, за умов пожежі можливою є поява внутрішніх джерел та стоків тепла. Це пов'язане з такими фізико-хімічними процесами як випаровування вологи при нагрівання бетонних та залізобетонних конструкцій, проходження електричного струму, хімічної реакції, реакції ядерного розпаду тощо. Неврахування цих особливостей може призвести до помилкового визначення межі вогнестійкості, що вносить додатковий ризик непередбачуваної поведінки конструкцій в умовах пожежі. Тому розробка математичного апарату, що уможлиблює врахування зазначених особливостей, є суттєвим кроком у підвищенні пожежної безпеки під час експлуатації будівельних конструкцій із багатошаровими елементами.

Більшість відомих досліджень проводилась без урахування джерел тепла з використанням методів інтегральних перетворень. У разі збільшення кількості шарів до трьох і більше, обсяг обчислень цими методами стрімко зростає. При розв'язуванні задачі в образах відбувається процес диференціювання коефіцієнтів квазидиференціальних рівнянь, що неминуче призводить до проблеми множення узагальнених функцій. Однак така процедура не є обов'язковою. Її можна легко оминати шляхом використання концепції квазіпохідних. Тому математичне моделювання процесів теплопереносу в багатошарових плоских конструкціях за

умов пожежі є актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась на кафедрі прикладної математики і механіки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності відповідно до «Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012-2015 роки», затвердженої Постановою Кабінету міністрів України №590 від 27.06.2012 року, згідно з планом науково-дослідної роботи «Експериментально-аналітичні методи дослідження теплопередачі в кусково-неоднорідних структурах» (номер державної реєстрації 0114U005370) та згідно з планом науково-дослідної роботи «Аналіз пожежної небезпеки машинного залу за умови викиду водню з корпусу турбоагрегату енергоблоку №1 ВП ЗАЕС» (номер державної реєстрації 0115U001926).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка математичного апарату для розрахунку температурних полів у елементах будівельних конструкцій з багатошаровою структурою та змінною товщиною шарів, як наукового підґрунтя для розрахункової оцінки межі вогнестійкості будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності.

Для досягнення поставленої мети досліджень у роботі сформульовано такі задачі:

- створити наукове підґрунтя для розробки нового методу розв'язку стаціонарних та нестаціонарних задач теплопровідності для багатошарових плоских стінок, заснованого на модифікації методу Фур'є з ефективним застосуванням концепції квазіпохідних;
- розробити алгоритми чисельної реалізації прямого методу розв'язку стаціонарних та нестаціонарних задач теплопровідності для багатошарових плоских конструкцій;
- виконати тестові розрахунки за запропонованим методом та порівняти їх результати з відомими аналітичними результатами розв'язку тестових задач;
- провести верифікацію результатів, отриманих за запропонованим методом, при їх порівнянні з відповідними експериментальними даними щодо температурних розподілів у багатошарових елементах будівельних конструкцій під впливом пожежі;
- провести чисельні дослідження багатошарових структур зі змінною товщиною шарів на прикладі елементів будівельних конструкцій з вогнезахисними системами на основі покриттів, що вспучуються;
- вдосконалити методику розрахунку межі вогнестійкості багатошарових стін та плит за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності.

Об'єкт дослідження – нестаціонарні теплові процеси в елементах будівельних конструкцій з багатошаровою структурою за умов пожежі.

Предмет дослідження – теоретичні методи розв'язку задачі теплопровідності плоских багатошарових елементів зі змінною товщиною шарів як розрахункової бази оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети і вирішення завдань теоретичних і експериментальних досліджень використано методи математичного моделювання, основні положення теорії теплопровідності, рівнянь математичної

фізики, нестационарної теплопровідності, узагальнених квазідиференціальних рівнянь.

Аналітичні дослідження проводились шляхом використання методу редукції, концепції квазіпохідних, сучасної теорії систем лінійних диференціальних рівнянь, методу Фур'є та модифікованого методу власних функцій з активним застосуванням комп'ютерних математичних середовищ. Для розв'язування узагальнених стаціонарних задач ефективно використані експериментально-аналітичні методи, що передбачають, перед розв'язуванням відповідної крайової задачі, визначати температуру та густину теплового потоку за допомогою відповідних приладів. Для чисельної реалізації алгоритму розробленого методу застосоване комп'ютерне середовище Maple 13.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше отримано розв'язок нестационарної задачі теплопровідності на основі концепції квазіпохідних для елемента з багатошаровою структурою в умовах теплового впливу пожежі з різними температурними режимами, рекомендованими чинною нормативною базою.

2. Вперше, із використанням розробленого прямого методу, щодо розв'язку задачі нестационарної теплопровідності, досліджено розподіл температурного поля в багатошарових елементах зі змінною товщиною шару на прикладі будівельних конструкцій з вогнезахисними системами на основі покриттів, що вспучуються.

3. Удосконалено математичний апарат оцінки вогнестійкості за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності багатошарових елементів будівельних конструкцій зі змінними параметрами шарів.

4. Отримала подальший розвиток розрахункова база оцінки вогнестійкості огорожувальних елементів будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності шаруватих будівельних конструкцій з оздоблювальними, фасадними, вогнезахисними системами та іншими конструктивними особливостями на основі покриттів та штукатурок.

Практичне значення одержаних результатів. Прямий метод розрахунку температурних полів у багатошарових плоских конструкціях можна використати для дослідження нестационарних теплових процесів без застосування наближених та операційних методів. Упровадження результатів дисертаційного дослідження дозволило значно зменшити час та обсяг проведення обчислень при визначенні температурного розподілу в багатошарових конструкціях, а також підвищити точність розрахунку в порівнянні з наближеними методами. Схема запропонованого методу може бути поширеною на багатошарові циліндричні та сферичні конструкції.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на Запорізькій атомній електростанції, філії МН «Дружба» ПАТ «Укртранснафта», ТзОВ «Левадія-Проект», що підтверджується відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертаційної роботи, які лягли в основу досліджень стаціонарних та нестационарних задач теорії тепло-переносу, отримані здобувачем самостійно.

Створення нової схеми дослідження мішаних задач для рівняння теплопровідності проводилось групою науковців. Адаптація цієї схеми для випадку

конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем виконана здобувачем як сукупність самостійних досліджень. Здобувач є автором алгоритму графічно-числової реалізації явних виразів для температури та густини теплового потоку, що виникають в багатошарових плоских конструкціях при різних температурних режимах пожеж.

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, участь автора є такою: [1] – постановка та отримання розв'язку стаціонарної задачі теплопровідності в замкненій векторній формі; [2-4, 7-10] – дослідження поширення стаціонарного температурного поля за нестандартних крайових умов, умов на границі розділу шарів та неідеального теплового контакту між шарами, отримання технічних результатів; [5-6, 11] – участь у розробці прямого методу дослідження поширення нестаціонарного температурного поля, отримання технічних результатів; [6, 12-13] – дослідження поширення нестаціонарного температурного поля в багатошарових плоских конструкціях за наявності внутрішніх джерел тепла.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських конференціях: на XI Міжнар. наук.-практ. конф. «ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА - 2013» (м. Київ, 2013 р.); міжнар. наук.-практ. конф. «Математика в сучасному університеті» (м. Київ, 2013 р.); VI Міжнар. наук. конф. «Сучасні проблеми математичного моделювання прогнозування і оптимізації» (м. Кам'янець-Подільський, 2014 р.); XV Міжнар. наук. конф. ім. акад. Михайла Кравчука (м. Київ, 2014 р.); міжнар. наук. конф. «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (м. Рівне, 2015 р.); конф. молодих учених «Підстригачівські читання – 2015» (м. Львів, 2015 р.); V Міжнар. наук.-практ. конф. "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія" (м. Івано-Франківськ, 2015 р.); семінарах Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (2013-2015 рр.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 13 наукових працях, з яких 6 – у фахових наукових виданнях, в тому числі 1 у закордонному періодичному виданні, 7 – у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій, симпозіумів.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 117 найменувань на 13 стор., 4 додатків на 41 стор. Основна частина дисертації займає 114 стор. та містить 55 рисунків і 25 таблиць. Загальний обсяг роботи – 168 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, відображено наукову новизну, практичне значення, апробацію отриманих результатів, а також дані щодо їх публікації.

У **першому розділі** на основі огляду літературних джерел проаналізовано сучасний стан проблеми дослідження вогнестійкості багатошарових елементів будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності. Проведено порівняння вже існуючих методів визначення межі вогнестійкості на основі експериментальних та аналітичних дослідженнях. Цим питанням займалися такі вчені багатьох наукових шкіл, як В.П. Бушев, М.М. Гивлюд, А.М. Домінік,

С.В. Зотов, Ю.А. Кошмаров, П.Г. Круковський, А.Ф. Милованов, И.С. Молчатський, О.В. Некора, С.В. Новак, В.М. Остапенко, С.В. Поздєєв, В.М. Ройтман, М.М. Семерак, А.В. Субота, А.М. Шевляков, Т.М. Шналь, О.І. Яковлев, J. Argiris, T. Lie, T. Harmathy, H. Hartl та інші, але до сьогоднішнього дня не існує прямого (точного) методу дослідження вогнестійкості елементів багат шарових конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності. Таким чином, пошук аналітичних методів дослідження задач теорії теплопровідності є важливим і актуальним.

На основі проведеного аналізу, зроблено висновок, що загалом доцільно розробити прямий метод розв'язування задач теплопровідності в багат шарових конструктивних елементах. При цьому слід почати з рівняння теплопровідності в декартовій системі координат, що разом з певними крайовими умовами є математичною моделлю процесу теплопереносу в багат шаровій конструкції з кусково-змінним коефіцієнтом теплопровідності та функцією внутрішніх джерел аналогічної структури. Така загальна постановка задачі дозволила обґрунтувати мету роботи.

У **другому розділі** запропоновано і обґрунтовано конструктивну схему побудови розв'язку мішаної задачі для рівняння теплопровідності з кусково-неперервними коефіцієнтами та стаціонарною неоднорідністю, які залежать від координати на скінченному інтервалі.

У прямокутній декартовій системі координат Ox розглянута багат шарова плоска конструкція товщиною l , область, що обмежена площинами $x = x_0 = 0$ і $x = x_n = l$. Ця область поділена площинами $x = x_1, x = x_2, \dots, x = x_{n-1}$, на n шарів різної товщини. Кожен шар має: λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К); c – питому теплоємність, Дж/(кг·К); ρ – густину, кг/м³. Крім цього, в шарах передбачається наявність q_v – внутрішніх джерел тепла, Вт/м³. Між шарами закладені умови ідеального теплового контакту. Прийmemo, що температура в конструкції поширюється лише в напрямку осі Ox , тобто задача про дослідження теплообміну є одновимірною. Таку задачу зводимо до розв'язування на відрізку $0, l$ диференціального рівняння

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + q_v \quad x, \quad (1)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} p_{11}t(x_0, \tau) + p_{12}\lambda \frac{\partial t}{\partial x}(x_0, \tau) + q_{11}t(x_n, \tau) + q_{12}\lambda \frac{\partial t}{\partial x}(x_n, \tau) = \psi_0(\tau), \\ p_{21}t(x_0, \tau) + p_{22}\lambda \frac{\partial t}{\partial x}(x_0, \tau) + q_{21}t(x_n, \tau) + q_{22}\lambda \frac{\partial t}{\partial x}(x_n, \tau) = \psi_n(\tau), \end{cases} \quad (2)$$

при початковій умові

$$t(x, 0) = \varphi(x), \quad (3)$$

де t – температура, °С; τ – час, с; p, q – деякі дійсні числа, $\psi_0(\tau)$ та $\psi_n(\tau)$ – закон и зміни температури, $\varphi(x)$ – початковий розподіл температурного поля.

Розв'язок задачі (1)-(3) шукаємо методом редукції у вигляді суми двох функцій

$$t \ x, \tau = u \ x, \tau + v \ x, \tau . \quad (4)$$

Будь-яку з функцій u чи v можна вибрати спеціальним чином, тоді інша вже визначатиметься однозначно.

Визначимо функцію $u \ x, \tau$ як розв'язок (квазістаціонарної) крайової задачі

$$\lambda u' + q_v \ x = 0, \quad (5)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} p_{11}u(x_0, \tau) + p_{12}u^{[1]}(x_0, \tau) + q_{11}u(x_n, \tau) + q_{12}u^{[1]}(x_n, \tau) = \psi_0(\tau), \\ p_{21}u(x_0, \tau) + p_{22}u^{[1]}(x_0, \tau) + q_{21}u(x_n, \tau) + q_{22}u^{[1]}(x_n, \tau) = \psi_n(\tau). \end{cases} \quad (6)$$

Тут позначено $u^{[1]}(x) \stackrel{df}{=} \lambda u'(x)$ – квазіпохідна, $q = -u^{[1]}$ – густина теплового потоку. Зауважимо, що крайові умови (6) повинні бути лінійно-незалежними, а τ вважаємо параметром.

На основі зображення (4) перепишемо рівняння (1) у вигляді

$$c\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} + c\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial v}{\partial x} \right) + q_v \ x . \quad (7)$$

Якщо взяти до уваги, що $u \ x, \tau$ є розв'язком задачі (5)-(6), то в (7) слід покласти $\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial u}{\partial x} \right) + q_v \ x \equiv 0$. Тоді з (7) прийдемо до неоднорідного диференціального рівняння для функції $v \ x, \tau$

$$c\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial v}{\partial x} \right) - c\rho \frac{\partial u}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Зауважимо, що функцію $-c\rho \frac{\partial u}{\partial \tau}$ у правій частині (8) вважаємо відомою, бо відомою є функція $u \ x, \tau$, яку знайдемо як розв'язок задачі (5)-(6) далі. Оскільки функція $u \ x, \tau$ справджує крайові умови (2), то з урахуванням виразу (4) впливають крайові умови для функції $v \ x, \tau$:

$$\begin{cases} p_{11}v(x_0, \tau) + p_{12}v^{[1]}(x_0, \tau) + q_{11}v(x_n, \tau) + q_{12}v^{[1]}(x_n, \tau) = 0, \\ p_{21}v(x_0, \tau) + p_{22}v^{[1]}(x_0, \tau) + q_{21}v(x_n, \tau) + q_{22}v^{[1]}(x_n, \tau) = 0, \end{cases} \quad (9)$$

а початкова умова набуває вигляду

$$v \ x, 0 = f \ x = \varphi \ x - u \ x, 0 . \quad (10)$$

Отже, за умови, що розв'язок $u \ x, \tau$ задачі (5)-(6) – відомий, функція $v \ x, \tau$ є розв'язком мішаної задачі (8)-(10).

Розв'язок крайової задачі (5)-(6) та його квазіпохідна є першою та другою координатою вектор-функції $\bar{U} \ x, \tau$ відповідно, де

$$\begin{aligned} \bar{U}(x, \tau) &= \sum_{i=0}^{n-1} \bar{U}_i(x, \tau) \theta_i = \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} \left[B_i(x, x_i) B(x_i, 0) \cdot P_0 - B_i(x, x_i) \cdot \sum_{k=0}^i B(x_i, x_k) \cdot \bar{Z}_k - \int_{x_i}^x B_i(x, s) \cdot \bar{R}_i(s) ds \right] \theta_i. \end{aligned} \quad (11)$$

Тут позначено

$$\begin{aligned} \bar{P}_0 &= \left[P + Q \cdot B(x_n, x_0) \right]^{-1} \cdot \left[\bar{\Gamma} - Q \cdot \sum_{i=1}^n B(x_n, x_i) \cdot \bar{Z}_i \right], \quad B_i(x, x_i) = \begin{pmatrix} 1 & b_i(x, s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ b_i(x, s) &= \int_s^x \frac{dz}{\lambda_i(z)}, \quad B_i(x, x_k) = \begin{pmatrix} 1 & \sum_{j=k}^{i-1} b_j(x_{j+1}, x_j) \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{pmatrix}, \\ Q &= \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} \\ q_{21} & q_{22} \end{pmatrix}, \quad \bar{\Gamma} = \begin{pmatrix} \psi_0 & \tau \\ \psi_n & \tau \end{pmatrix}, \quad \bar{Z}_i = \int_{x_{i-1}}^{x_i} B_{i-1}(x_i, s) \bar{R}_{i-1}(s) ds, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \int_{x_i}^x B_i(x, s) \bar{R}_i(s) ds &= \int_{x_i}^x \begin{pmatrix} 1 & b_i(x, s) \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -r_i(s) \end{pmatrix} ds = \int_{x_i}^x \begin{pmatrix} b_i(x, s) \cdot -r_i(s) \\ -r_i(s) \end{pmatrix} ds. \end{aligned} \quad (12)$$

Шукатимемо нетривіальні частинні розв'язки однорідного диференціального рівняння

$$c\rho \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial v}{\partial x} \right), \quad (13)$$

що справджує крайові умови (9), у вигляді

$$v(x, \tau) = e^{-\omega \tau} \cdot X(x), \quad (14)$$

де ω – параметр, а $X(x)$ – наразі невідома функція.

Підставляючи праву частину (14) в (13) приходимо до квазідиференціального рівняння

$$\lambda X'' + \omega c \rho X = 0, \quad (15)$$

з крайовими умовами

$$\begin{cases} p_{11} X(x_0) + p_{12} X^{[1]}(x_0) + q_{11} X(x_n) + q_{12} X^{[1]}(x_n) = 0, \\ p_{21} X(x_0) + p_{22} X^{[1]}(x_0) + q_{21} X(x_n) + q_{22} X^{[1]}(x_n) = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Задача (15)-(16) – класична задача на власні значення, властивості власних значень ω_k та власних функцій $X_k(x, \omega_k)$ за умов 1-го, 2-го та 3-го роду детально вивчені та описані в спеціальній літературі.

Характеристичне рівняння задачі на власні значення (15)-(16) має вигляд

$$\det \left[P + Q \cdot B(x_n, x_0, \omega) \right] = 0. \quad (17)$$

Власні вектори задачі на власні значення (15) з крайовими умовами (16), та при $\bar{\Gamma} \tau \equiv 0$ мають наступну структуру:

$$\bar{X}_k(x, \omega_k) = \tilde{B}(x, x_0, \omega_k) \cdot C_1, C_2^T, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (18)$$

де $\tilde{B}_{x, x_0, \omega_k}$ – відповідна матриця Коші, C_1, C_2^T відомий нетривіальний вектор.

Власні функції $X_k(x, \omega_k)$, як перші координати власних векторів $\bar{X}_k(x, \omega_k)$, можна записати у вигляді

$$X_k(x, \omega_k) = 1, 0 \cdot B_{x, x_0, \omega_k} \cdot \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \end{pmatrix}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

Для розв'язання задачі (8)-(10) застосуємо метод власних функцій, який полягає в тому, що розв'язок даної задачі та його квазіпохідну шукаємо у вигляді вектор-функції

$$\bar{V}(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k(\tau) \cdot \bar{X}_k(x, \omega_k), \quad (20)$$

$$T_k(\tau) = f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} \cdot u_k(s) ds. \quad (21)$$

Тут позначено: f_k – коефіцієнти Фур'є розвинення початкової умови, u_k – коефіцієнти Фур'є розкладу правої частини рівняння (8).

Остаточно отримуємо розв'язок мішаної задачі (8)-(10) та його квазіпохідну, що є відповідно першою та другою координатою вектор-функції у вигляді ряду

$$\bar{V}(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot \bar{X}_k(x, \omega_k) = \sum_{i=0}^{n-1} \bar{V}_i(x, \tau) \cdot \theta_i, \quad (22)$$

де

$$\bar{V}_i(x, \tau) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k(\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot \bar{X}_{ki}(x, \omega_k). \quad (23)$$

На основі зображення отримаємо розв'язок задачі (1)-(3)

$$t(x, \tau) = \sum_{i=0}^{n-1} [u_i(x, \tau) + v_i(x, \tau)] \cdot \theta_i, \quad (24)$$

в якому функції $u_i(x, \tau)$ та $v_i(x, \tau)$ є першими координатами векторів у формулах (11) і (23) відповідно.

У **третьому розділі** проведено та детально описано числовий експеримент (розв'язано тестову задачу) розрахунку поширення нестационарного температурного поля двошарової плоскої стінки за умов конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем, результат якого наведено в табл. 1. Проведено порівняльний аналіз збіжності результатів обчислень методом, запропонованим в дисертаційному дослідженні, з методом інтегральних перетворень (перетворення Лапласа).

Порівнюючи отриманий результат з тим, який наведений у літературі, отримуємо повне збігання результатів.

Розподіл нестационарного температурного поля по товщині двохшарової плоскої стінки

час, с	координати шару, м									
	сере- довище	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,275	0,3	сере- довище
0	80	10	10	10	10	10	10	10	10	30
600	86	47	10,3	10	10	10	10	10,3	26,5	30
1200	92	56,9	12,3	10	10	10	10	11,7	27,5	30
1800	98	64,4	15,5	10,1	10	10	10	13,2	27,9	30
2400	104	70,9	19,1	10,4	10	10	10,1	14,5	28,2	30
3000	110	76,9	22,6	11	10	10	10,2	15,5	28,4	30
3600	116	82,7	26,2	11,8	10,1	10	10,3	16,3	28,5	30
2×3600	152	115	46,8	19,4	11,7	10,4	11	18,9	28,9	30
4×3600	224	179	88,5	41,8	21,2	14,1	13,2	20,6	29,1	30

Наведено порівняння результатів експериментальних досліджень вогнестійкості бетонних плит, захищених та незахищених вогнезахисним покриттям, на основі експерименту, що проводився в центрі вогневих випробувань «Тест» (м. Київ).

Для визначення вогнезахисної здатності вогнезахисного покриття Фенікс СТВ виробництва фірми «А+В Україна» нанесеному на бетонну плиту, при режимі, близькому до стандартного температурного режиму, було сплановано і проведено серію вогневих випробувань бетонних плит товщиною 60 мм. Випробовуванням піддавались два зразки бетонних плит, розмірами 600х600х60 мм (рис.1).

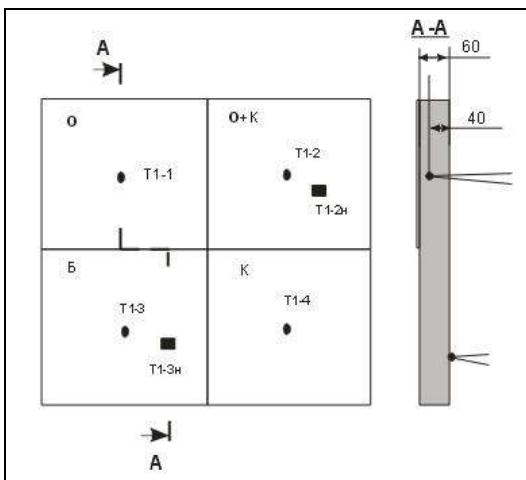


Рисунок 1 – Схема розподілу термопар на зразках:

О – вогнезахисне покриття; К –
грунтовка; Б – бетон

На поверхні, що обігрівались, зразків № 1 та № 2 перед випробуванням було нанесено:

- вогнезахисне покриття Фенікс СТВ товщиною 1,5 мм (чверть зразка, позначена буквою О);
- вогнезахисне покриття Фенікс СТВ, товщиною 1,5 мм по ґрунтовці Фенікс Контакт (зразок №1), по ґрунтовці з рідкого скла (зразок №2) (чверть зразка, позначена буквою О+К);
- ґрунтовка Фенікс Контакт без покриття (зразок №1), ґрунтовка з рідкого скла (зразок №2), (чверть зразка, позначена буквою К);
- на одну чверть зразків ґрунтовка і покриття не наносились (чверть зразка, позначена буквою Б).

Кожен зразок препарували хромель-алюмелевими термопарами (ТХА) по центру чвертей на глибині 20 мм від поверхні, що обігрівались (очікуване місце розміщення несучої арматури в залізобетонних конструкціях). Випробування зразків проводилось в умовах, близькому до стандартного температурного режиму,

протягом 122 хвилин. На рис. 2 представлені графіки зміни температури від часу вогневого випробовування в чвертях поверхні, що обігрівались на глибині 20 мм.

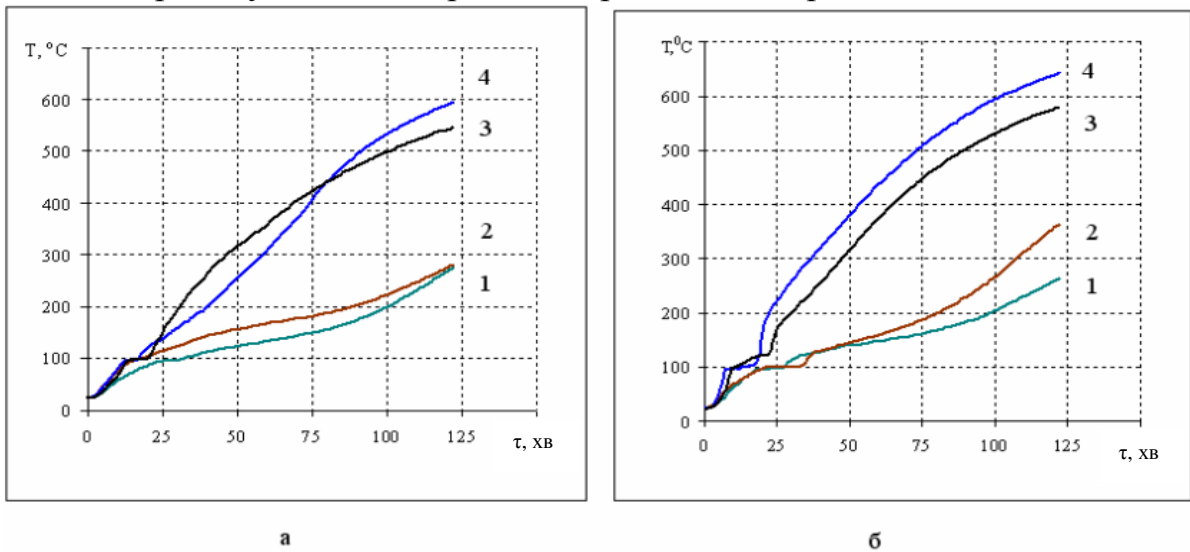


Рисунок 2 – Графіки зміни температури від часу вогневого випробовування в чвертях поверхні, що обігрівались на глибині 20 мм:

(1 – чверть зразка, з нанесеним вогнезахисним покриттям Фенікс СТВ;

2 – чверть зразка, з нанесеним вогнезахисним покриттям Фенікс СТВ та ґрунтовкою Фенікс Контакт (а) та ґрунтовкою з рідкого скла (б);

3 – чверть зразка, на яку не наносилось вогнезахисне покриття та ґрунтовка; 4 – чверть зразка, з нанесеною ґрунтовкою Фенікс Контакт (а), та ґрунтовкою з рідкого скла (б))

Для перевірки адекватності математичної моделі, запропонованої автором дисертаційного дослідження, порівняно результати теоретичних та експериментальних досліджень.

В якості дослідження вогнестійкості (за втратою теплоізолювальної здатності) бетонної плити без нанесеного вогнезахисного покриття розглядалась плоска одношарова бетонна конструкція. Необхідно знайти розподіл нестационарного температурного поля по товщині бетонної плоскої конструкції за умови стандартного температурного режиму пожежі.

Для визначення температурного поля по товщині конструкції було використано запропонований прямий метод, який алгоритмізовано в комп'ютерному середовищі Maple 13.

На рис. 3 представлено порівняння результатів експериментального та теоретичного досліджень поширення нестационарного температурного поля в бетонній плиті на глибині 20 мм.

В якості дослідження бетонної плити з нанесеним вогнезахисним покриттям розглядалась тришарова плоска конструкція, яка складається з вогнезахисного покриття Фенікс СТВ, виробництва фірми «А+В Україна», ґрунтовки Фенікс Контакт та бетонної плити. Необхідно визначити межу вогнестійкості (втрату теплоізолювальної здатності), а також знайти розподіл нестационарного температурного поля по товщині тришарової плоскої конструкції за умови стандартного температурного режиму пожежі.

На графіку рис. 3 представлено порівняння результатів теоретичного та експериментального досліджень поширення нестационарного температурного поля в

тришаровій плиті на глибині 20 мм в бетонній плиті.

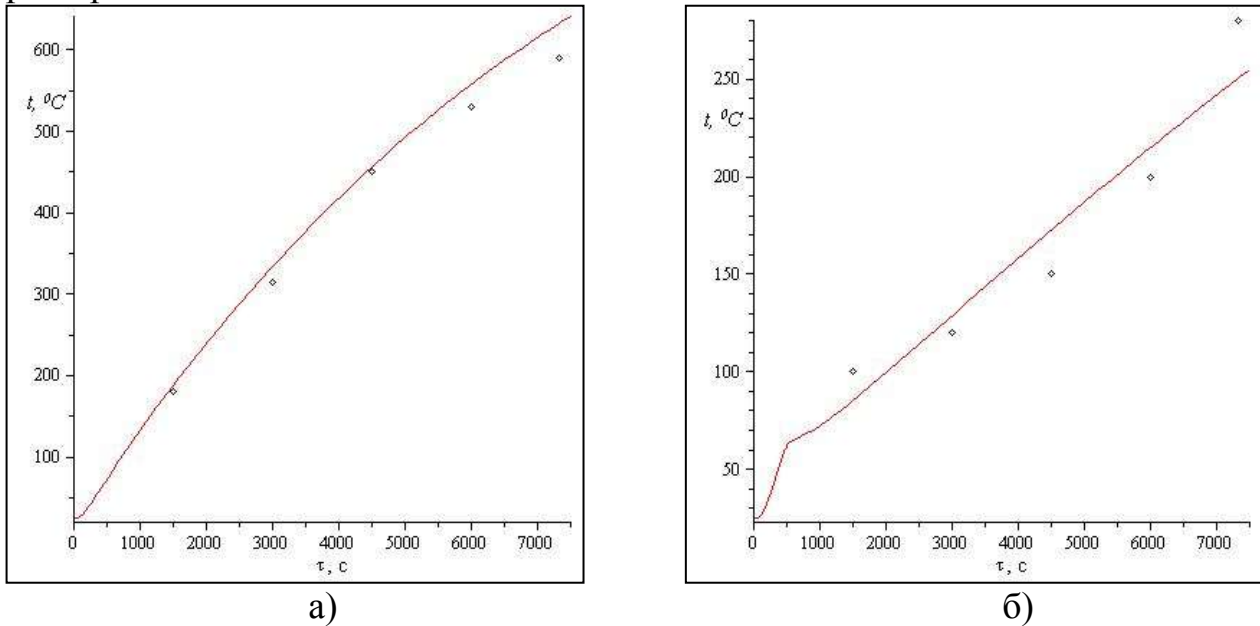


Рисунок 3 – Графік зміни температури від часу вогневого випробування:

а) без вогнезахисного покриття на глибині 20 мм;

б) з вогнезахисним покриттям Фенікс СТВ

(— — результати теоретичних досліджень; \diamond – результати експерименту)

Аналіз графічних залежностей (рис. 3) показує, що результати розрахунку поширення нестационарного температурного поля по товщині бетонної плити, незахищеної та захищеної вогнезахисним покриттям Фенікс СТВ з ґрунтовкою Фенікс Контакт, отримані за допомогою математичних моделей, є якісно і кількісно збіжними з результатами, отриманими експериментальним шляхом. Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними становить 4% та 10% відповідно.

З огляду на проведені дослідження був розроблений алгоритм визначення часу втрати теплоізолювальної здатності багатошарової будівельної конструкції з урахуванням руйнування довільного шару. В основу даного алгоритму входить прямий метод розрахунку поширення нестационарного температурного поля по товщині багатошарової плоскої конструкції.

Даний алгоритм зреалізований за допомогою комп'ютерного середовища Maple 13, блок-схема якого подана на рис. 4.

1. Першим етапом даного алгоритму є введення початкових даних.

2. Наступним кроком є розрахунок поширення нестационарного температурного поля багатошарової плоскої конструкції за допомогою ЕОМ, який подано у вигляді формули

$$t_{x,\tau} = \frac{\alpha_0 \alpha_n}{\Delta} \left(\psi_0 \tau \sigma_n + \frac{\psi_n \tau}{\alpha_0} + \frac{\psi_0 \tau}{\alpha_n} + (\psi_n \tau - \psi_0 \tau) \left(\frac{x - x_i}{\lambda_i} + \sigma_i \right) \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k \tau - s} u_k s ds \right] \cdot X_k(x, \omega_k) \quad (25)$$

3. З заданим інтервалом часу, наприклад 1 хв., оператор перевіряє два основних показника розподілу нестационарного температурного поля по товщині багатошарової конструкції, а саме:

- втрату теплоізолювальної здатності конструкції;
- можливість руйнування довільного шару конструкції.

Така процедура відбувається до втрати теплоізолювальної здатності конструкції, або руйнування довільного шару (групи шарів).



Рисунок 4 – Алгоритм обчислення втрати теплоізолювальної здатності з урахуванням руйнування довільного шару

4.1. Якщо конструкція не втратила своєї теплоізолювальної здатності, а вплив температури призвів до руйнування довільного шару конструкції, розрахунки припиняються, та фіксується час τ_0 . Далі проводиться постановка нової задачі розрахунку розподілу нестационарного температурного поля багат шарової конструкції без урахування зруйнованого шару (групи шарів). Вводяться нові початкові дані. До закону зміни температури середовища ($\psi_0(\tau)$ та $\psi_n(\tau)$) додається час τ_0 . Початковий розподіл температурного поля задається у вигляді функції розподілу температурного поля, який існував у момент часу τ_0 . Знову проводять розрахунок і оператор перевіряє показники втрати теплоізолювальної здатності та руйнування довільного шару конструкції. Якщо ж вплив температури знову призвів до руйнування довільного шару (групи шарів) конструкції, то розрахунок припиняється та фіксується час τ_1 . Така процедура продовжується до втрати

теплоізолювальної здатності конструкції. Загальним часом втрати теплоізолювальної здатності є сума всіх фіксованих значень часу, тобто $\tau = \tau_0 + \tau_1 + \dots + \tau_n$, де τ_n час втрати теплоізолювальної здатності.

4.2. Якщо ж відбувається втрата теплоізолювальної здатності багатошарової конструкції без руйнування довільного шару (групи шарів), розрахунок припиняється.

5. Результати розрахунку виводяться у вигляді явних формул розподілу нестационарного температурного поля для кожного з шарів конструкції. За допомогою даних формул результат можна вивести у вигляді табличних даних, графічних залежностей (об'ємних графіків, анімацій, тощо) зміни температури по товщині конструкції в залежності від часу.

Наступним етапом дисертаційної роботи досліджувався вплив руйнування довільного шару будівельної конструкції на час вогнестійкості (втрати теплоізолювальної здатності) будівельних конструкцій. Як приклад, розглядається багатошарова плоска конструкція, яка складається з вапняної штукатурки, пінопласту, цегляної кладки та вапняної штукатурки.

У початковий момент часу температура стінки постійна і дорівнює $t_0 = 25^\circ\text{C}$.

Одна із зовнішніх поверхонь нагрівається шляхом конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем, температура якого змінюється за законом

$$t_c \tau = 345 \lg 8\tau + 1 + 25. \quad (26)$$

Коефіцієнт теплообміну зі сторони поверхні, що обігрівається, становить $\alpha_0 = 25 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, а з поверхні, що не обігрівається – $\alpha_0 = 4 \text{ Вт/м}^2\text{К}$.

Необхідно визначити розподіл нестационарного температурного поля по товщині цієї конструкції і знайти час, за який температура поверхні, що не обігрівається досягне 180°C (критична температура втрати теплоізолювальної здатності).

Оскільки другий шар конструкції складається з пінопласту, то існує загроза його руйнації, коли температура на межі першого і другого шару підніметься до 100°C . Тому проведено два різні розрахунки розподілу нестационарного температурного поля (без урахування руйнування шару пінопласту та з урахуванням руйнування шару пінопласту та, як наслідок, шару штукатурки).

Використавши запропонований прямий метод дослідження розподілу нестационарного температурного поля по товщині конструкції без урахування руйнування шару пінопласту, отримаємо розв'язок цієї задачі у вигляді графіку, що представлений на рис. 5.

З рис. 5 очевидно, що розглянута чотиришарова конструкція прогріється до критичної температури 180°C за 18 годин.

Дослідимо тепер поширення нестационарного температурного поля по товщині конструкції з урахуванням руйнування другого шару.

Проводячи відповідні розрахунки, зміни температури між першим і другим шаром конструкції, отримаємо, що другий шар (пінопласту), руйнується через 11 хвилин після початку горіння внаслідок його плавлення.

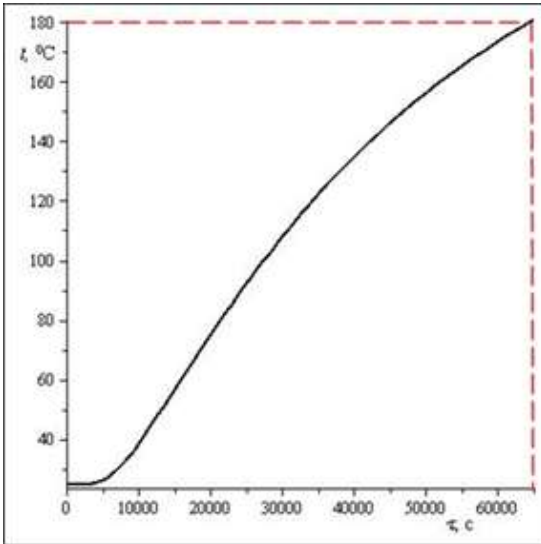


Рисунок 5 – Графік зміни температури зі сторони поверхні, що не обігривається (без врахування руйнування шару пінопласту)

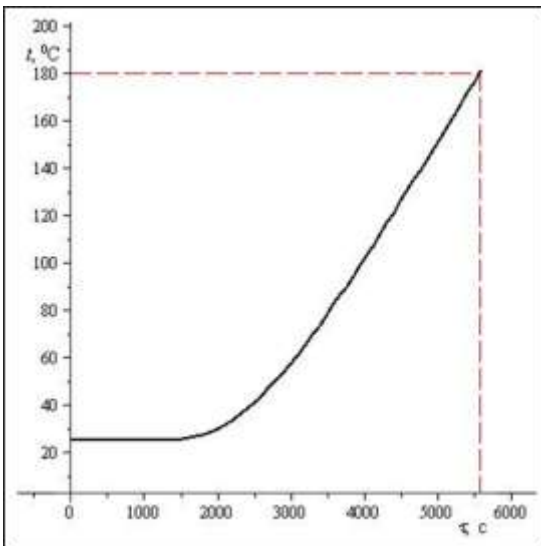


Рисунок 6 – Графік зміни температури зі сторони поверхні, що не обігривається (з врахуванням руйнування шару пінопласту)

1023 $^\circ\text{C}$. Ураховуючи, що температура факела полум'я дорівнює 1523 $^\circ\text{C}$ і досягається за 15-20 с, температурний режим горіння водню та оливи математично змодельовано у вигляді

$$\begin{aligned} \psi_0 \tau = \psi_n \tau = 1523 - (1523 - t_0)e^{-0,315\tau}, \tau = 0..180 \\ \psi_0 \tau = \psi_n \tau = 1023, \tau > 180 \end{aligned} \quad (29)$$

де t_0 – початкова температура середовища, $^\circ\text{C}$.

Знаючи закон зміни температурного режиму за умов пожежі, дослідимо розподіл температурного поля по товщині плоскої сталеві конструкції, яку при аналітичних дослідженнях змодельовано пластиною.

Початок координат системи xOt розмістимо на лівій стінці пластини. Вісь Ox лежить у площині перерізу пластини і перпендикулярна до площини стінки

Оскільки руйнується другий шар, то і шар штукатурки, яка тримається на пінопласті, теж руйнується. Далі продовжуємо розрахунок при наявності двошарової стінки, для якої необхідно знайти час втрати теплоізолювальної здатності (температура на поверхні, що не обігривається, повинна досягти 180 $^\circ\text{C}$).

Закон зміни температури між навколишнім середовищем і стінкою набуде вигляду

$$t_c \tau = 3451g (8\tau + 11) + 1 + 25. \quad (28)$$

Розв'язок задачі після руйнування шару пінопласту з урахуванням часу до руйнування відобразимо у вигляді графічної залежності на рис. 6.

Аналізуючи рис. 5 та рис. 6 можна зробити висновок, що врахування такого фактору, як можливість руйнування одного з шарів, дуже важливий. Реальний час втрати теплоізолювальної здатності знижується з 18 годин до 94 хвилин.

У **четвертому розділі**, за допомогою запропонованого прямого методу досліджена сталеві несуча конструкція, на яку діє температура біля 1523 $^\circ\text{C}$ від факела полум'я горіння воднево-оливної суміші. Прикладом є можливий сценарій розвитку пожежі в машинному залі електростанції. Тривалість аварійного витікання (горіння) струменя водню становить 3 хв., після цього настає аварійне витікання турбінної оливи і температурний режим коливатиметься в околі

1023 $^\circ\text{C}$. Ураховуючи, що температура факела полум'я дорівнює 1523 $^\circ\text{C}$ і досягається за 15-20 с, температурний режим горіння водню та оливи математично змодельовано у вигляді

конструкції (рис. 7).

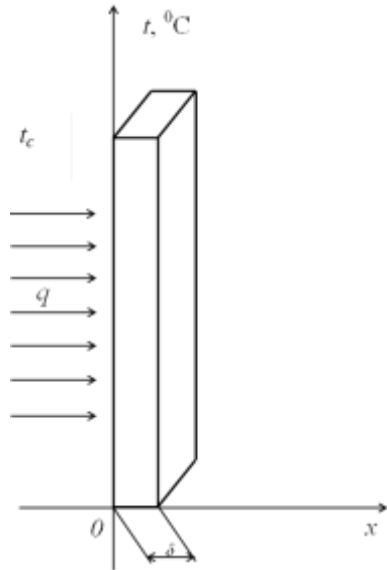


Рисунок 7 – Схематичне зображення плоскої конструкції

Для визначення температурного поля по товщині сталевій конструкції маємо диференціальне рівняння теплопровідності, умови теплообміну між пожежею та поверхнею конструкції та початкову умову

$$c\rho \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0), \quad (30)$$

$$t(x, 0) = t_0 = const; \quad (31)$$

$$\begin{cases} \alpha_0 t(0, \tau) - \lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_0 \psi_0(\tau), \\ \alpha_n t(x_n, \tau) - \lambda \frac{\partial t(x_n, \tau)}{\partial x} = \alpha_n \psi_n(\tau), \end{cases} \quad (32)$$

де, α_0, α_n – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К).

Коефіцієнт теплообміну $\alpha_0 = \alpha_n$ враховує конвекційний та променевий теплообмін та коливається в межах від 71 Вт/м²К (при температурі

конструкції 25 °С) до 95 Вт/м²К (при температурі конструкції 500 °С).

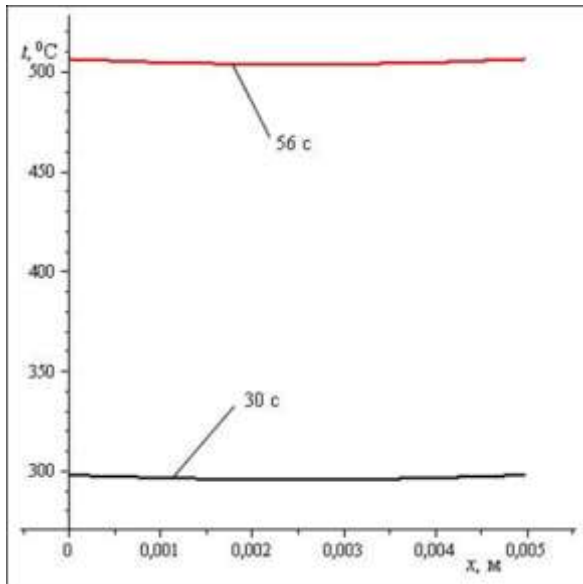
Застосувавши прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля у вигляді формули (24) одержимо розв'язок задачі у вигляді

$$t(x, \tau) = \frac{\alpha_0 \alpha_n}{\Delta} \left(\psi_0 \tau \sigma_n + \frac{\psi_n \tau}{\alpha_0} + \frac{\psi_0 \tau}{\alpha_n} + (\psi_n \tau - \psi_0 \tau) \left(\frac{x - x_i}{\lambda_i} + \sigma_i \right) \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \left[f_k \cdot e^{-\omega_k \tau} - \int_0^{\tau} e^{-\omega_k (\tau-s)} u_k(s) ds \right] \cdot X_k(x, \omega_k). \quad (33)$$

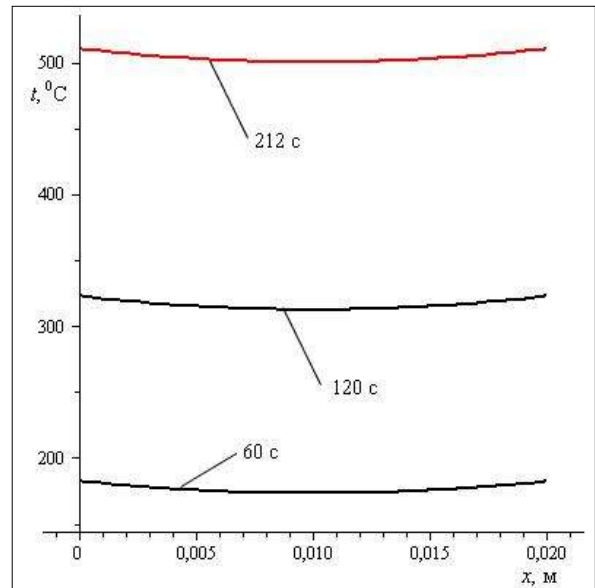
При дослідженні дії високих температур факела пожежі на несучі сталеві конструкції розглянемо окремо деякі несучі сталеві конструкції машинних залів електростанцій товщиною 5 мм та 20 мм.

За формулою (33) проведено дослідження поширення нестационарного температурного поля по товщині сталевій пластини. Результати чисельного експерименту зображені графічно на рис. 8. Аналіз цього рисунка показує, що елементи незахищених сталевих несучих конструкцій різної товщини (5 мм та 20 мм) прогріються до критичної температури 500 °С за 56 с та 212 с відповідно.

Для підвищення вогнестійкості цих конструкцій їх необхідно покривати вогнезахисними покриттями, що вспучуються. Для дослідження впливу теплофізичних та геометричних характеристик вогнезахисних покриттів на вогнестійкість несучих сталевих конструкцій розглянемо сталеву конструкцію, захищену вогнезахисним покриттям, що вспучується “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” (виробництва “Svt. Brandschutz”, Німеччина).

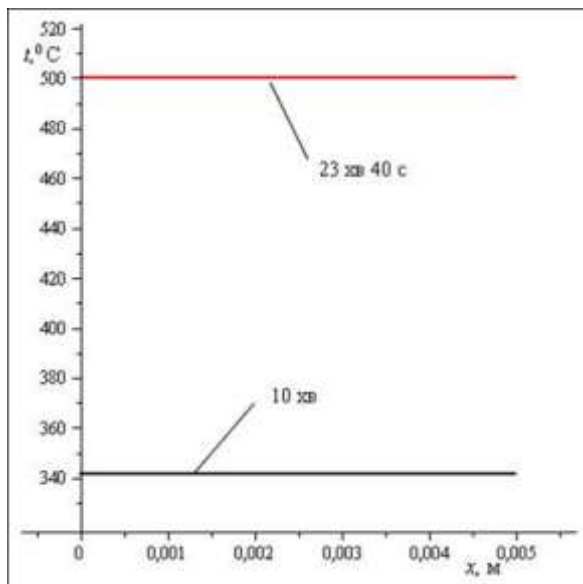


а)

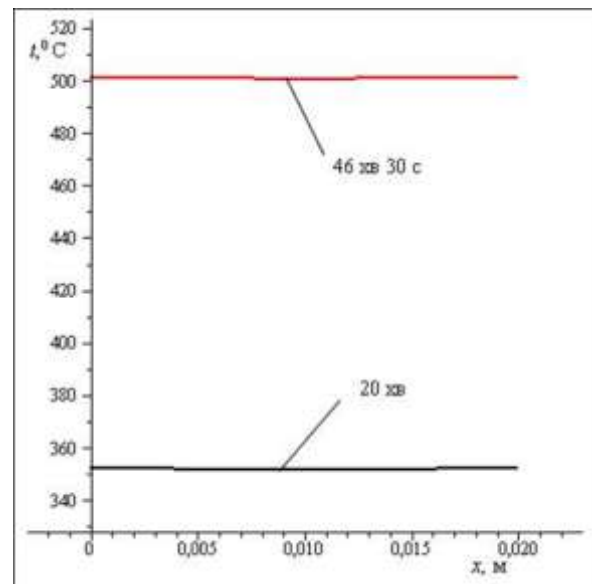


б)

Рисунок 8 – Розподіл температурного поля по товщині незахищеної сталевій пластини:
а) 5 мм; б) 20 мм



а)



б)

Рисунок 9 – Розподіл температурного поля по товщині сталевій конструкції захищеної вогнезахисним покриттям товщиною: а) 1,5 мм; б) 0,8 мм

Для дослідження розподілу температурного поля по товщині сталевій конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям, змодельовано її у вигляді двошарової конструкції з товщиною вогнезахисного покриття 1,5 мм (для пластини товщиною 5 мм) та 0,8 мм (для пластини товщиною 20 мм). На розглянуту конструкцію діють усі фактори, що викладені для незахищеної сталевій пластини.

Прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля згідно з (33) дає можливість дослідити вогнестійкість сталевій конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям, урахувавши зміну теплофізичних характеристик та геометричних розмірів, оцінити ефективність вогнезахисного покриття “Pyro-Safe Flamoplast SP-A2”, яке нанесене на елементи сталевій конструкції.

Результати чисельного експерименту дослідження розподілу нестационарного температурного поля по товщині сталевій конструкції, захищеної вогнезахисним покриттям зображені графічно на рис. 9.

З графіків на рис. 9 видно, що елементи сталевих конструкцій товщиною 5 мм та 20 мм, покриті вогнезахисним покриттям "Pyro-Safe Flammoplast SP-A2" товщиною 1,5 мм та 0,8 мм, нагріваються до критичної температури 500 °С за 23 хв 40 с та 46 хв 30 с відповідно.

Також в четвертому розділі дисертаційної роботи наведено результати дослідження впливу внутрішніх джерел тепла на розподіл температурного поля вздовж багатошарової плоскої конструкції та проведено дослідження впливу початкової товщини вогнезахисного покриття на вогнестійкість бетонної конструкції з урахуванням зміни геометричних розмірів та теплофізичних характеристик.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною працею у галузі пожежної безпеки, в якій на основі створеного нового методу розв'язування нестационарних задач теорії теплопереносу вирішено актуальне науково-технічне завдання методами математичного моделювання теплових процесів. На підставі теоретичних досліджень, науково обґрунтовані в роботі результати дають змогу досліджувати нестационарні теплові процеси в багатошарових плоских конструкціях при довільних режимах пожежі, а також оцінювати межі вогнестійкості будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності, та сформулювати наступні висновки:

1. Одержано розв'язок нестационарної задачі теплопровідності для елемента конструкції з багатошаровою структурою при загальних крайових умовах теплообміну, що дало можливість дослідити вогнестійкість будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності в умовах теплового впливу пожежі з різними температурними режимами, що рекомендовані чинною нормативною базою.

2. На основі модифікації методу Фур'є з ефективним застосуванням концепції квазіпохідних створено новий прямий метод дослідження стаціонарних та нестационарних задач теплопровідності для багатошарових плоских стінок.

3. Розроблено алгоритм чисельної реалізації прямого методу дослідження стаціонарних та нестационарних задач теплопровідності для багатошарових плоских конструкцій. Запропонований алгоритм дозволяє значно швидше знайти розв'язок нестационарної задачі теплопровідності. При цьому збільшення кількості шарів конструкції практично не впливає на обсяг проведених обчислень у порівнянні з іншими методами.

4. Прямий метод розв'язування нестационарних задач теплопровідності адаптовано до дослідження процесів теплопереносу в елементах будівельних конструкцій з багатошаровою структурою за наявності внутрішніх джерел тепла в умовах теплового впливу пожежі з різними температурними режимами. Проведено тестові розрахунки запропонованим методом та порівняно їх з відомими аналітичними результатами розв'язку тестових задач. Спостерігається повне (100%)

збігання результатів. Виконано верифікацію результатів у порівнянні з відповідними експериментальними даними. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 10%.

5. Проведено чисельні дослідження конкретних актуальних задач теплопереносу в багатошарових конструкціях зі змінною товщиною шарів на прикладі елементів будівельних конструкції із вогнезахисними системами на основі покриттів, що вспучуються. Аналітичні дослідження процесу нагрівання сталевих конструкцій за умов горіння воднево-повітряної суміші з подальшим горінням оливи показали, що межа вогнестійкості сталеві конструкції (пластини товщиною 20 мм) становить 3,5 хв. без вогнезахисту, а з вогнезахисним покриттям “Pyro-Safe Flamoplast SP-A2” товщиною 0,8 мм підвищується до 46 хв.

6. Вдосконалено методику розрахунку межі вогнестійкості багатошарових конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності з урахуванням можливості руйнування довільного шару. Проведені теоретичні дослідження у вигляді модельної задачі чотиришарової конструкції (штукатурка – пінопласт – цегляна кладка – штукатурка) показали, що неврахування фактору руйнування довільного шару може призвести до помилкового визначення межі вогнестійкості. Теплоізолювальна здатність такої конструкції без урахування руйнації шару пінопласту становить 18 годин, а з урахуванням руйнування – 94 хв.

7. З використанням комп'ютерного середовища Maple 13 побудовано та відлагоджено алгоритм розрахунку розподілу температурного поля та густини теплового потоку в багатошарових плоских конструкціях у вигляді явних аналітичних виразів, таблиць результатів та графічних залежностей. Це дозволило досліджувати зміну температури та густини теплового потоку по товщині конструкцій зі зміною часу.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тацій Р. М. Визначення теплообміну в багатошаровій нескінченній плиті з дискретно-неперервним розподілом джерел тепла / Р. М. Тацій, М. І. Кусій, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека : Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2012. – № 20. – С. 20-26.

2. Тацій Р. М. Визначення теплообміну в багатошаровій нескінченній плиті за нестандартних двоточкових умов / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Вісник Харківського національного університету: – Харків : ХНУ, 2013. – № 1089. – С. 121–133. (серія "Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління").

3. Тацій Р. М. Визначення теплообміну в багатошаровій нескінченній плиті при початкових умовах на границі розділу суміжних шарів / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Вісник ЛДУ БЖД : Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2013. – № 8. – С. 16–23.

4. Тацій Р. М. Прямий метод розрахунку нестационарного температурного поля за умов пожежі / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека : Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – № 26. – С. 135-141.

5. Семерак М. М. Теплоизолирующая способность многослойных строительных конструкций с учётом разрушения произвольного слоя / М. М.

Семерак, Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям республики Казахстан : Сб. науч. тр. – Кокшетау : КТИ КЧС МВД РК, 2015. – № 4 (20). – С. 8-17.

6. Тацій Р. М. Загальна третя крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-сталими коефіцієнтами та внутрішніми джерелами тепла / Р. М. Тацій, Т. І. Ушак, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2015. – № 27. – С. 120-126.

7. Тацій Р. М. Нестандартні крайові задачі теплопровідності у багатошарових структурах за наявності внутрішніх джерел тепла / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Пожежна безпека – 2013 : Зб. тез доп. XI Міжнар. наук.-практ. конф. (25–26 вересня). – Київ, 2013. – С. 308-312.

8. Тацій Р. М. Нестандартні крайові умови в задачах теплопровідності у багатошарових структурах / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Математика в сучасному технічному університеті : матер. міжн. наук.-практ. конф. (19-20 квітня). – Київ, 2013. – С. 168-171.

9. Тацій Р. М. Моделювання процесу теплообміну в багатошаровій стінці системою диференціальних рівнянь з імпульсною дією / Р. М. Тацій, О. Ю. Пазен // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації : Зб. тез доп. VI Міжнар. наук. конф. (4-5 квітня). – Кам'янець-Подільський, 2014. – С. 162-164.

10. Тацій Р. М. Математичне моделювання процесу теплопровідності в багатоступінчатому стрижні / Р. М. Тацій, Б. С. Воробець, О. Ю. Пазен // XV Міжнар. наук. конф. ім. акад. Михайла Кравчука : матер. конф. (15-17 травня). – Київ, 2014. – С. 303-304.

11. Тацій Р. М. Загальна крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-неперервними коефіцієнтами / Р. М. Тацій, М. Ф. Стасюк, О. Ю. Пазен // Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів : матер. міжнар. наук. конф. (19-22 лютого). – Рівне, 2015. – С. 158.

12. Пазен О. Ю. Загальна мішана задача теплопровідності в багатошаровій плоскій стінці з урахуванням внутрішніх джерел тепла [Електронний ресурс] // О. Ю. Пазен // Підстригачівські читання – 2015 : матер. конф. (26-28 травня). – Львів, 2015. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.iapmm.lviv.ua/chyt2015>.

13. Тацій Р. М. Загальна третя крайова задача для рівняння теплопровідності з кусково-неперервними коефіцієнтами та стаціонарною неоднорідністю / Р. М. Тацій, М. Ф. Стасюк, О. Ю. Пазен // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : матер. V Міжнар. наук. конф. (27-29 травня). – Івано-Франківськ – Вінниця, 2015. – С. 201-202.

АНОТАЦІЯ

Пазен О. Ю. Математичне моделювання процесів теплопереносу в багатошарових плоских конструкціях за умов пожежі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, 2015.

Дисертація присвячена розв'язанню важливої науково-технічної задачі –

розробці прямого методу дослідження нестационарних температурних полів у багатошарових плоских конструкціях за умов пожежі з урахуванням внутрішніх джерел тепла. Даний метод може бути використаний для розрахунку вогнестійкості елементів будівельних конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності в умовах пожежі.

У роботі проведено порівняння результатів, отриманих за запропонованим методом, з відповідними аналітичними та експериментальними даними щодо розподілу температурного поля в багатошарових елементах будівельних конструкцій під впливом пожежі. Проведено чисельні дослідження багатошарових конструкцій з перемінною товщиною та зміною теплофізичних характеристик шарів на прикладі елементів будівельних конструкцій із вогнезахисними системами на основі покриттів, що вспучуються. Одержаний аналітичний розв'язок нестационарної задачі теплопровідності дозволив дослідити вплив початкової товщини вогнезахисного покриття на вогнестійкість конструкцій.

Розроблено методику розрахунку межі вогнестійкості багатошарових конструкцій за граничним станом втрати теплоізолювальної здатності.

Ключові слова: пожежа, прямий метод, теплопровідність, вогнестійкість, теплоізолювальна здатність, нестационарне температурне поле, елементи будівельних конструкцій.

АННОТАЦІЯ

Пазен О. Ю. Математическое моделирование процессов теплопереноса в многослойных плоских конструкциях в условиях пожара. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. – Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, Львов, 2015.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи - разработке прямого метода исследования нестационарных температурных полей в многослойных плоских конструкциях в условиях пожара с учётом внутренних источников тепла. Данный метод может быть использован при расчёте огнестойкости элементов строительных конструкций по предельным состояниям потери теплоизолирующей способности в условиях пожара.

В работе разработан алгоритм численной реализации прямого метода решения стационарных и нестационарных задач теплопроводности для многослойных плоских конструкций. Выполнено тестовые расчёты для сравнения результатов с известными решениями соответствующих тестовых задач. Проведено верификацию полученных решений предложенным методом с соответствующими экспериментальными данными по распределению температурного поля в многослойных элементах строительных конструкций под воздействием пожара.

Разработана методика расчёта предела огнестойкости многослойных конструкций по предельному состоянию потери теплоизолирующей способности. Данная методика может быть использована при расчёте предела огнестойкости многослойной конструкции с эффектом разрушения произвольного слоя. Такие исследования показывают, что отказ от учёта фактора разрушения произвольного слоя могут значительно завышать предел огнестойкости строительных конструкций

Проведены численные исследования многослойных структур с переменной толщиной и изменением теплофизических характеристик слоёв на примере элементов строительных конструкций с огнезащитными системами на основе вспучиваемых покрытий.

Исследовано распределение нестационарного температурного поля в несущих стальных конструкциях с учётом изменения теплофизических характеристик и геометрических параметров вспучивающегося огнезащитного покрытия, что позволило исследовать предел огнестойкости несущих стальных конструкций.

Разработанный метод вошёл в научно-исследовательскую работу «Анализ пожарной опасности машинного зала при выбросе водорода из корпуса турбоагрегата энергоблока №1 ОП ЗАЭС».

Ключевые слова: пожар, прямой метод, теплопроводность, огнестойкость, теплоизолирующая способность, нестационарное температурное поле, элементы строительных конструкций.

ABSTRACT

Pazen O. Y. Mathematical modeling of heat transfer in multilayer planar structures under conditions of fire. – Manuscript.

Thesis applying the Ph.D. degree in Technical Sciences in the specialty 21.06.02 – Fire Safety. – Lviv State University of Life Safety, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to solving important scientific and technical problem - the development of the direct method of research of unsteady temperature fields in multi-planar structures under conditions of fire, taking into account the internal heat sources. This method can be used in the calculation of fire resistance of elements of building structures on the boundary as insulation ability loss in fire conditions.

This paper compared the results obtained by the proposed method with appropriate analytical and experimental data on the distribution of temperature field in multilayer elements of building structures under the influence fire. Conducted numerous studies of multilayer structures with variable thickness and changing thermal characteristics of the layers for example elements of building structures with fire retardant systems based on a swelling coatings. Analytical solution of unsteady heat conduction problem allows to investigate the effect of initial thickness of fire-proof coatings for fire resistance of structures.

It was developed methodology for calculating the fire resistance of multilayer structures for limit losses as insulation capacity.

Key words: fire, direct method, thermal conductivity, fire resistance, insulating capacity, unsteady temperature field, elements of building structures.

Підписано до друку 22.02.2016 р.
Друк різнограф.
Наклад 100 прим.

Формат 60 x 80 1/16
Ум. друк. арк. 0,9
Зам. 01/ 2016
