

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

ШАРШАНОВ АНДРІЙ ЯНОВИЧ



УДК 614.8

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЗАХИСТУ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ
ВІД ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ**

21.06.02 – Пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2020

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті цивільного захисту України Державної служби України з надзвичайних ситуацій, м. Харків.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Абрамов Юрій Олексійович
Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, головний науковий співробітник науково-дослідного центру

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ковалишин Василь Васильович
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, завідувач кафедри ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій

доктор технічних наук, доцент
Шналь Тарас Миколайович
Національний університет «Львівська політехніка», Інститут будівництва та інженерії доквілля, м. Львів, доцент кафедри будівельних конструкцій та мостів

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Кравченко Олег Вікторович
Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, м. Харків, завідувач відділу нетрадиційних енерготехнологій

Захист відбудеться “8” жовтня 2020 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету цивільного захисту України за адресою: 61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 64.707.01 за електронною адресою: <http://nuczu.edu.ua>

Автореферат розісланий “___” вересня 2020 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 64.707.01



А.О. Михайлюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Пожежа є окремим випадком процесу горіння. У зв'язку з цим, основним небезпечним фактором пожежі є характерні для горіння інтенсивні теплові потоки, а захист поверхонь об'єктів від теплового впливу пожежі став однією із головних задач пожежної безпеки. Одним із основних пасивних способів захисту від теплового впливу є створення перешкод на шляху розповсюдження тепла. Засобами, які реалізують цей спосіб захисту, являються теплозахисні покриття або екрани, що розташовані між джерелом тепла і об'єктом захисту, для зменшення енергетичного впливу на об'єкт захисту.

Різними аспектами захисту від теплового впливу пожежі займалися Абрамов Ю.О., Антонов А.В., Беліков А.С., Басманов О.Є., Брушлінський М.М., Гаврилко О.А., Гивлюд М.М., Жартовський В.М., Кіреєв О.О., Круковський П.Г., Мичко А.А., Пузач С.В., Ройтман В.М., Страхів В.Л., Тичино М.О., Фомін С.Л., Яковлев А.І., Яковлева Р.А., Anderson Ch.E., Butler K.M., Bourbigot S., Le Bras M., Buckmaster J., Camino G., Costa L., Clarc K.J., Delobel R., Lyons J.W., Olsen J.W., Trossarely L., Vandersall H.L., Wang Z., Wilson M., Yu J. та інші вчені.

Незважаючи на практичну важливість проблеми захисту від теплового впливу пожеж, що залучило до розгляду відповідних явищ значну кількість дослідників, багато пов'язаних із захистом питань залишаються не вирішеними. Зокрема, це стосується: математичного опису явищ із максимальним використанням фізичних законів; наявності точних (а не чисельних) рішень задач, що надає можливість використовувати загальніші аналітичні (а не чисельні) залежності; а також, неповноти набору алгоритмів і програмного забезпечення для рішення прикладних задач стосовно захисту у стандартних загальноприйнятих умовах та в умовах пожежі у приміщенні.

Описана ситуація обумовлює необхідність розв'язання проблеми стосовно математичного опису та виявлення особливостей захисту речовин і матеріалів від теплової дії пожежі, розробки комплексу математичних методів, а також алгоритмів і програмного забезпечення для рішення прикладних задач захисту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась в рамках науково-дослідних робіт "Підвищення ефективності гасіння полімерних матеріалів шляхом використання бінарних систем з роздільним подаванням" (НДР № 0115U002034), "Підвищення ефективності гасіння лісових пожеж шляхом використання бінарних вогнегасник систем з роздільним подаванням" (НДР № 0117U002009), "Підвищення ефективності гасіння резервуарів з нафтою та нафтопродуктами шляхом використання гелеутворюючих систем" (НДР № 0118U001012).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток наукових основ використання покриттів і екранів для пасивного захисту об'єктів від теплового

впливу пожежі шляхом розробки комплексу математичних моделей для опису процесів захисту, виявлення особливостей цих процесів, а також розробки алгоритмів і програмного забезпечення для вирішення прикладних задач захисту.

Для досягнення такої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- знайти аналітичне рішення лінійного варіанту задачі нестационарної теплопровідності стосовно захисту термічно товстого тіла плоским термічно тонким поглинаючим покриттям;

- знайти аналітичне розв'язання лінійного варіанту задачі нестационарної теплопровідності про захист термічно тонкого тіла плоским поглинаючим покриттям, а також виявити особливості такого процесу;

- визначити вплив випадкової неоднорідності товщини поглинаючого покриття на його теплозахисну дію;

- на основі законів збереження енергії і речовини побудувати модель покриття, що при максимально можливій простоті і мінімальній штучності враховує основні особливості процесу спучування і в рамках єдиного підходу описує викликані нагріванням від зовнішнього теплового потоку процеси теплопереносу, термічного розкладу, випаровування, спучування і винесення маси, а також розробити алгоритми та програмне забезпечення щодо моделювання захисної дії такого покриття в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні;

- на основі законів збереження енергії і законів теплообміну побудувати математичні опис захисту поверхонь тіл від теплового впливу пожежі за допомогою одного або декількох термічно тонких відбиваючих екранів з повітряними або теплопровідними оптично тонкими прошарками, а також розробити алгоритми та програмне забезпечення щодо комп'ютерного моделювання захисної дії різних варіантів відбиваючих екранів в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні;

- на основі законів тепло- і масообміну побудувати математичну модель процесу висихання шару гелю під дією зовнішнього теплового потоку, яка враховує відмінності висихання гелю від випаровування води, і виявити особливості цього процесу у випадку термічно тонкого шару гелю;

- визначити витрату гелеутворюючого складу, необхідну для покриття захисної смуги з метою локалізації ландшафтної пожежі;

- на основі законів тепло- і масообміну побудувати математичний опис процесу нестационарної неізотермічної дифузії пари небезпечної речовини крізь шар зернистого середовища;

- розробити практичні рекомендації та алгоритми і комп'ютерні програми щодо вибору покриттів і екранів для захисту об'єктів від теплового впливу пожежі.

Об'єкт дослідження – процеси захисту речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі за допомогою екранів та покриттів,

Предмет дослідження – характеристики методів та засобів захисту речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі.

Методи дослідження: під час виконання дисертаційної роботи були використані методи: *математичного моделювання* при побудові моделей: 1) процесів захисту від нагрівання об'єктів з використанням теплопровідних інертних покриттів, відбиваючих покриттів, покриттів, що спучуються; 2) процесів висихання гелів при теплозахисті; 3) процесів ізоляції небезпечних рідин за допомогою шарів піноскла та гелю; *комп'ютерного моделювання* (розробки алгоритмів, написання комп'ютерних програм і чисельне рішення систем рівнянь моделей з використанням цих програм) процесів захисту від нагрівання об'єктів з використанням теплопровідних інертних покриттів, відбиваючих покриттів, покриттів, що спучуються; *математичної фізики*, а саме перетворень Лапласа, при аналітичному рішенні задач захисту з використанням теплопровідних покриттів; *теорії подібності* при наданні залежностям критеріального вигляду; *математичної статистики* при дослідженні теплозахисної дії випадково-неоднорідного теплопровідного покриття; *планування експерименту* для визначення оптимального складу гелю для захисту гуми гелевим покриттям від теплового впливу.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі одержані нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності забезпечують вирішення актуальної проблеми розвитку наукових основ захисту об'єктів від теплового впливу пожежі за допомогою захисних екранів і покриттів.

Вперше отримані наступні наукові результати:

1. Знайдено аналітичне рішення задачі нестационарної теплопровідності по визначенню залежності від часу температури захищеної поверхні термічно товстого тіла за великих (у порівнянні з одиницею) коефіцієнтах активності (що відповідає захисту металеві поверхні неметалевим покриттям) та малих критеріях Біо, яке забезпечує одержання прогнозних оцінок для критичних значень параметрів пожежної безпеки (межі вогнестійкості, рівня температури гарячого середовища), виходячи із критичного рівня температури поверхні захищеного тіла.

2. Знайдено аналітичне рішення задачі нестационарної теплопровідності по визначенню температур при нагріванні плоского шару термічно тонкого тіла (ТТТ) крізь плоске теплопровідне покриття довільної товщини, що має вигляд ряду, доданки якого експоненційно убувають з часом. Отримано формули розрахунку всіх доданків цього ряду і показано, що основною відмінністю даної задачі, від відомої ситуації одностороннього прогріву одинарної плоскої пластини є залежність не від двох критеріїв (Біо та Фур'є), а від чотирьох (двох критеріїв Біо, критерію Фур'є та відношення поверхневих теплоємностей ТТТ і покриття), а також доказано, що для більшості розрахунків достатньо двох перших членів ряду, що дозволяє виявити явний вираз залежності критичних значень параметрів пожежної безпеки (межі вогнестійкості, рівня температури гарячого середовища) від критичного рівня температури ТТТ.

3. Побудовано математичні описи захисної дії одношарового і двошарового тепловідбиваючих екранів із повітряними прошарками, особливістю яких є те, що вони зводяться до системи звичайних диференціальних

рівнянь залежності температур екранів від часу, для рішення яких в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні розроблено алгоритми та побудовані відповідні комп'ютерні програми, а також знайдені аналітичні рішення спрощеної задачі прогріву таких екранів та вказана область застосування цих рішень. Показано, що час захисної дії двошарового екрану у $\sim 1,5-2$ рази перевищує час захисту відповідним одношаровим екраном сумарної товщини.

4. Побудовано математичну модель процесу нестационарної неізотермічної дифузії пари горючої рідини крізь шар зернистого покриття, що виступає над поверхнею рідини, особливістю якої є те, що випаровування рідини описується у квазістационарному наближенні, через що поле концентрацій задається алгебраїчними співвідношеннями, а температурне поле описується модифікованим рівнянням нестационарної теплопровідності. Показано, що модель дозволяє прогнозувати можливість спалаху пари пального при різних значеннях температури і товщини захисного покриття, зокрема виявлено, що критична, щодо спалаху, товщина захисного шару різко зростає при наближенні температури пального до температури кипіння, зокрема при використанні октану при зміні температури від 20°C до його температури кипіння 125°C вона збільшується від $0,07$ м до $57,7$ м.

В якості подальшого розвитку отримані наступні наукові результати:

5. На основі порівняння результуючих коефіцієнтів пропускання теплового потоку поглинаючими покриттями з однакового матеріалу, з однаковою питомою вагою та однорідною і випадково-неоднорідною товщинами показано, що дія випадково-неоднорідного покриття суттєво відрізняється від дії відповідного однорідного покриття тільки у разі сумісного виконання двох умов: 1) не малій величині варіацій товщини покриття (σ) у порівнянні з середнім значенням товщини; 2) не малим значенням варіаційного критерію Біо ($Bi = \alpha \cdot \sigma / \lambda \geq 1$, де α - коефіцієнт тепловіддачі; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття).

6. Розроблено алгоритм знаходження співвідношення товщини шарів двошарового тепловідбиваючого екрану із повітряними прошарками, шари якого зроблені з однакового матеріалу, яке забезпечує максимальний час вогнезахисту при фіксованій сумарній товщині шарів і обмеженнях на температури внутрішнього і зовнішнього шару.

7. Побудовано математичний опис захисної дії одношарових і двошарових відбиваючих теплозахисних екранів з теплопровідними прошарками, особливістю якого є врахування внутрішнього променистого теплового потоку у наближенні оптично тонкого шару, а також розроблені алгоритми і відповідні комп'ютерні програми, що вирішують системи рівнянь опису в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні.

8. Розроблено математичну модель, яка здатне до спучування покриття розглядає як суміш речовин із змінним складом, збільшення кількості і розширення газової компоненти якої у місцях знаходженні остову у рідкому стані приводить до спучування, особливістю якої є те, що вона єдиним образом

описує процеси теплопереносу, термічного розкладання, випаровування, спучування і уносу маси, а також розроблено алгоритми і комп'ютерні програми, що моделюють захист в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні. На прикладі здатного до спучування покриття СК-1 показано збіг із точністю ~20% експериментальних результатів із модельними у випадку із 3-ма активними компонентами..

9. На основі законів тепло- і масообміну побудована математична модель теплозахисної дії вологого гелю, яка процес висихання гелю розглядає з врахуванням масопереносу водяної пари крізь прошарок сухого гелю, що утворюється, особливістю якої є зведення моделі у випадку термічно тонкого шару гелю до системи звичайних (а не у частинних похідних) диференціальних рівнянь відносно часу.

10. На базі оцінки променистого теплового потоку, що падає від факелу ландшафтної пожежі, який має форму довгої смуги, на довільно орієнтовані елементи поверхні горючого матеріалу, побудована модель захисної дії покритої шаром гелю захисної смуги, що дало можливість оцінити необхідну для локалізації пожежі витрату гелеутворюючого складу, і встановити, що вона складає величину майже у 10 разів меншу ніж відповідна витрата води.

11. Розроблено практичні рекомендації, алгоритми і комп'ютерні програми щодо вибору покриттів (із поглинаючих або здатних до спучування матеріалів) та відбиваючих екранів для захисту об'єктів від теплового впливу пожежі.

Практичне значення отриманих результатів. Одержані у дисертаційній роботі результати є науковою основою використання екранів і покриттів для захисту від теплового впливу пожежі. Розроблені моделі і відповідне програмне забезпечення можуть застосовуватися у якості інструмента для прогнозування еволюції параметрів системи під дією зовнішніх джерел тепла. Це надає можливість підбору захисних покриттів і екранів із заданим рівнем захисту.

Результати дисертаційної роботи (а саме алгоритм, щодо визначення параметрів поглинаючого вогнезахисного покриття, нанесеного на металеву конструкцію, математична модель процесу нагрівання такої конструкції і комп'ютерна програма, що реалізує дану модель) використані на ПП «НПП «Спецпожтехніка» м. Харків при підборі необхідної товщини захисного покриття, що дозволило зменшити час підбору у 4 рази у порівнянні з існуючими методами оцінок (акт впровадження від 22.01.2020).

Ці ж результати використані у Управлінні ДСНС України у Черкаській області при проведенні попереднього контролю якості робіт з вогнезахисту металевих конструкцій за допомогою поглинаючого вогнезахисного покриття, щодо забезпечення необхідної межі вогнестійкості захищеної конструкції (акт впровадження від 15.01.2019).

Результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України при вивченні дисципліни “Термодинаміка і теплопередача” у розділі “Нестационарна

теплопровідність” бакалаврами та дисципліни “Моделювання процесів горіння” у розділі “Моделювання горіння рідин” ад’юнктами. Це дозволило підвищити якість викладання аспектів взаємозв’язку означених дисциплін з майбутньою професією слухачів (акт впровадження від 11.12.2019).

Результати дисертаційної роботи втілено в розробку патенту України на корисну модель щодо способу гасіння пожеж в резервуарах з нафтою та нафтопродуктами.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати дисертаційної роботи були отримані автором самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки, мети та завдань дослідження. Автором особисто проведено аналіз інформації з теми роботи, розроблено моделі процесів захисту, досліджено особливості цих моделей, знайдені аналітичні рішення відповідних задач нестационарної теплопровідності, побудовано алгоритми та комп’ютерні програми для чисельного рішення задач захисту, сформульовано висновки по результатам роботи.

Особистий внесок здобувача в працях, які написані у співавторстві, полягає у наступному: в роботі [1] у з’ясуванні природи особливостей моделювання швидкості вигорання пального в залежності від режиму газообміну у приміщенні, а в роботі [2] у вказівці на шлях врахування цих особливостей; в роботі [4] отримані співвідношення визначення максимальної величини променистого потоку від факелу полум’я ландшафтної пожежі та ширини вогнезахисної смуги; в роботах [8, 9, 27, 32] у застосуванні загальної моделі покриття, що спучується, одноосібної роботи [7] до випадків одного [8] та трьох [9] активних компонент у складі покриття; в роботах [10, 35] у розробці математичної моделі захисної дії одношарової тепловідбиваючої накидки та аналітичному рішенні цієї моделі; в роботі [12] у аналізі регресійного рівняння часу спалахування системи в залежності від складу і товщини захисного шару гелю; в роботі [14] у побудові математичної моделі процесу стаціонарної ізотермічної дифузії пари горючих рідин крізь ізолюючий шар гелю; в роботі [16] у обговоренні щодо відношення експериментальних досліджень ізолюючої дії шару гелю до моделі роботи [14]; в роботі [18] у розробці моделі стаціонарної ізотермічної дифузії пари рідини крізь двошарову систему «гранульований матеріал – гель»; в роботах [21, 22] у розробці моделі поведінки крапель гелеутворюючих систем у високотемпературному газовому середовищі та чисельному рішенні цієї моделі; в роботах [23, 24, 34] у розробці моделі охолодження нагрітих поверхонь шарами вологого гелю та аналітичному рішенні цієї моделі; в патенті [26] у обговоренні впливу змочування гранульованого матеріалу на його тепло- і масо- ізоляційні властивості; у монографії [27] у написанні розділу про математичне моделювання вогнезахисної дії здатного до спучування гелевого покриття СК-1; в посібниках [28, 30] у написанні глав стосовно моделювання пожежі у приміщенні, теплообміну при фазових перетвореннях, стаціонарної і нестационарної теплопровідності та променистого теплообміну; в посібнику

[29] у написанні розділу щодо застосування водяних завіс для захисту від теплового впливу пожежі та додатку стосовно випаровування водяних крапель у гарячому газовому середовищі; в роботі [37] у розробці математичної моделі захисної дії двохшарового захисного екрану та комп'ютерному рішенні цієї моделі; в роботі [39] у обговоренні можливості гасіння пожеж горючих рідин гелеутворюючими вогнегасниками складами.

Пропозиції щодо розробки математичних моделей надані д.т.н., проф. Абрамовим Ю.О., д.т.н., доц. Кіреєвим О.О., к.т.н. Пономаренко Р.В., к.т.н. Тарахно О.В., к.т.н. Чернухою А.А.; експериментальні дослідження проводили д.т.н., доц. Кіреєв О.О., д.т.н. Дадашов І.Ф., к.т.н. Чернуха А.А.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних та національних наукових конференціях: III всеросійська научно-практическа конференція “Пожарная безопасность: проблемы и перспективы” (Воронеж, 2012); Всеукраїнська науково-практична конференція «Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів» (НУЦЗУ, Харків, 2013); Международная научно-практическая конференция «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации» (Гомель, 2014); Науково-практична конференція «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів» (НУЦЗУ, Харків, 2014); Науково-практична конференція «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія і практика)» (НУЦЗУ, Харків, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми пожежної безпеки» (НУЦЗУ, Харків, 2016); Международная заочная научно-практическая конференция «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (ИППК, г. Светлая роща, Республика Беларусь, 2016); Международная заочная научно-практическая конференция «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы» (ИППК, г. Светлая роща, Республика Беларусь, 2017); IX міжнародна науково-практична конференція «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (ЧПБ, Черкаси, 2018); 20 Всеукраїнська науково-практична конференція «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку» (ІДУСЦЗ, Київ, 2018).

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертаційної роботи висвітлено у 25 наукових статтях, з яких 5 в закордонних виданнях, 20 у фахових виданнях України, які входять до переліку ДАК України (1 входить в наукометричну базу Scopus, 1 – в Ulrich's Periodicals Directory та Index Copernicus, 4 – в Ulrich's Periodicals Directory та Academic Research Index -ResearchBib), у 1 монографії, 3 навчальних посібниках, а також 11 тезах доповідей на науково-технічних конференціях і 1 патенті України на корисну модель.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 255 найменувань, містить 516 сторінок друкованого тексту (з них 398 сторінок основного тексту), 3 таблиці, 80 рисунків, 9 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз сучасного стану захисту речовин і матеріалів від впливу пожежі за допомогою захисних екранів і покриттів» розглянуто сучасний стан захисту об'єктів від впливу пожежі за допомогою таких пасивних засобів захисту, як екрани та покриття. Наведена класифікація досліджуваного способу захисту. Основна увага спрямована на захист від двох типів явищ: 1) перегрівання об'єктів, що потрапили під вплив пожежі; 2) інтенсифікації масопереносу небезпечних речовин (наприклад випаровування пального у розливі). Увага в основному зосереджувалася на теоретичних результатах щодо опису функціонування захисних екранів і покриттів, не розглядаючи питань розробки захисних матеріалів та визначення їх теплофізичних властивостей.

Першою розглядалася ситуація з використанням інертних вогнезахисних покриттів, які реалізуються у вигляді вогнезахисних штукатурок, облицювальних вогнестійких плит тощо, передача тепла у яких та у об'єктах захисту описується рівняннями нестационарної теплопровідності. Відмічено, що більшість існуючих результатів отримано за допомогою чисельного рішення вказаних рівнянь. Відсутність аналітичних рішень має дві основні причини: 1) нелінійність задачі (через залежність коефіцієнтів системи від температури); 2) складна геометрія. Відмічено, що найпростішими невіршеними аналітично лінійними задачами захисту, які потребують вирішення, є задачі прогріву нескінченного площинного шару, розташованого: 1) на плоскій поверхні термічно товстого тіла; 2) на плоскому термічно тонкому тілі.

Другою розглядалася ситуація з вогнезахистом за допомогою реактивних покриттів, які при нагріванні багаторазово збільшують об'єм, що значно уповільнює прогрівання об'єкту вогнезахисту. Важливою складовою досліджень є математичне моделювання як окремих стадій процесів розширення, так і дії покриття у цілому. Так одним із експериментально-розрахункових підходів є чисельне рішення задачі нестационарної теплопровідності із постульованими температурними залежностями коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності. Вид цих залежностей встановлюється із умови мінімізації середньоквадратичного розходження наборів виміряних і розрахованих температур. Фактично це різновид вирішення задачі регресії. Проблемою даного підходу є прив'язка отриманих результатів до конкретного режиму нагрівання.

Можливість поширення експериментальних результатів конкретних режимів прогріву на інші режими нагрівання вимагає використання моделі процесу спучування, яка безпосередньо базується на фізичних законах процесів.

До третього різновиду розглянутих засобів захисту відносяться відбиваючі екрани. Шари матеріалу, що відбивають випромінювання, є основою вогнезахисних костюмів. Вогнезахисний костюм крім відбиваючого

шару має ще додаткові шари теплопровідного поглинаючого матеріалу (тканини). Крім того через нещільне прилягання шарів в системі найчастіше ще є повітряний прошарок. У значній частині робіт при теоретичному описі процесу нагрівання: I) зовнішній екрануючий шар розглядають як теплопровідну пластину кінцевої товщини, у той час як шар металізованого матеріалу веде себе як непрозоре термічно тонке тіло; II) передачу тепла крізь повітряний прошарок між тілом і екрануючим шаром розглядають як два окремих процеси конвекційної тепловіддачі: 1) між екраном і повітрям прошарку; 2) між повітрям прошарку і поверхнею тіла. У випадку вільної конвекції середовища треба від самого початку використовувати рівняння конвекційного теплообміну у обмеженому просторі.

Одним із основних практичних способів захисту поверхонь тіл від теплового впливу пожежі є їх зрошення водою. Проблемою даного способу охолодження є обумовлене стіканням води низьке (до 10%) значення коефіцієнта використання. Вказаний недолік відсутній у гелеутворюючих систем. Основою вогнезахисної дії вологого гелю є два процеси: 1) висихання гелю з утворенням більш сухого ксерогелю; 2) опір процесу передачі тепла крізь прошарок ксерогелю, який має низьке значення коефіцієнту теплопровідності. Послідовний єдиний теоретичний опис цих процесів відсутній.

Розглядається захист від потрапляння у атмосферне повітря пари горючої чи токсичної речовини, яка з'являється внаслідок випаровування відповідної рідини. Захистом від такого небажаного масопереносу може бути повна або часткова ізоляція цієї рідини, яка здійснюється за допомогою екранів чи покриттів.

При не малих площах поверхонь випаровування найчастіше в якості ізолюючого покриття виступає шар повітряно-механічної піни, недоліком якої є: 1) низька густина пін, яка приводить до проблеми з подачею пін на великі відстані; 2) наявність у піноутворювачах екологічно небезпечних ПАР; 3) низька стійкість від зовнішнього теплового впливу; 4) руйнація з часом. Відмічені недоліки відсутні у водовмісних гелів на неорганічній основі.

Однією із основних проблем (щодо використання гелів для ізоляції поверхонь рідин) є те, що у більшості випадків гель у рідині тоне. Для подолання проблеми було запропоновано сумісне використання гелю разом із попередньо нанесеним плавучим покриттям. За критеріями екологічності, стійкості, стабільної плавучості, максимальної вантажопідйомності, в якості матеріалу плавучої підкладки було вибрано подрібнене піноскло (ПС).

Шар гранульованого ПС сам по собі є перешкодою для процесів масопереносу. Через це були проведені експериментальні дослідження масопереносу крізь шари гранульованого ПС, що плавають на поверхні рідини. Для теоретичного дослідження цього процесу використовувалась модель стаціонарної ізотермічної дифузії крізь шар зернистого матеріалу. Передбачення цієї моделі якісно співпадають з результатами експериментів,

однак у неї є недоліки: 1) не враховано стефанівський потік, що виникає при дифузії у газовій суміші; 2) не враховані зміни температури у часі і просторі.

Для опису випаровування рідини крізь двошарову систему «піноскло-гель» використовувалась аналогічна модель з тими ж недоліками.

Наближення теоретичних описів до реальності вимагає побудови складніших моделей явищ.

В другому розділі «Захист поверхонь тіл плоским теплозахисним покриттям із поглинаючого однорідного матеріалу» розглянуто декілька ситуацій, першою з яких є захист термічно товстого тіла.

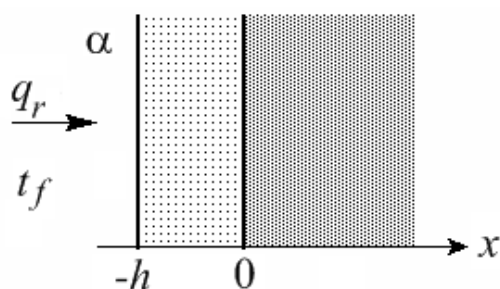


Рис. 1. Просторова схема прогріву

Схематично ситуація зображена на рис. 1, на якому масивному тілу відповідають значення просторової координати $x > 0$, а захисному покриттю $0 > x > -h$. Тут h – товщина захисного покриття; α – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі; t_f – температура середовища, °С; а q_r – результуюча радіаційна складова питомого теплового потоку, який падає на покриття.

Для визначення поля температур $t(x, \tau)$, де τ – час, вирішувалася лінійна система рівнянь нестационарної теплопровідності з відомими граничними умовами, що виражають неперервність повного теплового потоку на границях із зовнішнім середовищем ($x = -h$) та між тілом і покриттям ($x = 0$), неперервність температури при $x = 0$, та її обмеженість при $x \rightarrow \infty$. Початковою умовою брався однорідний розподіл температури в покритті і масивному тілі, тобто при $x > -h$ $t(x, 0) = t_0$, де t_0 – відома початкова температура.

Задача вирішувалася за допомогою перетворень Лапласа відносно часу. Явне аналітичне рішення вдалося знайти у двох випадках, першим із яких є прогрівання за великого часу $\tau \gg \tau_0$, де характерний час прогріву покриття

$$\tau_0 = \frac{h^2}{a}, \quad (1)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу покриття.

У цьому випадку температура поверхні масивного тіла дорівнює

$$t(0, \tau) = t_0 + \left(\frac{q_r}{\alpha} + t_f - t_0 \right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_\Sigma} \right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_\Sigma}} \right) \right], \quad (2)$$

де символом $\operatorname{erfc}(Z)$ позначена додаткова функція помилок Гаусса, а символом τ_Σ позначено характерний час прогріву захищеної поверхні, який дорівнює

$$\tau_{\Sigma} = \tau_* \cdot (Bi + 1)^2. \quad (3)$$

Тут введено характерний час нагрівання незахищеної поверхні

$$\tau_* \equiv \frac{\lambda_* c'_*}{\alpha^2} \quad (4)$$

та критерій Біо

$$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}, \quad (5)$$

де λ, λ_* - коефіцієнти теплопровідності, Вт м⁻¹ К⁻¹; c', c'_* - питомі об'ємні ізобарні теплоємності матеріалу захисного шару і масивного тіла, відповідно, Дж м⁻³ К⁻¹. Тут і в подальшому індексом «*» будуть помічатися параметри об'єкту захисту.

Другим випадком, в якому вдалося знайти явний вигляд рішення, є ситуація великого коефіцієнта активності $K \gg 1$, де

$$K \equiv \sqrt{\frac{\lambda_* c'_*}{\lambda c'}}, \quad (6)$$

та малого критерія Біо покриття $Bi \ll 1$. У цьому разі відносна надлишкова температура поверхні термічно товстого тіла

$$\theta \equiv \frac{t(0, \tau) - t_0}{t_{\max} - t_0}, \quad (7)$$

де

$$t_{\max} = \frac{q_r}{\alpha} + t_f, \quad (8)$$

задовольняє співвідношенню

$$\theta(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot I(\tau, i), \quad (9)$$

де

$$I(\tau, i) = \operatorname{erfc} \left(\frac{1+2 \cdot i}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \right) - e^{(1+2i) \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_*} + \frac{\tau}{\tau_*}}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}} + \frac{1+2 \cdot i}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}} \right). \quad (10)$$

Наступним досліджувався захист термічно тонких тіл (ТТТ), якими на практиці найчастіше є металеві конструкції. Просторова схема цієї задачі прогріву візображена на рис. 2, на якому α_1, α_2 і t_{f1}, t_{f2} - відповідно,

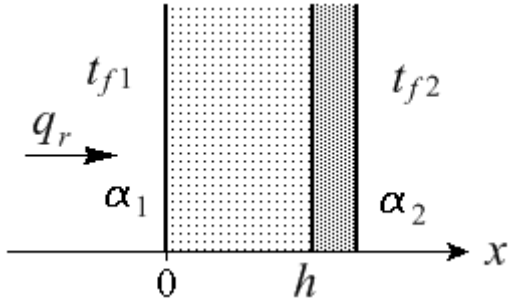


Рис. 2. Просторова схема прогріву
ТТТ

коефіцієнти конвекційної тепловіддачі і температури середовища по різні боки системи.

Для визначення поля температур у захисному шарі $t(x, \tau)$ вирішувалося лінійне рівняння нестационарної теплопровідності, а виконання вимоги ТТТ

$$Bi_* = \frac{\alpha_2 \cdot h_*}{\lambda_*} \ll 1, \quad (11)$$

де λ_* і h_* - відповідно, коефіцієнт теплопровідності матеріалу і товщина шару ТТТ, дозволяло вважати температуру ТТТ $t_*(\tau)$ однорідною, і такою, що

$$t(h, \tau) = t_*(\tau). \quad (12)$$

Ця температура задіяна у ефективних граничних умовах з правого боку (рис. 2) захисного шару

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=h} = c_*'' \cdot \frac{dt_*(\tau)}{d\tau} + \alpha_2 \cdot [t_*(\tau) - t_{f2}], \quad (13)$$

де $c_*'' = c_*' \cdot h_*$ - питома поверхнева теплоємність ТТТ, Дж·м⁻²·К⁻¹; c_*' - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу ТТТ, Дж м⁻³ К⁻¹. Початковою умовою задачі взято однорідний розподіл температури в покритті і в ТТТ $t(x, 0) = t_0$.

Отримане за допомогою перетворень Лапласа рішення має вигляд

$$t_*(\tau) - t_0 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Bi_1 \cdot (t_{\max 1} - t_0) + \left(ch(\varphi_n) + Bi_1 \frac{sh(\varphi_n)}{\varphi_n} \right) \cdot Bi_2 \cdot (t_{f2} - t_0)}{\frac{dD}{ds} \Big|_{s=s_n}} e^{s_n \tau}, \quad (14)$$

де

- 1) критерії Био задачі тепловіддачі покриття - $Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot h}{\lambda}$, $Bi_2 = \frac{\alpha_2 \cdot h}{\lambda}$;
- 2) відношення поверхневих теплоємностей шарів ТТТ і покриття -

$$C = \frac{c_*''}{c''} = \frac{c_*' \cdot h_*}{c' \cdot h}, \quad (15)$$

де $c'' = c' \cdot h$ - питома поверхнева теплоємність покриття, Дж·м⁻²·К⁻¹:

3) ефективна температура гарячого середовища $- t_{\max 1} = \frac{q_r}{\alpha_1} + t_{f1}$.

У формулі (14) додавання провадиться по коріннях s_n характеристичного рівняння $D(s) = 0$, яке при заміні $\varphi = i \cdot \mu$ (де $i = \sqrt{-1}$) приймає вигляд

$$\operatorname{tg}(\mu) = -\mu \cdot \frac{Bi_1 + Bi_2 - C \cdot \mu^2}{Bi_1 \cdot Bi_2 - (1 + C \cdot Bi_1) \cdot \mu^2}, \quad (16)$$

при цьому

$$s_n = -\frac{\mu_n^2}{\tau_0}. \quad (17)$$

У роботі вказан алгоритм знаходження будь якого з коренів $\mu_n(Bi_1, Bi_2, C)$ характеристичного рівняння.

Використовуючи безрозмірні змінні:

1) відносні надлишкові температури

$$\theta \equiv \frac{t_*(\tau) - t_0}{t_{\max 1} - t_0}, \quad \theta_{f2} \equiv \frac{t_{f2} - t_0}{t_{\max 1} - t_0}; \quad (18)$$

2) безрозмірний час процесу (критерій Фур'є)

$$Fo \equiv \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{a \cdot \tau}{h^2}; \quad (19)$$

формулі (14) можна надати критеріального вигляду

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \sum_{n=0}^{\infty} \theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}). \quad (20)$$

де

$$\theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = A_n(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (21)$$

а

$$A_n(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + \left(\cos(\mu_n) + Bi_1 \cdot \frac{\sin(\mu_n)}{\mu_n} \right) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}}. \quad (22)$$

Через існування оцінки

$$\mu_n \approx n \cdot \pi, \quad (23)$$

у більшості випадків, а саме при Fo порядку 1 та $Fo \gg 1$, у сумі (20) (вона ж (14)) можна обмежитись двома першими доданками, і тоді

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = A_0 + A_1 \cdot \exp[-\mu_1^2 \cdot Fo]. \quad (24)$$

Це дозволяє у явному вигляді візначити межу вогнестійкості системи

$$\tau_{cr} = \frac{h^2}{a} \cdot \frac{1}{\mu_1^2} \cdot \ln \left(\left| \frac{A_1}{A_0 - \theta_{cr}} \right| \right). \quad (25)$$

де θ_{cr} - відносна надлишкова температура (18), яка відповідає критичному значенню температури ТТТ $t_* = t_{cr}$.

У дисертації була зроблена оцінка захисної дії випадково-неоднорідного по товщині покриття. Аналізувався випадок, коли тіло, яке захищає покриття, є термічно товстим. У такому разі нанесення покриття при квазістаціонарному прогріві формально приводить до збільшення термічного опору процесу тепловіддачі ($1/\alpha$) на величину термічного опору теплопровідності захисного шару (h/λ), і коефіцієнт пропускання теплового потоку випадковим захисним шаром дорівнює

$$k = \int_0^{\infty} \frac{g(h) \cdot dh}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot h}, \quad (26)$$

де $g(h)$ - щільність імовірності частки площі шару захисного покриття мати товщину h .

Розглядався схожий із нормальним розподіл

$$g(h) = P_0 \cdot \delta(h) + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma} - y_m \right)^2 \right] \cdot \mathfrak{H}(h), \text{ м}^{-1}, \quad (27)$$

де $\delta(h)$ і $\mathfrak{H}(h)$ - дельта-функція Дірака і функція Хевісайда (сходінка від нуля до одиниці, що виникає при $h = 0$); P_0 - ймовірність реалізації захисного шару нульової товщини; σ - характерний масштаб зміни товщини шару, м; $y_m = a/\sigma$; a - найбільш імовірне (крім нульового) значення товщини захисного шару, м.

В результаті

$$k(y_m, Bi) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y_m}{\sqrt{2}} \right) \right] + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} (y - y_m)^2 \right]}{1 + Bi \cdot y} \cdot dy, \quad (28)$$

де $Bi = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\lambda}$ - варіаційний критерій Біо.

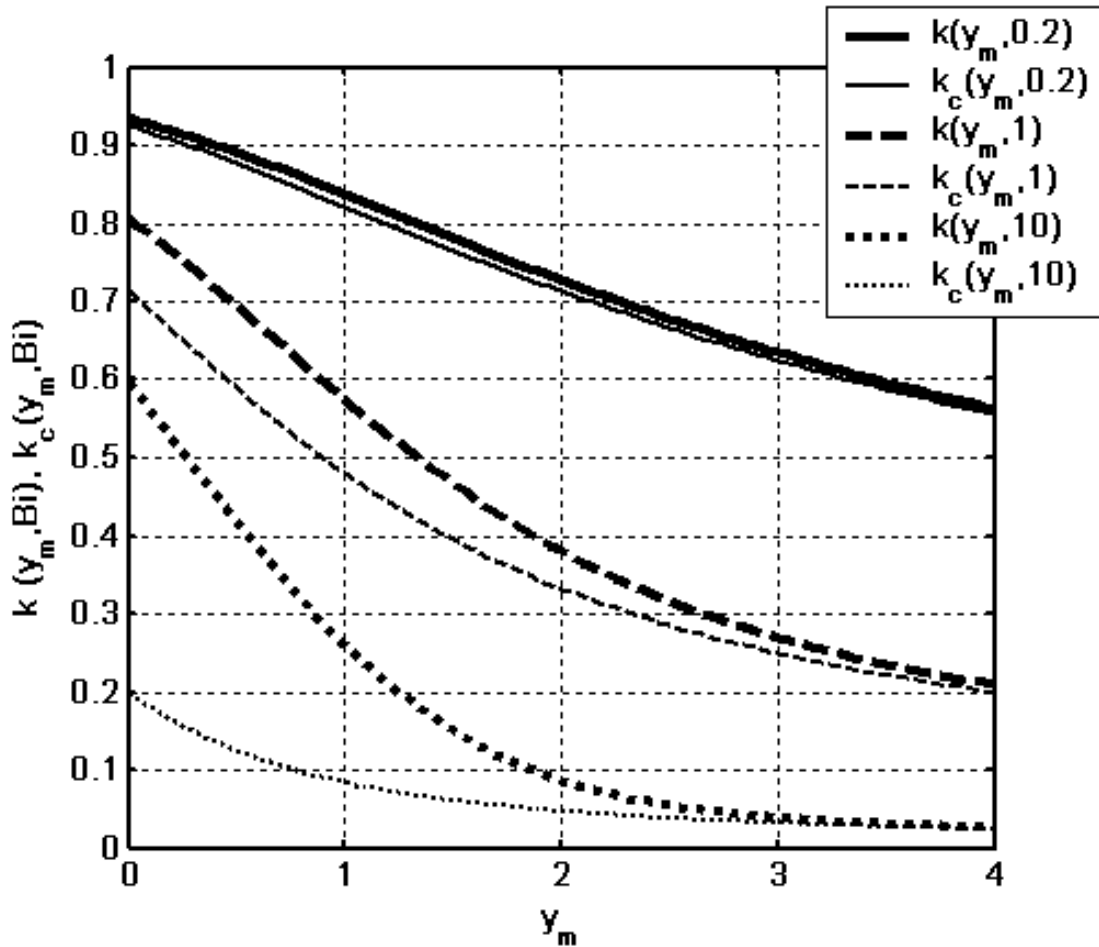


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнта пропускання теплового потоку захисним шаром випадкової товщини $k(y_m, Bi)$ і відповідним йому захисним шаром постійної товщини $k_c(y_m, Bi)$ від y_m при різних значеннях критерію Bi

Порівняння графіків рис. 3 демонструє, що відмінність захисної дії покриттів випадкової і не випадкової товщини суттєве тільки у разі сумісного виконання двох умов: 1) не малій величині варіацій товщини покриття (σ) у порівнянні з ймовірним значенням товщини, тобто при не великих значеннях y_m ; 2) не малим значенням варіаційного критерію Біо.

Останнім у другому розділі чисельно моделювалася теплозахисна дія поглинаючого покриття при пожежі у приміщенні. При цьому значення середньої температури газового середовища у приміщенні $t_m, ^\circ\text{C}$, визначалося у рамках інтегральної моделі пожежі.

На рис. 4 і рис. 5 представлені типові результати моделювання, які наочно демонструють дію захисного поглинаючого покриття.

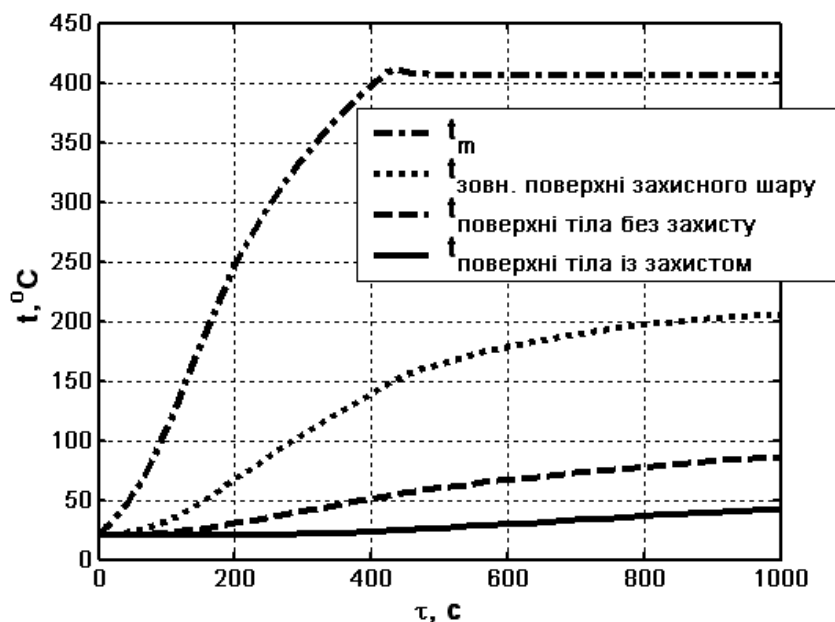


Рис. 4. Графіки залежності температур від часу в моделі прогріву поверхні захищеного та незахищеного термічно товстого тіла при пожежі у приміщенні

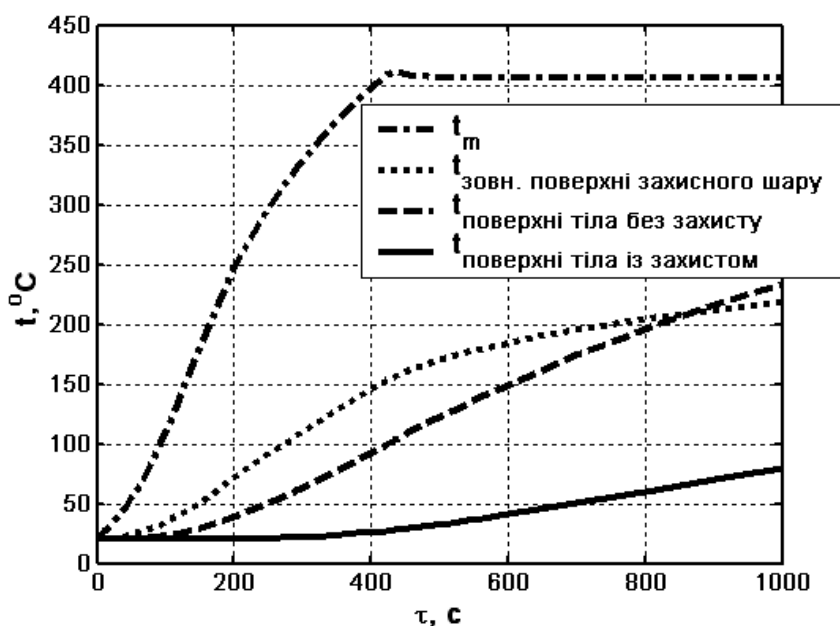


Рис. 5. Графіки залежності температур від часу в моделі прогріву поверхні захищеного та незахищеного термічно тонкого тіла при пожежі у приміщенні

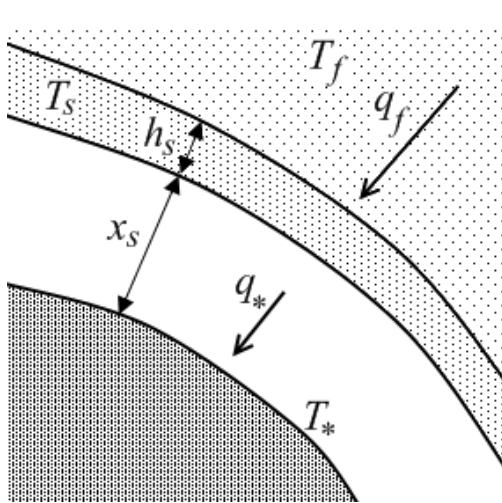
У третьому розділі «Захист поверхонь тіл відбиваючими екранами» проведено моделювання захисту об'єктів від теплового випромінювання за допомогою відбиваючих екранів. Основу екранів складають термічно тонкі оптично непрозорі шари матеріалу, відокремлені між собою та від об'єкту захисту або повітряними прошарками або оптично тонкими прошарками теплопровідного матеріалу. Мається на увазі захист людини тепловідбиваючим костюмом.

Відмітимо, що через наявність системи терморегуляції у людини, яка вважається основним об'єктом захисту, критерій безпеки набуває вигляд обмеження не на температуру об'єкту захисту T_* , К, а на результуючий питомий тепловий потік q_* , який падає на поверхню тіла, тобто

$$q_* \leq q_{cr}, \quad (29)$$

де q_{cr} - критичний рівень питомого теплового потоку, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Першим розглядалося захист за допомогою одиночного відбиваючого екрану, відокремленого від поверхні захисту повітряним прошарком.



Просторова схема задачі зображена на рис. 6, де T_f, T_s - відповідно, абсолютна температура полум'я, екрану; h_s - товщина екрануючого шару; x_s - товщина зазору між тілом і екраном;

$$q_* = q_{*,r} + q_{*,con}, \quad (30)$$

де $q_{*,r}$ і $q_{*,con}$ - відповідно величина щільності радіаційного і конвекційного теплових потоків, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Рис. 6. Схема задачі термічного захисту тіла від теплового впливу полум'я

$$q_{*,r} = q_r(T_s, T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*), \quad (31)$$

де ε_* й ε_s'' - ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) поверхні тіла потерпілого й внутрішньої поверхні накладки, відповідно; q_r - результуюча щільність променистого теплового потоку у прошарку, яка дорівнює

$$q_r(T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) = \varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \sigma \cdot [T_1^4 - T_2^4], \quad (32)$$

де ε_1, T_1 і ε_2, T_2 - відповідно, ступені чорноти, абсолютні температури гарячої та холодної поверхонь теплообміну; σ - стала випромінювання абсолютно чорного тіла;

$$\varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = (\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1)^{-1}. \quad (33)$$

- зведена ступеня чорноти системи двох паралельних нескінчених площин

Щільність вільноконвекційного теплового потоку у плоскому прошарку -

$$q_{con}(T_1, T_2, x) = \varepsilon_{con} \cdot \frac{\lambda_a}{x} \cdot (T_1 - T_2), \quad (34)$$

де x - характерна відстань (товщина зазору) між поверхнями теплообміну, м; λ_a - коефіцієнт теплопровідності повітря, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; індекс «а» тут і далі вказує на відношення до повітря;

$$\varepsilon_{con} = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)_a^{0,25}, \quad (Gr \cdot Pr)_a = \frac{g \cdot (T' - T'') \cdot x^3}{T_a \cdot \nu_a^2} \cdot Pr_a, \quad (35)$$

Gr і Pr - критерії Грасгофа і Прандтля; g – прискорення вільного падіння; ν_a – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря у прошарку, $\text{м}^2 \text{с}^{-1}$;

$$q_{*.con} = q_{con}(T_s, T_*, x_s). \quad (36)$$

Рівняння, яке задає нагрівання екрану, має вигляд

$$\rho_s \cdot c_{p.s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_s}{d\tau} = q_f - q_*, \quad (37)$$

де ρ_s , $c_{p.s}$ – відповідно, густина матеріалу, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, питома масова ізобарна теплоємність, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Величина q_f являє собою результуючий питомий тепловий потік від полум'я до накидки. Його можна оцінити співвідношенням

$$q_f = q_{f.r}(T_f, T_s, \varepsilon_f, \varepsilon'_s) \equiv \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot [T_f^4 - T_s^4], \quad (38)$$

де ε_f і ε'_s – ступені чорноти полум'я і зовнішньої поверхні накидки, відповідно.

Спрощене рівняння теплового балансу (37) має вигляд

$$\rho_s \cdot c_{p.s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_{s.simple}}{d\tau} = \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_{s.0}^4). \quad (39)$$

де $T_{s.simple}(\tau)$ - абсолютна температура екрану, отримана за спрощеним рівнянням; $T_{s.0}$ - абсолютна початкова температура екрану, К.

Рішення рівняння (39) має вигляд

$$T_{s.simple}(\tau) = T_{s.0} + \gamma \cdot \tau, \text{ К}, \quad (40)$$

де параметр γ є швидкістю зміни температури у часі. Він дорівнює

$$\gamma \equiv \frac{\varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_{s.0}^4)}{\rho_s \cdot c_{p.s} \cdot h_s}, \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (41)$$

Із формули (40) витікає оцінка часу нагрівання накидки τ_{cr} до критичної температури $T_{s.cr}$: $\tau_{cr} = \gamma^{-1} \cdot (T_{s.cr} - T_{s.0})$.

Шлях збільшення часу захисту за рахунок збільшення товщини екрану h_s є хибним внаслідок пропорційного збільшення ваги екрану. Варіантом подолання цієї проблеми є використання двошарового екрану.

У дисертації досліджується захисна дія двошарового відбиваючого екрану із поділяючими повітряними прошарками. Просторова схема цієї задачі зображена на рис. 7.

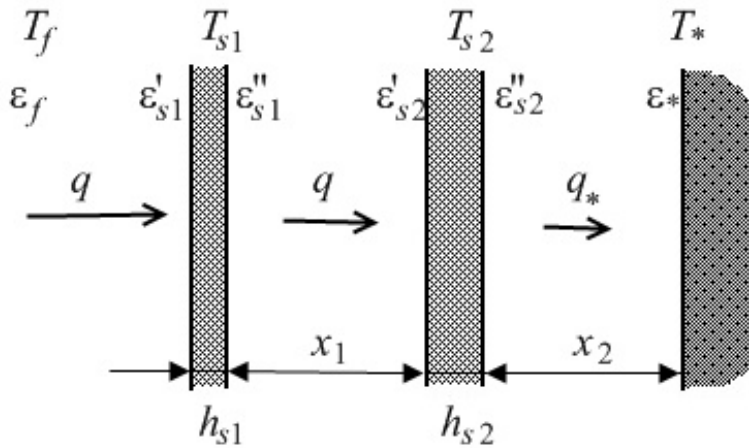


Рис. 7. Схема задачі захисту тіла за допомогою двошарового екрану

Обмеження $q_* \leq q_{cr}$ формулюються як вимога

$$t_{s2} \leq t_{s,cr}, \quad (42)$$

де $t_{s,cr}$ – критична температура внутрішнього шару екрану, що відповідає критичному значенню q_{cr} .

Система звичайних диференціальних рівнянь, що описує процес нагрівання відбиваючих шарів, має вигляд

$$\rho_{s1} \cdot c_{ps1} \cdot h_{s1} \cdot \frac{dT_{s1}}{d\tau} = q_{f,r}(T_f, T_{s1}, \varepsilon_f, \varepsilon'_{s1}) - q_r(T_{s1}, T_{s2}, \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) - q_{con}(T_{s1}, T_{s2}, x_1), \quad (43)$$

$$\rho_{s2} \cdot c_{ps2} \cdot h_{s2} \cdot \frac{dT_{s2}}{d\tau} = q_r(T_{s1}, T_{s2}, \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) + q_{con}(T_{s1}, T_{s2}, x_1) - q_r(T_{s2}, T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*) - q_{con}(T_{s2}, T_*, x_2), \quad (44)$$

де ρ_{s1} , ρ_{s2} , c_{ps1} , c_{ps2} – густини і питомі масові ізобарні теплоємності матеріалу відповідних шарів екрану.

Початкові умови мали вигляд

$$T_{s1}(0) = T_*, \quad T_{s2}(0) = T_*.$$

У дисертації система рівнянь (43), (44) вирішувалася чисельно. Типовий результат зображено на рис. 8. Графіки наочно демонструють суттєве (більш ніж у 2 рази) збільшення часу захисту двошаровим екраном.

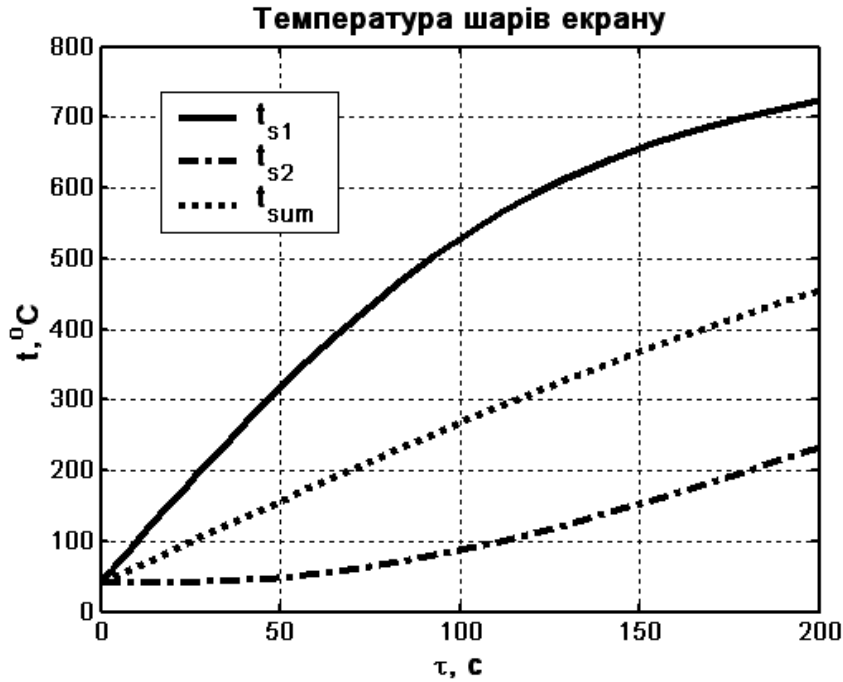


Рис. 8. Графіки залежності температур (t_{s1} і t_{s2}) шарів двошарового екрану від часу захисної дії τ . Кривими зображено графік часової залежності температури (t_{sum}) одношарового екрану, що має сумарні товщини відбиваючого шару та повітряного прошарку: $h_{sum} = h_{s1} + h_{s2}$, $x_{sum} = x_1 + x_2$

У дисертації досліджувався вибір оптимального співвідношення товщини шарів двошарового вогнезахисного екрану із повітряними прошарками. Задача виникає тому, що при використанні двошарового екрану крім обмеження (42) на температуру внутрішнього шару, в якому ми введемо позначку $t_{s.cr} = t_{s.cr.2}$, існує обмеження на температуру зовнішнього шару

$$t_{s1} \leq t_{s.cr.1}, \quad (45)$$

де $t_{s.cr.1}$ - температура втрати захисних властивостей зовнішнім шаром. Загальним часом захисної дії є час, у перебігу якого одночасно виконуються обидві умови. У зв'язку із цим тривалість інтервалу вогнезахисту дорівнює

$$\tau_{cr.tot} = \min[\tau_{cr.1}(h_{s1}, t_{s.cr.1}), \tau_{cr.2}(h_{s2}, t_{s.cr.2})] - \quad (46)$$

мінімальному із часів ($\tau_{cr.1}$ і $\tau_{cr.2}$) нагрівання шарів екрану до відповідних критичних температур.

При фіксації сумарної товщини шарів часи $\tau_{cr.1}$ і $\tau_{cr.2}$ стають функціями товщини одного (наприклад, внутрішнього) шару. Характерний вигляд таких залежностей при різних значеннях температур представлено на рис. 9, де часам $\tau_{cr.2}$ відповідає набір дуг, часам $\tau_{cr.1}$ відповідають лінії, які віялом виходять із правого нижнього кута. Нанесені лінії є ізотермами (значення температур написані поряд із хрестиками).

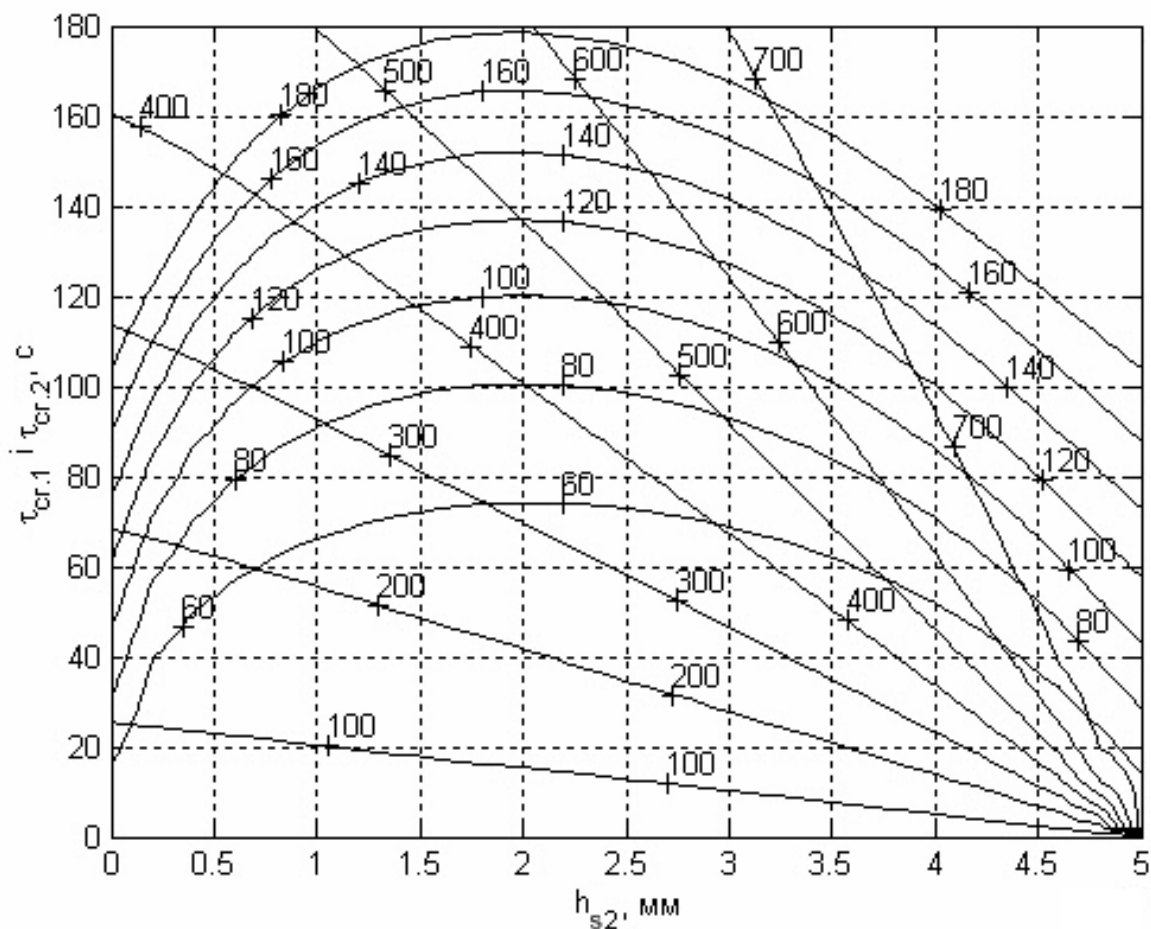


Рис. 9. Графіки залежності критичних часів від товщини внутрішнього шару при різних значеннях критичних температур.

У дисертації побудовано алгоритм вибору товщини внутрішнього шару для кожної пари $t_{s.cr.1}$ і $t_{s.cr.2}$, при якому реалізується максимальний час захисту.

Далі у дисертації проведено моделювання захисної дії одиничного відбиваючого екрану відокремленого від поверхні захисту теплопровідним оптично тонким прошарком, що відповідає варіанту ситуації звичайного теплозахисного костюму. На рис. 10 зображена відповідна просторова схема.

Умова оптичної тонкості прошарку означає, що має місце обмеження

$$\int_0^h \kappa(x) dx \ll 1, \quad (47)$$

де κ - коефіцієнт поглинання променистого потоку, 1/м.

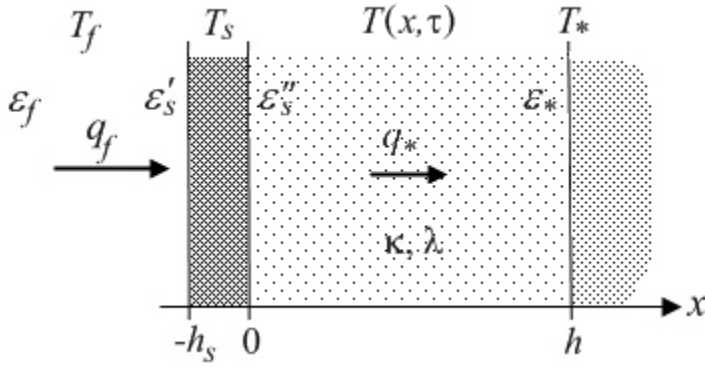


Рис. 10. Просторова схема захисту тіла від теплового впливу полум'я за допомогою відбиваючого екрану з теплопровідним прошарком

Рівняння, що задають процес прогріву, мають вигляд

$$c'_{p.s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_s(\tau)}{d\tau} = q_{f,r}(T_f, T_s(\tau), \varepsilon_f, \varepsilon'_s) - q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon''_s, \varepsilon_*) - q_\lambda(+0, \tau), \quad (48)$$

$$c'_p \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_s(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon''_s, \varepsilon_*, \kappa), \quad 0 \leq x \leq h. \quad (49)$$

Граничні умови: $T(0, \tau) = T_s(\tau)$, $T(h, \tau) = T_*$.

Початкові умови: $T(x, 0) = T_s(0) = T_*$.

Тут щільність теплопровідного потоку тепла задається рівнянням Фур'є

$$q_\lambda(x, \tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \quad (50)$$

а

$$\frac{\partial q_r}{\partial x}(T_1, T, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \kappa) = -2 \cdot \kappa \cdot \sigma \cdot \left\{ \varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \left[\frac{T_1^4}{\varepsilon_{II}(\varepsilon_2, \varepsilon_2)} + \frac{T_2^4}{\varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_1)} \right] - 2 \cdot T^4 \right\} \quad (51)$$

- дивергенція щільності променистого потоку тепла між поверхнями 1 і 2 (T_1 , T_2 і ε_1 , ε_2 - абсолютні температури і ступені чорноти відповідних поверхонь).

Система рівнянь (48), (49) вирішувалася чисельно. З'ясувалося, що до найбільш суттєвого збільшення часу захисту приводить зменшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу прошарку і збільшення товщин відбиваючого шару і прошарку. Наприклад збільшення товщини прошарку з 1 см до 2 см збільшило час захисту приблизно вдвічі з $\tau_{cr} \approx 30$ с до $\tau_{cr} \approx 60$ с.

Збільшення товщини захисту обмежене вагою, тому у дисертації проведено моделювання захисної дії двошарового відбиваючого екрану із поділяючими теплопровідними оптично тонкими прошарками (рис. 11).

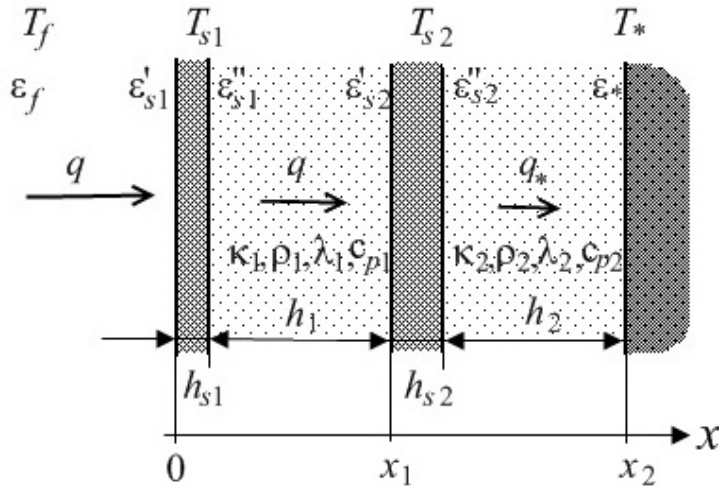


Рис. 11. Просторова схема задачі термічного захисту тіла за допомогою двошарового відбиваючого екрану із теплопровідними оптично тонкими прошарками

Рівняння, що задають процес прогріву даної системи, мають вигляд

$$c'_{p.s1} \cdot h_{s1} \cdot \frac{dT_{s1}(\tau)}{d\tau} = q_{f.r}(T_f, T_{s1}(\tau), \varepsilon_f, \varepsilon'_{s1}) - q_r(T_{s1}(\tau), T_{s2}(\tau), \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) - q_{\lambda 1}(h_{s1} + 0, \tau), \quad (52)$$

$$c'_{p.s2} \cdot h_{s2} \cdot \frac{dT_{s2}(\tau)}{d\tau} = q_r(T_{s1}(\tau), T_{s2}(\tau), \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) + q_{\lambda 1}(x_1 - 0, \tau) - q_r(T_{s2}(\tau), T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*) - q_{\lambda 2}(x_1 + h_{s2} + 0, \tau), \quad (53)$$

$$c'_{p1} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_{s1}(\tau), T(x, \tau), T_{s2}(\tau), \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}, \kappa_1), \quad h_1 \leq x \leq x_1, \quad (54)$$

$$c'_{p2} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_{s2}(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*, \kappa_2), \quad x_1 + h_2 \leq x \leq x_2. \quad (55)$$

Граничні умови:

$$T(h_1, \tau) = T_{s1}(\tau), \quad T(x_1, \tau) = T_{s2}(\tau), \quad T(x_1 + h_2, \tau) = T_{s2}(\tau), \quad T(x_2, \tau) = T_*.$$

Початкові умови: $T(x, 0) = T_{s1}(0) = T_{s2}(0) = T_*$.

Система рівнянь (52) - (55) вирішувалася чисельно. З'ясувалося, що, як правило, час захисної дії двошарового екрану майже в 1,5 рази перевищує захисний час відповідного одношарового екрану з такою ж сумарною товщиною відбиваючого шару і теплопровідного прошарку.

У дисертації також проведено моделювання теплозахисної дії напівважкого теплозахисного костюма. Пакет матеріалів і тканин, які використовуються при створенні таких костюмів має не менш ніж два шари: тепловідбиваючий матеріал верха та внутрішній шар. Внутрішній шар може складатися з двох шарів, один з яких (ближчий до зовнішнього шару) витримує більш високі температури. Саме така ситуація і розглядається. Якщо врахувати, що костюм надівається на одягнену людину і між ним і одягом існує повітряний прошарок, стає необхідним розглядати п'ятишарову систему (три шари костюма + повітряний прошарок + одяг). Схематичне відображення такої

системи показано на рис. 12. Відповідна система рівнянь, які описують ситуацію, будується аналогічно попереднім.

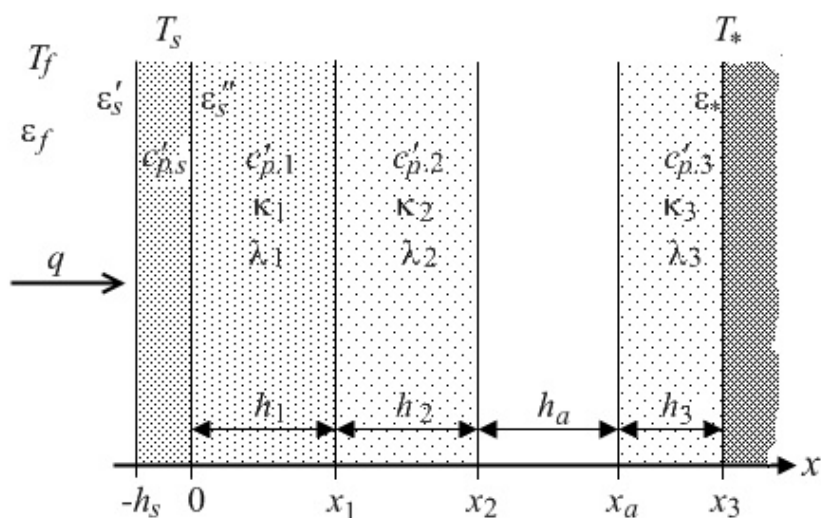


Рис. 12. Просторова схема задачі термічного захисту тіла за допомогою напівважкого вогнезахисного костюму

Останнім у даному розділі проводилось комп'ютерне моделювання дії відбиваючих екранів при пожежі у приміщенні (рис. 13).

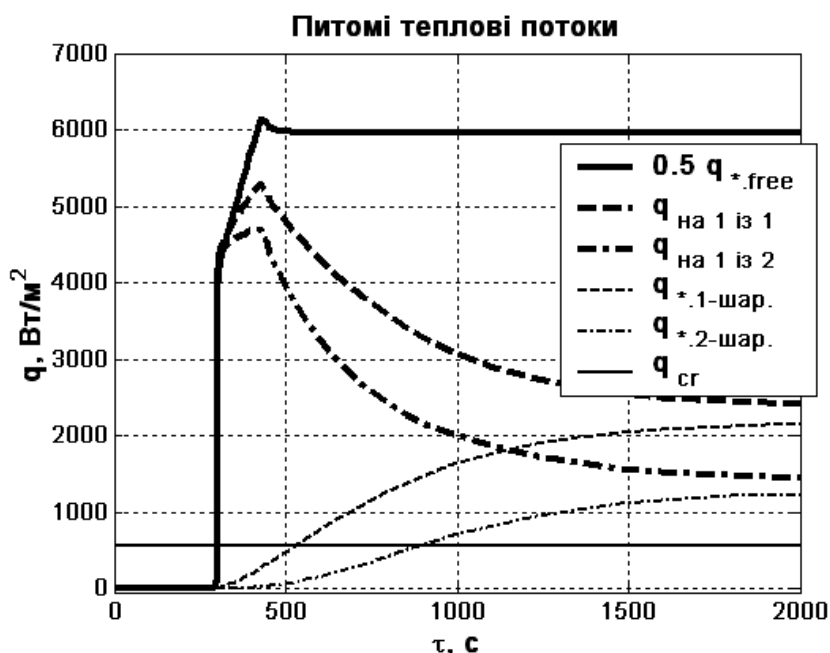


Рис. 13. Графіки залежності питомих теплових потоків від часу пожежі при використанні одно- і двошарових захисних екранів із повітряними прошарками (об'єкт захисту потрапляє у приміщення при $\tau = 300$ с)

Графіки показують, що час захисту двошарового захисного екрану (~600 с) у рази більший ніж у відповідного одношарового екрану (~200 с).

У четвертому розділі «Захист поверхонь тіл покриттям, що случується» досліджувалась захисна дія такого покриття. Початок розділу присвячений розробці загальної математичної моделі цього процесу.

Основою моделі є погляд на речовину покриття, як на суміш простих речовин, якими є як хімічно різні речовини, так і різні агрегатні стани однієї речовини. Склад покриття задається набором масових концентрацій цих речовин $\rho_i(\mathbf{r}, \tau) \equiv dm_i / dV$, де dm_i – маса i -го компонента у малому об'ємі dV .

Концентрації задовольняють n рівнянням матеріального балансу

$$\frac{\partial \rho_i(\mathbf{r}, \tau)}{\partial \tau} + \text{div}[\mathbf{w}_i \cdot \rho_i(\mathbf{r}, \tau)] = R_i, \quad (56)$$

де $R_i(T, \rho)$ – об'ємна щільність швидкості зміни маси i -го компонента, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$, внаслідок його хімічних або фазових перетворень, яка вважається відомою; $\mathbf{w}_i(\mathbf{r}, \tau)$ – швидкість руху i -го компонента відносно поверхні захисту. Усі компоненти, що не є газами, а також газові компоненти в області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 14) рухаються з швидкістю остову $\mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau)$. В області делокалізації газу ($x > x_{del}$) всі газові компоненти рухаються з однаковою швидкістю $\mathbf{w}_i(\mathbf{r}, \tau) = \mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau) + \mathbf{w}_g(\mathbf{r}, \tau)$, де $\mathbf{w}_g(\mathbf{r}, \tau)$ – швидкість руху газу відносно остову, яка визначається градієнтом тиску p у середовищі.

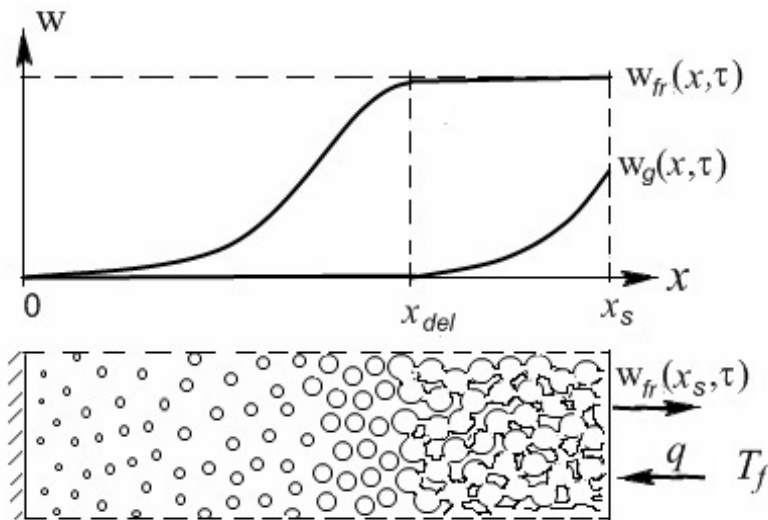


Рис. 14. Графіки залежності швидкості остова та швидкості газового компонента покриття від відстані (x) від поверхні захисту, і просторова схема структури покриття, що спучується; x_{del} – координата границі області делокалізації руху газових компонент

Положення границі області локалізації визначається рівнянням щодо питомого об'єму

$$v(x_{del}, \tau) = v_{del}(T(x_{del}, \tau), p(x_{del}, \tau)), \quad (57)$$

де $v_{del}(T, p)$ – критична величина питомого об'єму покриття, перевищення якої приводить до делокалізації.

Рух каркасу визначається рівнянням спучування

$$\operatorname{div}(\mathbf{w}_{fr}) = \frac{1}{dV} \left[\frac{d}{d\tau} (dV) \right] = \sum_i \left(R_i \cdot v_i + \rho_i \cdot \frac{dv_i}{d\tau} \right), \quad (58)$$

де $v_i \equiv dV_i / dm_i$ - питомий об'єм i -го компонента (dV_i - об'єм i -го компонента в об'ємі dV покриття).

Система рівнянь (56) доповнюється рівнянням енергетичного балансу

$$c'_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{w}_{fr} \cdot \operatorname{grad} T \right) - \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) = - \sum_{j=1}^{n_r} \Delta H_j \cdot R_j - c'_{p.g} \cdot \mathbf{w}_g \cdot \operatorname{grad} T, \quad (59)$$

де $\Delta H_j(T)$ - питомий тепловий ефект j -ої реакції (або фазового перетворення), взятий у розрахунку на одиницю маси j -ої компонента; сума

$\sum_{j=1}^{n_r}$ береться по усім n_r перетворенням, які реалізуються у покритті; $c'_{p.g}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність газової складової покриття, яка дорівнює $c'_{p.g} = \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot c_{p,i}$, де символ $\sum_i^{(g)}$ позначає суму по всіх газових компонентах.

Коефіцієнт теплопровідності покриття оцінюється співвідношенням

$$\lambda(\mathbf{r}, \tau) = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\kappa)} \lambda_i \cdot \frac{dV_i}{dV} = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\kappa)} \lambda_i \cdot v_i \cdot \rho_i, \quad (60)$$

де λ_i - коефіцієнт теплопровідності i -ої конденсованої фази покриття; C_λ - безрозмірний множник, який залежить від структури остова і має величину ~ 1 ; символ $\sum_i^{(\kappa)}$ позначає суму по всім не газовим (конденсованим) компонентам.

Для конкретизації загального опису у дисертації розглядалися варіанти покриття з одним активним компонентом та з трьома активними компонентами. Наведемо результати математичне моделювання вогнезахисної дії покриття, що спучується внаслідок дії трьох активних компонентів.

У даному дослідженні передбачалося дві групи припущень.

1) Склад покриття містить дев'ять компонентів: одну хімічно інертну конденсовану; три активні конденсовані компоненти ($a1$, $a2$, $a3$); останні при нагріванні ендотермічно розкладаються на конденсовану активну ($a2$), дві конденсовані інертні ($b2$, $b3$) і три газові компоненти ($g1$, $g2$, $g3$) за трьома схемами: 1) $a1 \rightarrow a2 + g1$; 2) $a2 \rightarrow b2 + g2$; 3) $a3 \rightarrow b3 + g3$.

2) В області делокалізації газового компонента кількість газового компонента в даній точці покриття визначається не рівняннями гідродинаміки, а умовою сталості тиску у делокалізованій області зразка. По досягненню стану делокалізації подальше спучування покриття стає нехтовно малим і локальний

коефіцієнт спучування k_V фіксується на своєму максимальному значенні $k_{V,max}$. Винос надлишку утворених газів проходить настільки швидко, що можна при цьому процесі нехтувати теплообміном між газовим потоком і спученим матеріалом. Це дозволяє, не визначаючи швидкість руху газового потоку, врахувати пов'язаний з газом тепловий потік від зони утворення газу зміною питомої теплоти утворення газу.

Модель досліджувалась чисельно. Вона була адоптована до сілікатовмісного покриття СК-1. На рис. 15 і рис. 16 наведено експериментальні та модельні залежності температур від часу вогневої дії. Відносне розходження цих результатів лежить у межах 20%, що є вагомим аргументом на підтримку адекватності розробленого опису.

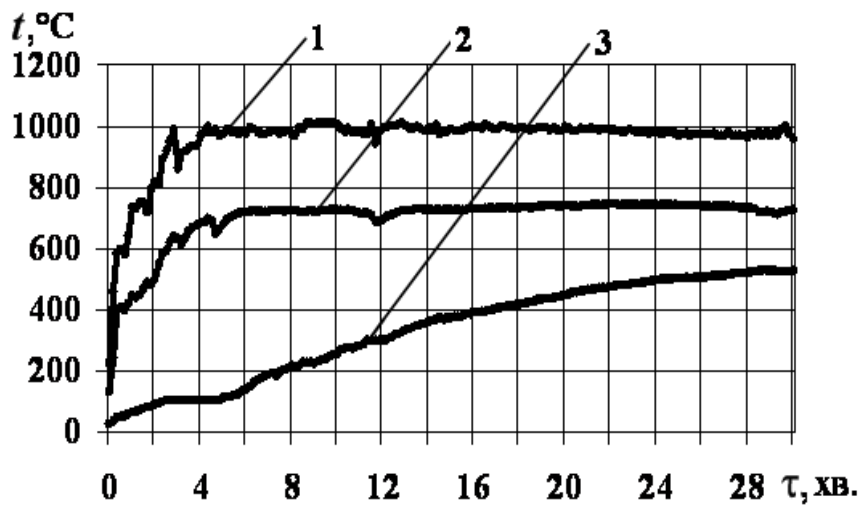


Рис. 15. Експериментальні залежності температур від часу вогневої дії: 1 – полум'я; 2 – поверхні «СК-1»; 3 – деревини.

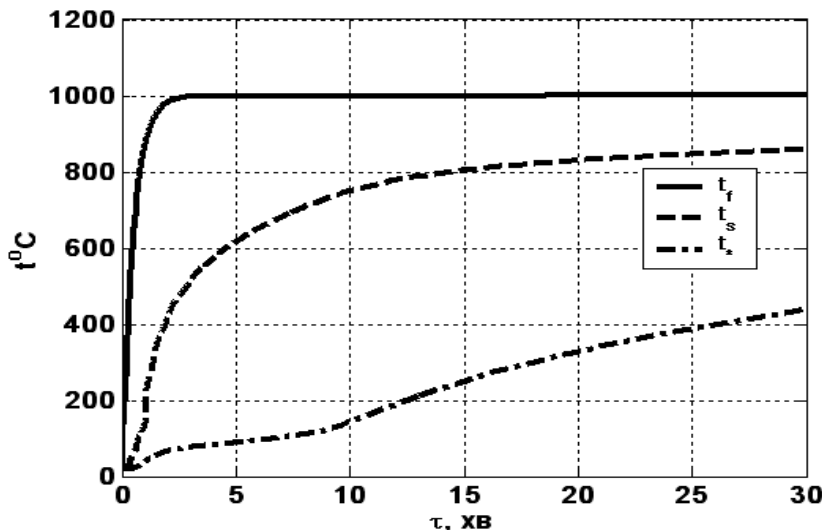


Рис. 16. Графіки модельної залежності температур від часу вогневого впливу: t_f – полум'я; t_s – зовнішньої поверхні покриття; t_* – деревини.

Далі буде розглянута група питань, яка пов'язана з масопереносом.

У п'ятому розділі «Захист поверхонь неоднорідним покриттям» розглянуто захист поверхонь, пов'язаний із використанням матеріалів, які або суттєво змінюються у просторі у процесі захисту, або від самого початку мають неоднорідну структуру.

Першим йде розробка математичного опису висихання гелю при пожежі.

На рис. 17 зображена просторова схема цієї задачі прогріву і масопереносу, де в області $x_0 < x < x_1$ знаходиться сухий гелю (ксерогелю), а області $x_1 < x < x_*$ - вологий гелю, δ_T і δ_D є, відповідно, довжинами перехідних областей температури газового середовища і концентрації водяної пари у поверхні покриття

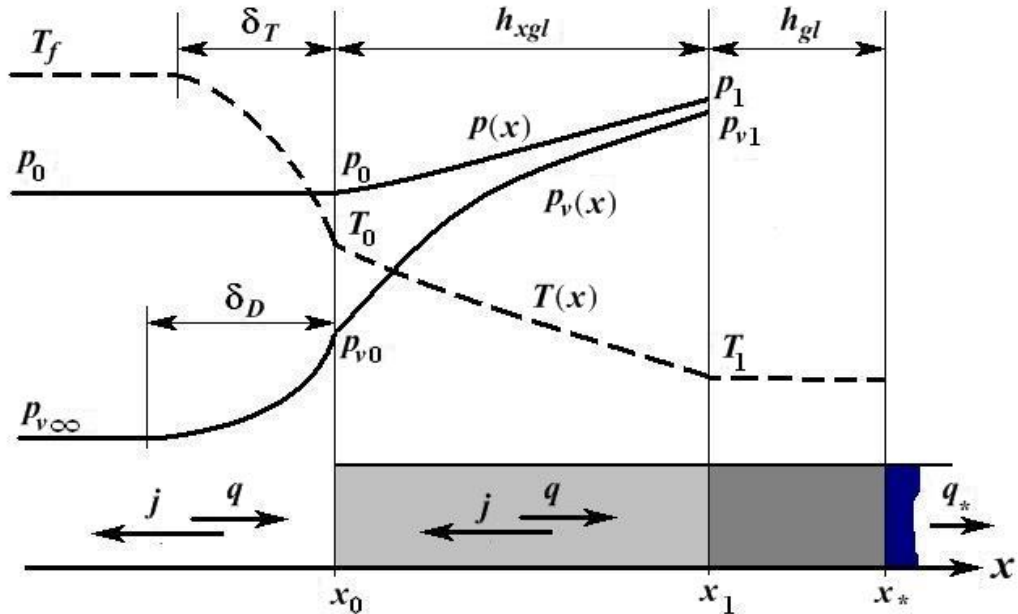


Рис. 17. Просторова схема прогріву і масопереносу

Вихідні рівняння, які задають процес, мають наступний вигляд.

Рівняння стану газових компонентів ($i = v, g$)

$$p_i(x) = \varphi_i(x) \cdot R \cdot T(x), \quad (61)$$

де φ_i , p_i - мольні концентрації і парціальні тиски компонентів; R - універсальна газова стала.

Вираз щільності молярних потоків компонент суміші

$$j_{\mu,i}(x) = -D \cdot \frac{\partial \varphi_i(x)}{\partial x} + w(x) \cdot \varphi_i(x), \quad (62)$$

де $D(T)$ - коефіцієнт взаємної дифузії компонент; w - швидкість переносу газової суміші, як цілого.

Середня по перерізу щільність потоку енергії в середовищі

$$q(x) = -\lambda \cdot \frac{\partial T(x)}{\partial x} + k \cdot [j_{\mu,v} \cdot H_{\mu,v}(T) + j_{\mu,g} \cdot H_{\mu,g}(T)], \quad (63)$$

де $\lambda(T)$ - коефіцієнт теплопровідності середовища (у газовому середовищі за межами покриття $\lambda = \lambda_{free}$, у пористому середовищі ксерогеля $\lambda = \lambda_{xgl}$); k - частка площі перерізу вільного потоку у загальній площі перерізу матеріалу; $H_{\mu,v}$, $H_{\mu,g}$ - питомі молярні ентальпії водяної пари і сухого газу, відповідно.

У вільному просторі $p_v(x) + p_g(x) = p_0 = const$, а в межах ксерогеля

$$w(x) = -B(T) \cdot \frac{\partial p(x)}{\partial x}, \quad B(T) = C_w \cdot \frac{d_c^2}{\eta} \quad (64)$$

де d_c - середній діаметр каналу протікання (пори); η - коефіцієнт динамічної в'язкості газового середовища; C_w - безрозмірний множник ~ 1 .

Граничними умовами до рівнянь (61)-(63), крім неперервності потоків енергії і речовини, є неперервність температури і концентрацій (парціальних тисків) компонентів на границях. Крім того, задається температура та тиски у газовому середовищі вдалині від поверхні ксерогеля тобто при $x \rightarrow -\infty$:

$$T(x) = T_f, \quad p_v(x) = p_{v,\infty}, \quad p_g(x) = p_0 - p_{v,\infty}. \quad (65)$$

У середовищі, яке містить газ, задача розглядається у квазістатичному наближенні. Щільність потоку пари $j = j_v = \mu_v \cdot j_{\mu,v}$ задовольняє рівнянню:

$$j = g_w \cdot \rho_{gl} \cdot \frac{dh_{gl}}{d\tau}, \quad (66)$$

де h_{gl} - товщина шару гелю; μ_v - молярна маса водяної пари; ρ_{gl} - густина гелю; g_w - масова частка здатною до випаровування води у складі гелю.

Показано, що опис процесу висихання за умови термічної тонкості шару гелю спрощується. Він зводиться до системи 2-ох звичайних диференціальних і 1-го алгебраїчного рівнянь для 4-х незалежних змінних (j , T_1 , h_{gl} , q_*), де T_1 - температура гелю, q_* - питомий потік тепла, що уходить у тверду основу. До названих рівнянь крім рівняння (66) відносяться рівняння (67) і (68):

$$j = -\frac{1}{r - \Delta H_w} \cdot \left[\frac{T_f - T_1}{\frac{\delta_T}{\lambda_{free}} + \frac{k_L \cdot (h_0 - h_{gl})}{\lambda_{xgl}}} - \rho_{gl} \cdot c_{p,gl} \cdot h_{gl} \cdot \frac{dT_1}{d\tau} - q_* \right], \quad (67)$$

$$j = \frac{\mu_v \cdot \frac{P_0}{R}}{\delta_D \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{free} + \frac{k_L \cdot (h_0 - h_{gl})}{k} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{xgl}} \cdot \ln \left(\frac{P_0 - P_{v,\infty}}{P_0 - \frac{j}{k} \cdot k_L \cdot (h_0 - h_{gl}) \cdot \omega - p_s(T_1)} \right). \quad (68)$$

у яких ΔH_w - енергія утворення гелю із ксерогеля та води, розрахована на одиницю маси потрібної води; $c_{p,gl}$ - питома ентальпія води; r - питома теплота пароутворення води при температурі гелю; h_0 - початкова товщина шару гелю; риска над виразом з D означає усереднення такого виразу по дифузійному шару; риска над відповідним коефіцієнтом теплопровідності означає усереднення його по температурному шару; k_L - коефіцієнт лінійного розширення (стиску) гелю при висиханні у ксерогель; $p_s(T)$ - тиск насиченої пари води у поверхні гелю; параметр ω має сенс характерного зворотнього часу.

Далі у розділі побудовано математичну модель процесу охолодження термічно товстого тіла нанесеним гелевим шаром, який включає два послідовних етапи: А) прогрів вологого гелю до температури «кипіння» з наступним «википанням» рідкої фази гелю із утворенням сухого залишку; Б) охолодження масивного тіла з відводом тепла у зовнішнє середовище крізь утворений теплоізолюючий шар сухого залишку гелю; що дозволило отримати аналітичну залежність температури охолоджуваної поверхні від часу після утворення на ній шару вологого гелю.

Після цього на основі законів тепло- і масообміну розроблено математичну модель процесу випаровування крапель водного розчину солі у високотемпературному газовому середовищі, а також побудовано комп'ютерну програму, що моделює процес, спираючись на яку зроблена оцінка максимальної дальності польоту краплі, за якої забезпечуються умови надійного гелеутворення на поверхні ТГМ.

Наступним розглянута проблема локалізації ландшафтних пожеж за допомогою захисних смуг, покритих гелеутворюючими складами. Для цього вирішено питання щодо величини максимального питомого променистого теплового потоку $q_{max}(x)$, який на рівні землі на заданій відстані x може створити факел ландшафтної пожежі, який має форму широкої полоси висотою h . Показано, що

$$q_{max}(x) = q_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{x}\right)^2}}}, \quad q_0 = \varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_f^4, \quad (69)$$

де ε_f і ε - ступені чорноти факелу полум'я і опромінюваного тіла, відповідно; T_f - середня абсолютна температура поверхні факелу, К;

На основі формули (69) отримано вираз мінімальної безпечної ширини x_{cr} вогнезахисної смуги

$$x_{cr} = \frac{h}{2} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \psi_{cr}^2}{\psi_{cr} \cdot \sqrt{1 - \psi_{cr}^2}} \approx \frac{h}{2 \cdot \psi_{cr}}, \quad \psi_{cr} = \frac{q_{cr}}{q_0}, \quad (70)$$

де q_{cr} - критичне значення питомого потоку.

Співвідношення (70) дозволяє оцінити масу гелю, достатню для захисту 1-го метру довжини ділянки смуги, що локалізує пожежу. Зроблене порівняння з водою показало приблизно 10 кратний вигреш по масі при застосуванні гелю. Вигреш виникає в основному через низький коефіцієнт використання води.

Далі у розділі було розглянуто захист від небажаного масопереносу.

Досліджувалося сповільнення масопереносу шаром зернистого покриття. Було проведено математичне моделювання неізотермічної дифузії пари горючої рідини крізь зернисте покриття (рис. 18).

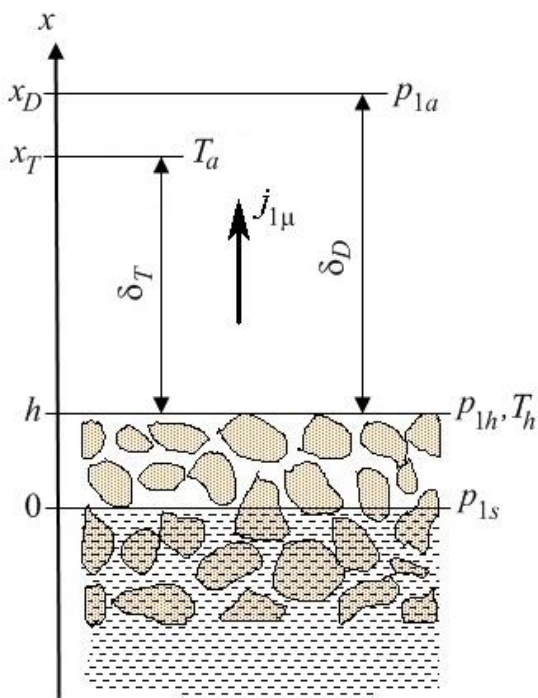


Рис. 18. Просторова схема задачі переносу пари пального крізь шар пористого покриття. Заштриховано область, у якій перебуває рідина. Характеристики горючої рідини та її пари відзначаються індексом «1»; h - товщина шару зернистого покриття з газовим наповненням; $p_{1s} = p_{1s}(T(0, \tau))$ - тиск насиченої пари пального; $j_{1\mu}$ - питомий молярний потік пари горючої рідини; T_h і T_a - абсолютна температура середовища на рівні поверхні зернистого покриття і у зовнішньому повітряному просторі, К.

Молярні концентрації φ_i і питомі молярні потоки $j_{i\mu}$ компонент задовольняють рівнянням ($i = 1$ - пальне, $i = 2$ - повітря): (61), (62),

$$p = p_1(x, \tau) + p_2(x, \tau) = const. \quad (71)$$

$$c'_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = -\frac{\partial}{\partial x} [q(x, \tau)], \quad (72)$$

де c'_p - питома об'ємна ізобарна теплоємність середовища;

$$q(x, \tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + j_{1\mu} \cdot H_{1\mu}(T) + j_{2\mu} \cdot H_{2\mu}(T), \quad (73)$$

де $\lambda(T)$ - коефіцієнт теплопровідності середовища; $H_{i\mu}(T)$ - молярна ентальпія i -го газу. У чисто повітряному середовищі ($h < x$) у праву частину співвідношення (73) слід додавати питомий променистий потік q_r .

Граничні умови – неперервності температури, дійсних концентрацій, потоків енергії і потоків компонент.

У дисертації проведено усереднення опису по інтервалах часу $\Delta\tau$:

$$\tau_{D.gr} \leq \Delta\tau \ll \tau_{T.gr}, \quad (74)$$

де $\tau_{D.gr} = \frac{h^2}{D_{gr}}$ - характерний час дифузії пари крізь зернистий шар, а D_{gr} -

коефіцієнт дифузії пари у повітрі крізь зернистий шар по його порожнинах;

$\tau_{T.gr} = \frac{h^2}{a_{gr}}$ - характерний час прогріву зернистого шару, а a_{gr} - коефіцієнт

температуропровідності зернистого шару. При такому огрубінні опису масоперенос у зернистому шарі можна розглядати як стаціонарний процес у повільно мінливому полі температур.

Питомі потоки газів стануть однорідними, при цьому $j_{2\mu} = 0$ і

$$j_{1\mu}(h) = \frac{p}{R} \cdot \frac{1}{h \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{gr} + \delta_D \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_a} \cdot \ln\left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1s}}\right), \quad (75)$$

де риска над величиною означає середнє значення величини на відповідній просторовій ділянці (D_a - коефіцієнт дифузії пари у вільному повітрі), або

$$j_{1\mu}(h) = \frac{1}{k_{gr.a} + 1} \cdot j_{1\mu}(0), \quad k_{gr.a}(h) \equiv \frac{h \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{gr}}{\delta_D \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_a} \approx \frac{h}{\delta_D} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}. \quad (76)$$

Зв'язок тиску пари горючого над поверхнею покриття із тиском пари (p_{1s} і p_{1a}) на границях системи набуває вигляд

$$p_{1h} = p - (p - p_{1a})^{\frac{k_{gr.a}}{1+k_{gr.a}}} \cdot (p - p_{1s})^{\frac{1}{1+k_{gr.a}}}. \quad (77)$$

Рівняння енергетичного балансу мають більш звичний вигляд. Так у зернистому шарі з газом

$$c'_{p.gr.g} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{gr.g} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad 0 < x < h, \quad (78)$$

де $c'_{p.gr.g}$ і $\lambda_{gr.g}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності зернистого середовища з газовими зазорами; $c_{1p\mu}$ - молярна ізобарна теплоємність пари пального.

У області зернистого середовища із рідким паливом

$$c'_{p.gr.l} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{gr.l} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x < 0, \quad (79)$$

де $c'_{p.gr.l}$ і $\lambda_{gr.l}$ - відповідно, питома об'ємна ізобарна теплоємність і коефіцієнт теплопровідності зернистого середовища із рідким паливом.

Граничними умовами на границі газу з рідким паливом ($x=0$) є неперервність температури ($T(-0, \tau) = T(+0, \tau)$) і пов'язана з випаровуванням зміна теплового потоку

$$-\lambda_{gr.l} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\lambda_{gr.g} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=+0} + j_{1\mu} \cdot \Delta H_{1\mu.l.g}(T(0, \tau)), \quad (80)$$

де $\Delta H_{1\mu.l.g}(T)$ - молярна теплота пароутворення пального.

Залежність (77) надає можливість визначити критичну товщину зернистого шару h_{cr} , яка забезпечує неможливість запалення пального. Із умови

небезпеки щодо запалення $\varphi_1(h) = \frac{P_{1h}}{R \cdot T_h} \geq \varphi_{1.LICL}$, де $\varphi_{1.LICL}$ - нижня

концентраційна межа запалення, витікає, що

$$h_{1.cr}(T) = \frac{l}{Nu_D} \cdot \frac{D_{gr}}{D_a} \cdot \frac{\ln\left(\frac{P - P_{1.LICL}}{P - P_{1s}(T)}\right)}{\ln\left(\frac{P - P_{1a}}{P - P_{1.LICL}}\right)}, \quad (81)$$

де $P_{1.LICL}$ - тиск пари пального, що має концентрацію $\varphi_{1.LICL}$.

Згідно з залежністю (81) критична товщина захисного шару при наближенні до температури кипіння пального суттєво зростає (рис. 19). Так у

випадку октану при зміні температури від 20°C до його температури кипіння 125 °C вона збільшується від 0,07 м до 57,7 м.

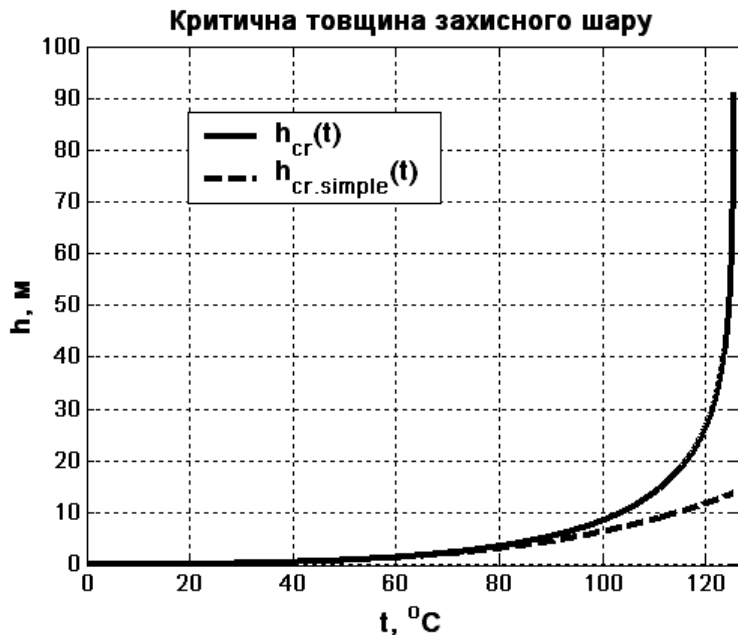


Рис. 19. Графіки критичної (щодо спалаху октану) товщини захисного шару, як функції температури, у випадках загальної та спрощеної залежності.

На завершення розділу побудована математична модель процесу нестационарної ізотермічної дифузії пари горючої рідини крізь двохшарове покриття, яке складається із шару зернистого покриття, що виступає над поверхнею рідини, і розташованого на ньому шару гелю. Ця модель у квазістационарному наближенні описує масоперенос пари пального за межами гелієвого шару алгебраїчними співвідношеннями, а масоперенос крізь гелієвий шар - рівнянням нестационарної дифузії з граничними умовами 3-го роду. Зроблені у рамках моделі оцінки демонструють суттєве (у рази) зменшення потоку пари при товщині суцільного шару гелю навіть меншій за 1 мм.

У шостому розділі «Рекомендації щодо вибору покриттів і екранів для захисту від теплового впливу пожежі» наведено рекомендації, що стосуються визначення межі вогнестійкості, щодо досягнення критичного рівня температури поверхні (для неживих об'єктів), або питомого теплового потоку, що потрапляє на поверхню (живих об'єктів).

Рекомендації формулюються у вигляді алгоритмів дії з використанням або сертифікату випробувань відповідного вогнезахисного покриття, або відповідної ПЕОМ програми.

Так при використанні інертних поглинаючих покриттів комп'ютерні програми вирішують систему рівнянь нестационарної теплопровідності у випадку площинної симетрії і температури гарячого середовища, що змінюється за одним з 3-ох варіантів:

1) за формулою стандартної пожежі

$$t_f(\tau) = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + t_0, ^\circ\text{C}, \quad (82)$$

у яку час τ підставляється у хвилинах;

- 2) за інтегральною моделлю пожежі у приміщенні;
- 3) за формулою

$$t_f(\tau) = t_{\max} - (t_{\max} - t_0) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_f}\right), ^\circ\text{C}, \quad (83)$$

де τ_f - характерний час наближення температури газового середовища до свого асимптотичного значення t_{\max} .

У випадку захисту термічно тонкого тіла інертним поглинаючим покриттям надано алгоритм рішення за допомогою або сертифікату на вогнезахисне покриття або ПЕОМ програм. На рис. 20 наведені типові модельні температурні залежності.

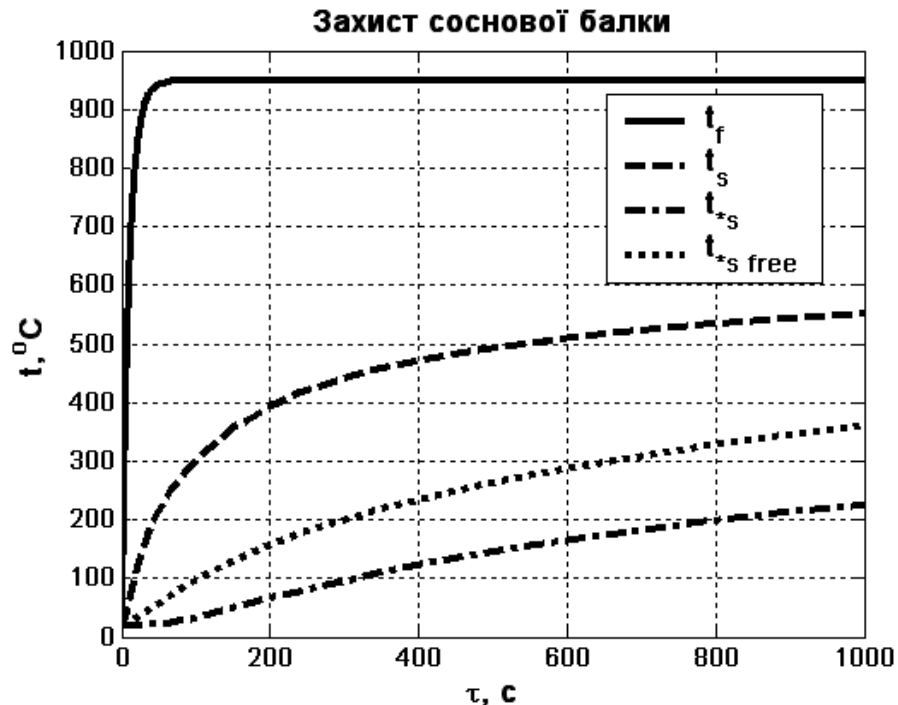


Рис. 20. Графіки залежності від часу температури поверхонь при тепловому впливі на захищену поглинаючим покриттям дерев'яну балку

У випадку захисту поверхонь покриттям, що спучується, надано алгоритм рішення за допомогою або сертифікату на вогнезахисне покриття, або при наявності моделі за допомогою ПЕОМ програм. Типовий графік модельної залежності температур від часу у випадку покриття СК-1 відображено на рис. 16.

У випадку захисту тіла відбиваючими екранами надано алгоритм рішення за допомогою ПЕОМ програм (захист одно- та двошаровими екранами з повітряними або теплопровідними прошарками). Типова модельна температурна залежність відображена на рис. 8. Більш наочна (щодо виконання умови безпеки) типова залежність щільності теплового потоку наведена на рис. 21.

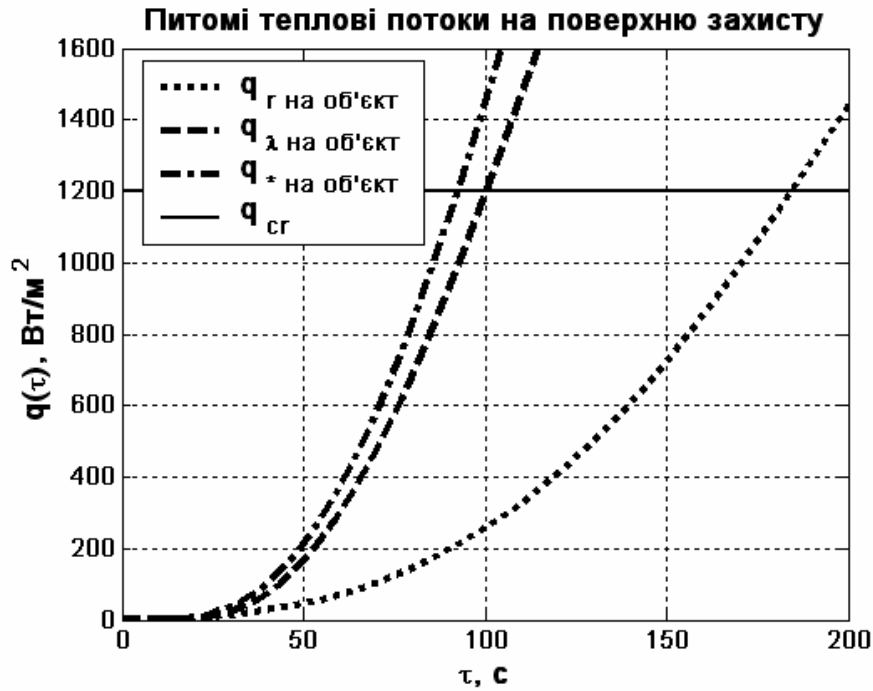


Рис. 21. Графіки залежності питомих теплових потоків від часу теплового впливу у системі з двошаровим відбиваючим екраном з теплопровідними оптично тонкими прошарками

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеним науковим дослідженням, одержані нові науково обґрунтовані результати, які у сукупності забезпечують вирішення актуальної проблеми щодо розвитку наукових основ використання покриттів і екранів для захисту об'єктів від теплового впливу пожежі шляхом розробки комплексу математичних моделей для опису процесів захисту, виявлення їх особливостей, а також розробки алгоритмів і програмного забезпечення для вирішення прикладних задач захисту.

1. Знайдено аналітичне рішення задачі нестационарної теплопровідності по визначенню залежності від часу температури захищеної інертним покриттям поверхні термічно товстого тіла за великих (у порівнянні з одиницею) коефіцієнтах активності (що відповідає захисту металевій поверхні неметалевим покриттям) та малих критеріях Біо, яке забезпечує одержання аналітичних прогнозних оцінок критичних значень параметрів пожежної безпеки (межі вогнестійкості, рівня температури гарячого середовища), виходячи із критичного рівня температури поверхні захищеного тіла.

2. Знайдено аналітичне рішення задачі нестационарної теплопровідності по визначенню температур при нагріванні плоского шару термічно тонкого тіла (ТТТ) крізь плоске теплопровідне інертне покриття довільної товщини, що має вигляд ряду, доданки якого експоненційно убивають з часом. Отримано формули розрахунку всіх доданків цього ряду і показано, що основною відмінністю даної задачі від відомої ситуації одностороннього прогріву одинарної плоскої пластини є залежність не від двох критеріїв (Біо та Фур'є), а від

чотирьох (двох критеріїв Біо, критерію Фур'є та відношення поверхневих теплоємностей ТТТ і покриття), а також доказано, що для більшості розрахунків достатньо двох перших членів ряду, що дозволяє виявити явний вираз залежності критичних значень параметрів пожежної безпеки (межі вогнестійкості, рівня температури гарячого середовища) від критичного рівня температури ТТТ.

3. На основі порівняння результуючих коефіцієнтів пропускання теплового потоку поглинаючими покриттями з однакового матеріалу, з однаковою питомою вагою та однорідною і випадково-неоднорідною товщинами показано, що дія випадково-неоднорідного покриття суттєво відрізняється від дії відповідного однорідного покриття тільки у разі сумісного виконання двох умов: 1) не малій величині варіацій товщини покриття (σ) у порівнянні з середнім значенням товщини; 2) не малим значенням варіаційного критерію Біо ($Bi = \alpha \cdot \sigma / \lambda \geq 1$, де α - коефіцієнт тепловіддачі; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття).

4. Побудовано математичні описи захисної дії одношарового і двошарового тепловідбиваючих екранів із повітряними прошарками, особливістю яких є те, що вони зводяться до системи звичайних диференціальних рівнянь залежності температур екранів від часу, для рішення яких в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні розроблено алгоритми та побудовані відповідні комп'ютерні програми, а також знайдені аналітичні рішення спрощеної задачі прогріву таких екранів та вказана область застосування цих рішень. Показано, що час захисної дії двошарового екрану у $\sim 1,5-2$ рази перевищує час захисту відповідним одношаровим екраном сумарної товщини.

5. Розроблено алгоритм знаходження співвідношення товщини шарів двошарового тепловідбиваючого екрану із повітряними прошарками, шари якого зроблені з однакового матеріалу, яке забезпечує максимальний час вогнезахисту при фіксованій сумарній товщині шарів і обмеженнях на температури внутрішнього і зовнішнього шару.

6. Побудовано математичний опис захисної дії одношарових і двошарових відбиваючих теплозахисних екранів з теплопровідними прошарками, особливістю якого є врахування внутрішнього променистого теплового потоку у наближенні оптично тонкого шару, а також розроблені алгоритми і відповідні комп'ютерні програми, що вирішують системи рівнянь опису в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні.

7. Розроблено математичну модель, яка здатне до спучування покриття розглядає як суміш речовин із змінним складом, збільшення кількості і розширення газової компоненти якої у місцях знаходженні остову у рідкому стані приводить до спучування, особливістю якої є те, що вона єдиним образом описує процеси теплопереносу, термічного розкладання, випаровування, спучування і уносу маси, а також розроблено алгоритми і комп'ютерні програми, що моделюють захист в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні. На прикладі здатного до спучування покриття СК-1

показано збіг із точністю ~20% експериментальних результатів із модельними у випадку із 3-ма активними компонентами.

8. На основі законів тепло- і масообміну побудована математична модель теплозахисної дії вологого гелю, у якій процес висихання гелю розглядається з врахуванням масопереносу водяної пари крізь прошарок сухого гелю, що утворюється, особливістю якої є зведення моделі у випадку термічно тонкого шару гелю до системи звичайних (а не у частинних похідних) диференціальних рівнянь відносно часу.

9. На базі оцінки променистого теплового потоку, що падає від факелу ландшафтної пожежі, який має форму довгої смуги, на довільно орієнтовані елементи поверхні горючого матеріалу, побудована модель захисної дії покритої шаром гелю захисної смуги, що дало можливість оцінити необхідну для локалізації пожежі витрату гелеутворюючого складу, і встановити, що вона складає величину майже у 10 разів меншу ніж відповідна витрата води.

10. Побудовано математичну модель процесу нестационарної неізотермічної дифузії пари горючої рідини крізь шар зернистого покриття, що виступає над поверхнею рідини, особливістю якої є те, що випаровування рідини описується у квазістационарному наближенні, через що поле концентрацій задається алгебраїчними співвідношеннями, а температурне поле описується модифікованим рівнянням нестационарної теплопровідності. Показано, що модель дозволяє прогнозувати можливість спалаху пари пального при різних значеннях температури і товщини захисного покриття, зокрема виявлено, що критична, щодо спалаху, товщина захисного шару різко зростає при наближенні температури пального до температури кипіння, зокрема при використанні октану при зростанні температури від 20°C до його температури кипіння 125°C вона збільшується від 0,07 м до 57,7 м.

11. Розроблено практичні рекомендації, алгоритми і комп'ютерні програми щодо вибору покриттів (із поглинаючих або здатних до спучування матеріалів) та відбиваючих екранів для захисту об'єктів від теплового впливу пожежі.

Список публікацій здобувача в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у вітчизняних наукових фахових виданнях

1. Писарский М.О., Шаршанов А.Я. Моделирование динамики небезопасных факторов пожара в помещении // Проблемы пожарной безопасности. - 2002. - Вып. 11. - С. 174-177.

2. Писарский М.А., Шаршанов А.Я. Особенности моделирования скорости выгорания // Проблемы пожарной безопасности. - 2004. - Вып. 15. - С. 168-171.

3. Шаршанов А.Я. Расчет защиты массивного тела теплозащитным покрытием // Проблемы пожарной безопасности. - 2006. – Вып. 20. - С. 254-258.

4. Абрамов Ю.А., Киреев А.А, Шаршанов А.Я. Локализация чрезвычайных ситуаций с помощью гелеобразующих составов (на примере крупных пожаров) //

Проблеми надзвичайних ситуацій: Зб. наук. пр. АЦЗ України. Вип. 6. – Харків: Фоліо, 2007. с.3-11.

5. Шаршанов А.Я. Расчет защиты термически тонкого тела теплозащитным покрытием // Проблемы пожарной безопасности. – 2007. - Вып. 21. - С. 301-305.

6. Шаршанов А.Я. Теоретические аспекты высыхания геля при пожаре // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. - Вып. 23. - С. 221-229.

7. Шаршанов А.Я. Математическая модель вспучивающихся огнезащитных покрытий // Проблемы пожарной безопасности. – 2011. – Вып. 30. – С. 273-280.

8. Шаршанов А.Я., Чернуха А.А. Математическое моделирование огнезащитного действия вспучивающегося покрытия СК-1 // Проблемы пожарной безопасности. – 2012. - Вып. 31. - С. 230-236.

9. Шаршанов А.Я., Чернуха А.А. Моделирование огнезащитного действия вспучивающегося неорганического покрытия // Проблемы пожарной безопасности. – 2012. - Вып. 32. – С. 237-244.

10. Шаршанов А.Я., Пономаренко Р.В., Поляков И.А. Создание условий для защиты пострадавшего от опасных факторов пожара // Проблемы пожарной безопасности. - 2014. - Вып. 36. – С. 272-278.

11. Шаршанов А.Я. Моделирование действия двухслойного огнезащитного экрана // Проблемы пожарной безопасности. - 2015. - Вып. 37. - С. 235-240.

12. Киреев А.А., Бондаренко С.Н., Шаршанов А.Я. Исследование огнезащитных свойств гелеобразных слоев, нанесенных на резину // Проблемы пожарной безопасности. - 2015. - Вып. 38. - С. 73-76.

13. Шаршанов А.Я. Выбор оптимального соотношения толщин слоев двухслойного огнезащитного экрана // Проблемы пожарной безопасности. - 2016. - Вып. 39. - С. 274-280.

14. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Шаршанов А.Я., Чернуха А.А. Моделирование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам горючих жидкостей // Проблемы пожарной безопасности. - 2016. - Вып. 40. - С. 78-83.

15. Шаршанов А.Я. Замедление массопереноса зернистой средой // Проблемы пожарной безопасности. - 2017. - Вып. 41. - С. 206-210. (*Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index -ResearchBib*)

16. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Шаршанов А.Я., Савченко А.В., Ковалев А.А. Экспериментальное исследование влияния характеристик гелеобразного слоя на его изолирующие свойства по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей // Проблемы надзвичайних ситуацій. - 2017. - Вып. 26. - С. 43-48. (*Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus*).

17. Шаршанов А.Я. Теплозащитное действие случайно-неоднородного слоя // Проблемы пожарной безопасности. – 2018. - Вып. 43. - С. 189-194. (*Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index -ResearchBib*)

18. Dadashov I.F., Kireev A.A., Kirichenko I.K., Kovalev A.A., Sharshanov A.Ya. Simulation of the insulating properties of two-layer material // Functional materials. - 2018. -V. 25. – N. 4. - P. 774-779. (*Index Scopus*).

19. Шаршанов А.Я. О критериях пожарной безопасности // Проблемы пожарной безопасности. – 2018. - Вып. 44. - С.176-182. (*Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index -ResearchBib*)

20. Шаршанов А.Я. Математическое моделирование неизотермической диффузии паров горючей жидкости сквозь зернистое покрытие // Проблемы

пожарной безопасности. – 2019. - Вып. 45. - С. 179-192. (*Ulrich's Periodicals Directory, Academic Research Index -ResearchBib*)

Статті у міжнародних фахових виданнях

21. Шаршанов А.Я., Абрамов Ю.А., Киреев А.А. Оценка оптимального размера капель огнетушащих гелеобразующих систем // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. - № 2(18). - С. 42-49.
22. Шаршанов А.Я., Абрамов Ю.А., Киреев А.А. Моделирование поведения капель компонентов гелеобразующих систем в высокотемпературной области // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. - Т. 22. - № 11. - С. 57-63.
23. Шаршанов А.Я., Абрамов Ю.А., Киреев А.А. Моделирование охлаждения термически толстого тела огнетушащими гелеобразующими составами // Чрезвычайные ситуации. Образование и наука. - 2013. - Т. 8. - № 2. - С. 65-71.
24. Шаршанов А.Я., Абрамов Ю.А., Киреев А.А. Охлаждение массивного тела теплозащитным гелеобразующим составом // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. - 2013. - № 4(32). - С. 134-142.
25. Шаршанов А.Я. Расчет предела огнестойкости термически тонкого тела, защищенного поглощающим покрытием. // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2019. - Т. 3. - № 4. – С. 400-411.

Патент

26. Патент № 133144 UA. Спосіб гасіння горючих або легкозаймистих рідин плавучою зернистою системою / Дадашов І.Ф., Киреев О.О., Трегубов Д.Г., Шаршанов А.Я., Корчагіна А.П. – заявник і патентовласник НУЦЗУ. – № 201810297, Заявл. 17.10.2018; Надр. 25.03.2019; Бюл. № 6. 4 с.

Монографія

27. Чернуха А.А., Киреев А.А., Шаршанов А.Я. Огнезащита древесины с помощью гелеобразующих составов на основе силикатов. – Харьков: НУГЗУ, 2015. – 114 с.

Інші публікації

28. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі: Навчальний посібник. - Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.
29. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води у пожежній справі. Навчальний посібник. - Харків, 2004. - 252 с.
30. Шаршанов А.Я., Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у цивільній безпеці: Навчальний посібник. - Харків: НУЦЗУ, КП “Міська друкарня”, 2013. – 380 с.

Матеріали науково-технічних конференцій

31. Шаршанов А.Я. Моделирование огнезащитного действия вспучивающегося покрытия // Материалы III Всерос. научно-практ. конференции “Пож. безоп.: проблемы и перспективы.” Часть 1., Воронеж. – 2012. – С. 267-269.
32. Шаршанов А.Я., Ромащенко О.А. Моделирование огнезащитного действия вспучивающегося покрытия // Збірка тез Всеукр. наук.-практ. конф. «Об’єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів», НУЦЗУ, Харків. - 2013.- С. 309-310.

33. Шаршанов А.Я. Охлаждение массивного тела гелеобразующим составом // Материалы научно-практ. конф «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации», Гомел. инженер. ин-т. им. П.О. Сухого, Гомель. - 2014. -С. 142-143.
34. Шаршанов А.Я., Ромащенко О.А. Охлаждение массивного тела гелеобразующим составом // Научно-практ. конф «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів», НУЦЗУ, Ч. 2., Харків. – 2014. -С. 115-116.
35. Зваричук А.В., Шаршанов А.Я. Расчет защитного действия теплоизоляционного экрана // Научно-практ. конф «Наукове забезпечення діяльності оперативно-рятувальних підрозділів (теорія і практика)», НУЦЗУ, Харків. - 2015. - С. 214-216.
36. Шаршанов А.Я. Выбор оптимального соотношения толщин слоев двухслойного огнезащитного экрана // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки», НУЦЗУ, Харків. - 2016. – С. 48-52.
37. Шаршанов А.Я., Зваричук А.В. Моделирование действия двухслойного огнезащитного экрана // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми пожежної безпеки», НУЦЗУ, Харків. - 2016. – С. 53-56.
38. Шаршанов А.Я. Определение опасных факторов пожара в помещении на основе компьютерного моделирования // Сборник материалов международной заочной научно-практической конференции «Пож. безопасность: проблемы и перспективы», ИППК, г. Светлая Роща, Республика Беларусь. - 2016. – С. 129-134.
39. Дадашов И.Ф., Шаршанов А.Я., Киреев А.А. Повышение эффективности тушения горючих жидкостей в резервуарах путем использования гелеобразующих огнетушащих составов // Сборник материалов международной заочной научно-практической конференции “Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций: методы, технологии, проблемы и перспективы.”, ИППК, г. Светлая Роща, Республика Беларусь. - 2017. – С. 53-59.
40. Шаршанов А.Я. Влияние случайно-неоднородного характера покрытия на его теплозащитные свойства // Матеріали ІХ Міжнародної наук. практ. конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», ЧПБ, Черкаси. – 2018. – С. 219-220.
41. Шаршанов А.Я. Огнезащитное действие двухслойного экрана // Матеріали 20 Всеукраїнської наук.-практичної конференції «Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку», ІДУСЦЗ, Київ. - 2018 – С. 487-490.

АНОТАЦІЯ

Шаршанов А.Я. Розвиток наукових основ захисту речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – “пожежна безпека”. Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Харків, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розв’язанню актуальної науково-прикладної проблеми у сфері пожежної безпеки – розвитку наукових основ захисту об’єктів від теплового впливу пожежі за допомогою пасивних засобів захисту: поглинаючих та відбиваючих екранів і покриттів; покриттів з матеріалу, що спучується.

Проблема вирішується шляхом розробки комплексу математичних моделей процесів захисту, виявлення їх особливостей, а також розробки алгоритмів і програмного забезпечення для розв'язання прикладних задач захисту. В рамках даного підходу:

- знайдено аналітичні рішення задач нестационарної теплопровідності щодо захисту термічно товстого або термічно тонкого тіла плоским поглинаючим покриттям;

- побудовано модель покриття, що спучується, яка єдиним чином описує процеси теплопереносу, термічного розкладу, випаровування, спучування й винесення маси;

- побудовано опис захисту від теплового впливу за допомогою термічно тонких оптично непрозорих відбиваючих екранів з повітряними або теплопровідними оптично тонкими прошарками;

- побудовано модель процесу висихання шару гелю, яка враховує відмінності висихання гелю від випаровування води;

- побудовано опис процесу нестационарної неізотермічної дифузії пари небезпечної речовини крізь шар зернистого середовища;

- розроблено практичні рекомендації та алгоритми і комп'ютерні програми щодо вибору покриттів і екранів для захисту об'єктів від теплового впливу пожежі.

Ключові слова: математична модель, теплоперенос, масоперенос, нестационарна теплопровідність, теплозахисні покриття, поглинаючі і відбиваючі екрани, здатне до спучування покриття, нестационарна дифузія, гранульовані матеріали, гелеутворююча система.

АННОТАЦИЯ

Шаршанов А.Я. Развитие научных основ защиты веществ и материалов от теплового воздействия пожара. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 21.06.02 - "пожарная безопасность". Национальный университет гражданской защиты Украины, Государственная служба Украины по чрезвычайным ситуациям, Харьков, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы в сфере пожарной безопасности - развитию научных основ защиты объектов от теплового воздействия пожара с помощью пассивных средств защиты: поглощающих и отражающих экранов и покрытий; покрытий из вспучивающихся материалов.

Проблема решается путем разработки комплекса математических моделей процессов защиты, выявления их особенностей, а также разработки алгоритмов и программного обеспечения для решения прикладных задач защиты. В рамках данного подхода:

- найдены аналитические решения задач нестационарной теплопроводности о защите термически толстого или термически тонкого тела плоским поглощающим покрытием;

- построена модель вспучивающегося покрытия, которая единым образом описывает процессы теплопереноса, термического разложения, испарения, вспучивания и вынесения массы;

- построено описание защиты от теплового воздействия с помощью термически тонких оптически не прозрачных отражающих экранов с воздушными или теплопроводными оптически тонкими прослойками;

- построена модель процесса высыхания слоя геля, которая учитывает отличие высыхания геля от испарения воды;

- построено описание процесса нестационарной неизотермической диффузии паров опасного вещества сквозь слой зернистой среды;

- разработаны практические рекомендации, а также алгоритмы и компьютерные программы по выбору покрытий и экранов для защиты объектов от теплового воздействия пожара.

Ключевые слова: математическая модель, теплоперенос, массоперенос, нестационарная теплопроводность, теплозащитные покрытия, поглощающие и отражающие экраны, вспучивающееся покрытие, нестационарная диффузия, гранулированные материалы, гелеобразующая система.

ABSTRACT

Sharshanov A.Ya. Development of the scientific basis for the protection of substances and materials from the thermal effects of fire. - On the rights of the manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 21.06.02 - "Fire Safety". National University of Civil Protection of Ukraine, State Emergency Service of Ukraine, Kharkov, 2020.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and applied problem in the field of fire safety - the development of the scientific foundations for protecting objects from the heat of a fire using passive means of protection: absorbing and reflecting screens and coatings; intumescent coatings, heterogeneous coatings. The protection against unwanted mass transfer of vapors of hazardous liquids is also being investigated.

The work solves the problem by developing a set of mathematical models to describe the protection processes, identifying their features, as well as developing algorithms and software for solving applied protection tasks. The object of the study is the processes of protecting substances and materials from the effects of fire using screens and coatings, as well as the processes of mass transfer of vapors of hazardous substances through insulating coatings.

The following main results are obtained.

- An analytical solution is found to the task of unsteady heat conduction on the protection of a thermally thick body by a flat absorbing coating at high activity coefficients and small criteria of Bio.

- An analytical solution to the task of unsteady heat conduction by determining temperatures when heating a thermally thin body (TTB) through a flat heat-conducting inert coating of arbitrary thickness is found. The solution has the form of a series. It is shown that the main difference between this task and the known

situation of unilateral heating of a single flat plate is its dependence not on two criteria (Bio and Fourier), but on four (two criteria of Bio, Fourier criterion and the ratio of the surface heat capacities of the TTB and of the coating). It is proved that for most calculations, the first two members of the series are sufficient. This made it possible to obtain an explicit expression of the dependence of the critical values of fire safety parameters on the critical temperature level of the TTB.

- The conditions are obtained under which it is necessary to take into account the random nature of the heterogeneity of the heat-insulating coating thickness.

- Mathematical descriptions of the protective action of a single-layer and two-layer optically opaque reflective heat shields with air gaps are constructed. To solve this system, algorithms are developed and computer programs are built. It is shown that the protective time of a two-layer screen is $\sim 1.5-2$ times longer than the protection time of the corresponding single-layer screen of total thickness.

- A mathematical description of the protective effect of single-layer and two-layer optically opaque reflective heat shields with heat-conducting optically thin interlayers is constructed. Algorithms and computer programs have been developed that solve this system of equations.

- A mathematical model of the action of an intumescent coating has been developed, which jointly describes the processes of heat transfer, thermal decomposition, evaporation, expansion and mass removal. Algorithms and computer programs simulating protection have been developed. The example of an intumescent coating CK-1 shows the coincidence of experimental and model results with an accuracy of $\sim 20\%$.

- A model of the heat-shielding effect of a wet gel is constructed, in which the drying process of the gel is considered taking into account the mass transfer of water vapor through the resulting layer of dry gel.

- Based on the assessment of the radiant heat flux from the torch of a landscape fire in the form of a long strip, the width of the protective strip covered with a gel layer is determined. This made it possible to calculate the required flow rate of the gelling composition.

- A mathematical model of the process of non-stationary non-isothermal diffusion of a vapor of a combustible liquid through a layer of granular coating is built. It is shown that the critical (regarding flash) thickness of the protective layer increases sharply as the fuel temperature approaches the boiling point. So in the case of octane, when the temperature rises from 20°C to its boiling temperature of 125°C , the critical thickness increases from 0.07 m to 57.7 m.

- Practical recommendations, algorithms and computer programs for the selection of coatings (from absorbent or intumescent materials) and reflective screens for protecting objects from thermal effect of a fire have been developed.

Keywords: mathematical model, heat transfer, mass transfer, non-stationary heat conductivity, heat-shielding coating, absorbing and reflecting screens, intumescent coatings, non-stationary diffusion, granular materials, gel-forming composition.

Підписано до друку 28.08.20. Формат 60x84/16.
Папір 80 г/м². Друк ризограф. Ум. друк. арк. 2,1.
Тираж 100 прим. Вид. № 110/20. Зам.№ 697/20.

Друкарня ТОВ «Друкарня Мадрид»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18
Тел. (057) 756-53-80