

Національний університет цивільного захисту України
Державна служба України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Шаршанов Андрій Янович

УДК 614.8

ДИСЕРТАЦІЯ

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЗАХИСТУ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ
ВІД ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

21.06.02 – пожежна безпека

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А. Я. Шаршанов

Науковий консультант **Абрамов Юрій Олексійович**, доктор технічних наук,
професор

Харків – 2020

АНОТАЦІЯ

Шаршанов А.Я. Розвиток наукових основ захисту речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. Національний університет цивільного захисту України, 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; неоднорідних покриттів.

Незважаючи на практичну важливість цієї проблематики, багато пов’язаних із захистом питань залишаються недостатньо розробленими. Зокрема, це стосується теоретичних аспектів даної діяльності. До них відноситься: виявлення основних особливостей захисної дії екранів і покриттів і відображення цих особливостей у математичному описі явищ із максимальним використанням фізичних законів; знаходження точних рішень відповідних задач, що надає можливість використовувати загальніші аналітичні (а не чисельні) залежності; неповнота набору алгоритмів і програмного забезпечення для рішення прикладних задач захисту у стандартних загальноприйнятих умовах та в умовах пожежі у приміщенні.

Описана ситуація обумовила дану роботу, яка вирішує проблему 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. При цьому об’єктом дослідження стали процеси захисту речовин і матеріалів від впливу пожежі за допомогою екранів та покриттів, а також процеси масопереносу небезпечних речовин крізь ізолюючі покриття, предметом дослідження - характеристики відповідних методів та засобів теплозахисту та ізоляції.

В роботі: методами математичної фізики були отримані аналітичні рішення задач нестационарної теплопровідності, яким з використанням теорії подібності надавався критеріальний вигляд; на основі законів тепло- і масопереносу з використанням методів математичного моделювання побудовані математичні описи процесів дії захисних екранів і покриттів, які потім досліджувалися за допомогою методів комп'ютерного моделювання; методами математичної статистики проводилося дослідження захисної дії випадково-неоднорідного покриття.

В рамках вирішення проблеми отримані наступні основні результати.

Вперше 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 металевої 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.

Вперше 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 убувають з часом. Отримано формули розрахунку всіх доданків цього ряду і показано, що основною відмінністю даної задачі від відомої ситуації однобічного 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.

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).

Вперше побудовано математичні описи захисної дії одношарового і двошарового оптично непрозорих 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.

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.

Побудовано математичний опис захисної дії одношарових і двошарових оптично непрозорих 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.

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 у випадку стандартної пожежі. На прикладі здатного до спучування покриття СК-1 показано збіг із точністю ~20% експериментальних результатів із модельними у випадку із 3-ма активними компонентами.

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.

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.

Вперше 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.

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.

Отримані результати у сукупності забезпечують вирішення проблеми розвитку наукових основ захисту речовин і матеріалів від теплового впливу пожежі за допомогою захисних екранів і покриттів.

Ключові слова: математична модель, теплоперенос, масоперенос, нестационарна теплопровідність, теплозахисне покриття, поглинаючі і відбиваючі екрани, здатне до спучування покриття, нестационарна дифузія, гранульовані матеріали, гелеутворюючі системи.

ABSTRACT

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

The dissertation for obtaining a scientific degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 21.06.02 - fire safety. National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkov, 2020.

The dissertation is devoted to solving the urgent scientific and applied problems in the field of fire safety - the development of the scientific foundations for protecting objects from the thermal effects of fire using passive means of protection: absorbing and reflecting screens and coatings; intumescent coatings; heterogeneous coatings.

Despite the practical importance of this issue, many defense-related issues remain underdeveloped. In particular, this concerns the theoretical aspects of this

activity. These include: identifying the main features of the protective action of screens and coatings and displaying these features in the mathematical description of phenomena with the maximum use of physical laws; finding the exact solutions to the corresponding problems that make it possible to use general analytical (rather than numerical) dependencies; the incompleteness of the set of algorithms and software for solving applied protection tasks in standard generally accepted conditions and in a fire in a room.

The described situation led to this work, which solves the problem by developing a set of mathematical models for describing the protection processes, identifying their features, as well as developing algorithms and software for solving applied protection problems. In this case, the object of the study was 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 hazardous substances through insulating coatings, the subject of the study is the characteristics of the corresponding methods and means of thermal protection and insulation.

In the work: by methods of mathematical physics, analytical solutions to problems of unsteady heat conduction were obtained, which, using the theory of similarity, were given a critical form; based on the laws of heat and mass transfer using mathematical modeling methods, mathematical descriptions of the functioning processes of protective screens and coatings are constructed, which are then studied using computer simulation methods; using the methods of mathematical statistics, a study was made of the protective effect of a randomly inhomogeneous coating.

In the framework of solving the problem, the following main results were obtained.

For the first time, an analytical solution to the problem of unsteady thermal conductivity was found by determining the time dependence of the temperature of the surface of a thermally thick body protected by an inert coating in the case of large (in comparison with unity) activity coefficients (which corresponds to the protection of a metal surface with a nonmetallic coating) and small Biot criteria. The solution provides analytical predictive estimates of the critical values of fire safety parameters

(fire resistance limit, temperature level of a hot medium) based on the critical surface temperature level of the protected body.

For the first time, an analytical solution to the problem of unsteady thermal conductivity was found by determining temperatures when heating a flat layer of a thermally thin body (TTB) through a flat heat-conducting inert coating of arbitrary thickness. The solution has the form of a series whose terms exponentially decrease with time. The formulas for calculating all terms of this series are obtained and it is shown that the main difference between this problem 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 Bio criteria, Fourier criterion and the ratio of the surface heat capacities of TTB and coatings). It is proved that for the majority of calculations, the first two members of the series are sufficient, which makes it possible to reveal an explicit expression of the dependence of the critical values of fire safety parameters (fire resistance limit, temperature level of a hot medium) on the critical temperature level of the TTB.

The resulting attenuation coefficients of the heat flux by absorbing coatings of the same material, with the same weight but homogeneous and randomly inhomogeneous thickness are compared. It is shown that the action of a randomly inhomogeneous coating significantly differs from the action of the corresponding homogeneous coating only if two conditions are satisfied jointly: 1) the variation in coating thickness (σ) is not small in comparison with the average thickness; 2) not a small value of the Bio variational criterion ($Bi = \alpha \cdot \sigma / \lambda \geq 1$, where α - the heat transfer coefficient; λ - the thermal conductivity of the coating material).

For the first time, mathematical descriptions of the protective action of a single-layer and two-layer heat-reflecting screens with air gaps are constructed. A feature of the descriptions is that they are reduced to a system of ordinary differential equations of the dependence of screen temperatures on time. To solve them in conditions of constant heat exposure and in case of fire in the room, algorithms were developed and corresponding computer programs were built. Analytical solutions of the simplified problem of heating such screens are found and the scope of these

solutions is indicated. It is shown that the protective action time of a two-layer screen is ~ 1.5 -2 times longer than the protection time of the corresponding single-layer screen of total thickness.

An algorithm has been developed to find the ratio of the layer thicknesses of a two-layer heat-reflecting screen with air layers, the layers of which are made of the same material, providing maximum fire protection time with a fixed total layer thickness and temperature restrictions of the inner and outer layers.

A mathematical description of the protective effect of single-layer and two-layer reflective heat shields with heat-conducting layers is constructed. A feature of this description is the inclusion of the internal radiant heat flux in the approximation of an optically thin layer. Algorithms and corresponding computer programs are developed that solve the systems of equations of description in conditions of constant heat exposure and in case of fire in the room.

A mathematical model has been developed that considers the ability to swell a coating as a mixture of substances with a variable composition, the increase in the amount and expansion of the gas component of which at the locations of the core in a liquid state leads to swelling. The peculiarity of the model is that it uniquely describes the processes of heat transfer, thermal decomposition, evaporation, expansion, and entrainment of the mass. Algorithms and computer programs have been developed that simulate protection in conditions of constant heat exposure and in case of a standard fire. Using an example of a CK-1 coating capable of swelling, it is shown that, with an accuracy of $\sim 20\%$, the experimental results coincide with model results in the case of 3 active components.

Based on the laws of heat and mass transfer, a mathematical 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 formed layer of dry gel. A feature of the model is its reduction in the case of a thermally thin gel layer to a system of ordinary (and not partial derivatives) differential equations with respect to time.

Based on the evaluation of the radiant heat flux from a long-striped landscape fire torch, a protective action model of a gel-coated protective strip was constructed, which made it possible to estimate the flow rate of the gel-forming composition required to localize the fire, and to determine that it is almost 10 less than the corresponding water consumption.

For the first time, 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 that protrudes above the surface of the liquid is constructed. A feature of the model is that the evaporation of a liquid is described in a quasistationary approximation, because of which the concentration field is determined by algebraic relations, and the temperature field is described by a modified equation of unsteady heat conduction. It is shown that the model allows predicting the possibility of an outburst of fuel vapor at various temperatures and the thickness of the protective coating. In particular, it was revealed that the critical, relative to the flash, the thickness of the protective layer increases sharply when the fuel temperature approaches the boiling point. In particular, when using octane, when the temperature rises from 20°C to its boiling point of 125°C, it increases from 0.07 m to 57.7 m.

Practical recommendations, algorithms and computer programs were developed to select coatings (from absorbent or intumescent materials) or reflective screens to protect objects from the effects of fire.

The results obtained together provide a solution to the problem of developing the scientific foundations for the protection of substances and materials from the thermal effects of fire using protective screens and coatings.

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

**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 небезпечних факторів пожежі у приміщенні // Проблемы пожарной безопасности. - 2002. - Вып. 11. - С. 174-177.
2. Писарский М.А., Шаршанов А.Я. Особенности моделирования швидкості вигорання // 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., Кіреєв 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. Огнезащита древесины с помощью гелеобразующих составов на основе силикатов / А.А. Чернуха, А.А. Киреев, А.Я. Шаршанов. – 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 // Науково-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.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів.....	21
ВСТУП.....	34
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАХИСТУ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ ВІД ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ І ПОКРИТТІВ.....	45
1.1 Класифікація пасивних способів захисту від впливу пожежі.....	45
1.2 Захист від теплового впливу.....	47
1.2.1 Поглинаючі покриття і екрани.....	50
1.2.2 Покриття, що спучуються.....	55
1.2.3 Відбиваючі екрани.....	61
1.2.4 Гелеві теплозахисні покриття.....	67
1.3 Захист від небажаного масопереносу.....	69
1.3.1 Ізольуючі покриття і екрани.....	69
1.3.2 Сповільнюючі покриття і екрани.....	74
1.4 Постановка проблеми і способи її вирішення.....	76
1.5 Висновки.....	80
РОЗДІЛ 2 ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ПЛОСКИМ ТЕПЛОЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ ІЗ ПОГЛИНАЮЧОГО ОДНОРІДНОГО МАТЕРІАЛУ.....	83
2.1 Захист масивного тіла.....	83
2.1.1 Прогрівання за великого часу прогріву.....	90
2.1.2 Прогрівання за великих коефіцієнтах активності та малих критеріях Біо.....	95
2.2 Захист термічно тонкого тіла.....	103
2.2.1 Захист термічно тонкого тіла у загальному випадку.....	103
2.2.2 Захист термічно тонкого тіла у випадку великих часів прогріву....	117
2.3 Теплозахисна дія випадкового-неоднорідного шару.....	121

2.4 Моделювання теплозахисної дії поглинаючого покриття при пожежі у приміщенні.....	127
2.5 Висновки.....	135
РОЗДІЛ 3 ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ВІДБИВАЮЧИМИ ЕКРАНАМИ.....	137
3.1 Моделювання захисної дії одиничного відбиваючого екрану відокремленого від поверхні захисту повітряним прошарком.....	137
3.2 Моделювання захисної дії двошарового відбиваючого екрану із поділяючими повітряними прошарками.....	148
3.3 Вибір оптимального співвідношення товщини шарів двошарового вогнезахисного екрану із повітряними прошарками.....	158
3.4 Моделювання захисної дії одиничного відбиваючого екрану відокремленого від поверхні захисту теплопровідним оптично тонким прошарком.....	162
3.5 Моделювання захисної дії двошарового відбиваючого екрану із поділяючими теплопровідними оптично тонкими прошарками.....	170
3.6 Моделювання теплозахисної дії напівважкого теплозахисного костюма.....	179
3.7 Комп'ютерне моделювання дії відбиваючих екранів при пожежі у приміщенні.....	188
3.8 Висновки.....	193
РОЗДІЛ 4 ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ПОКРИТТЯМ, ЩО СПУЧУЄТЬСЯ.....	194
4.1 Математична модель вогнезахисних покриттів, що спучуються.....	194
4.2 Математичне моделювання вогнезахисної дії покриття, що спучується внаслідок дії одного активного компонента.....	207
4.3 Математичне моделювання вогнезахисної дії покриття, що спучується внаслідок дії трьох активних компонентів.....	227
4.4 Висновки.....	249

РОЗДІЛ 5 ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ НЕОДНОРІДНИМИ

ПОКРИТТЯМИ.....	251
5.1 Захист гелієвим покриттям.....	251
5.1.1 Теоретичні аспекти висихання гелю при пожежі.....	251
5.1.2 Моделювання охолодження термічно товстого тіла гелеутворюючим складом.....	263
5.1.3 Моделювання поведінки крапель компонентів гелеутворюючих вогнегасних систем у високотемпературній області.....	277
5.1.4 Локалізація ландшафтних пожеж за допомогою захисних смуг, покритих гелеутворюючими складами.....	291
5.2 Захист зернистим покриттям.....	299
5.2.1 Уповільнення масопереносу зернистим середовищем.....	299
5.2.2 Математичне моделювання неізотермічної дифузії пари горючої рідини крізь зернисте покриття.....	305
5.2.3 Математичне моделювання переносу пари горючої рідини крізь двошарове покриття, що складається із шару гранульованого матеріалу і шару гелю.....	326
5.3 Висновки.....	341

РОЗДІЛ 6 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ПОКРИТТІВ І

ЕКРАНІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ..	343
6.1 Захист термічно товстого тіла інертним поглинаючим покриттям....	346
6.2 Захист термічно тонкого тіла інертним поглинаючим покриттям.....	354
6.3 Захист поверхні тіла покриттям, що спучується.....	359
6.4 Захист тіла відбиваючими екранами.....	362
6.5 Висновки.....	364
ВИСНОВКИ.....	366
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	370
ДОДАТКИ.....	399

Додаток А. Характерні величини фізичних параметрів деяких речовин і

матеріалів.....	400
Додаток Б. Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні термічно товстого тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при пожежі у приміщенні.....	402
Додаток В. Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні термічно тонкого тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при пожежі у приміщенні.....	421
Додаток Г. Комп'ютерна програма розрахунку температур і теплових потоків при сталому нагріванні і захисті відбиваючими екранами.....	440
Додаток Г'. Комп'ютерна програма розрахунку температур тіл і теплових потоків при нагріванні від пожежі у приміщенні і захисті відбиваючими екранами з повітряними прошарками.....	457
Додаток Д. Комп'ютерна програма розрахунку температур при сталому нагріванні і захисті здатним до спучування покриттям із 3-а активними компонентами.....	477
Додаток Е. Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при сталому нагріванні.....	493
Додаток Є. Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при зростанні температури середовища за формулою стандартної пожежі.....	502
Додаток Ж. Акти впровадження.....	511

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів

ГУС	гелеутворююча система
НКМЗ (<i>LICL</i>)	нижня концентраційна межа запалення (lower ignition concentration limit)
НТ	нестационарна теплопровідність
ПАР	поверхнево-активна речовина
ПС	піноскло
ТГМ	твердий горючий матеріал
ТТ	термічно тонке
ТТТ	термічно тонке тіло
ШТП	швидко твердіюча піна
A_a	характеристика A ($c, Gr, g, h, Pr, p_1, T, \lambda, \nu, \rho$) повітря, $[A]$
A_{cr}	критичний рівень величини A ($Fo, h_1, j_{1\mu}, q, T, t, T_s, t_s, \theta, \tau, \psi$), $[A]$
A_d	характеристика A (m, r, T, V) краплі, $[A]$
A_{gl}	характеристика A ($D, c_p, c'_p, H, h, m, \rho$) вологого гелю, $[A]$
A_m	середнеоб'ємне значення параметру A (c, p, T, t, ρ) газового середовища у приміщенні, $[A]$
A_v	характеристика A ($c_p, g_v, H, H_\mu, J, j, j_\mu, p, \phi$) водяної пари, $[A]$
A_w	характеристика A ($c_p, g_w, H, m, \nu, \rho$) рідкої води, $[A]$
A^*	характеристика A ($A, a, B, Bi, c_p, c', c'', h, q, q_{con}, q_r, t, \varepsilon, \theta, \lambda, \rho$), що відноситься до об'єкту захисту, $[A]$
$\bar{A}$	середнє по відповідній ділянці простору значення параметру A (c, p, T, t, ρ), $[A]$
A, B	коефіцієнти рівняння
a	найбільш імовірне (не нульове) значення товщини захисного шару, $[м]$
a	коефіцієнт температуропровідності матеріалу, $[м^2 \cdot c^{-1}]$
a_{gr}	коефіцієнт температуропровідності зернистого шару, $[м^2 \cdot c^{-1}]$

B	параметр із рівняння швидкості руху в'язкої рідини в каналі, $[с \cdot м^3 \cdot кг^{-1}]$
B'	параметр із рівняння випаровування
Bi	критерій Біо
b_o	ширина отвору, $[м]$
C	відношення поверхневих теплоємностей шарів ТТТ і покриття
C_w, C_λ	безрозмірні множники ~ 1 , які залежать від структури матеріалу
c, c_p	питома масова ізобарна теплоємність, $[Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}]$
c'	питома об'ємна ізобарна теплоємність, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
c''	питома поверхнева ізобарна теплоємність, $[Дж \cdot м^{-2} \cdot K^{-1}]$
$C_{p.s}$	питома масова ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару, $[Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}]$
$C_{p.wc}$	питома масова ізобарна теплоємність розчину, $[Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}]$
C_{p1}, C_{p2}	питома масова ізобарна теплоємність матеріалу зовнішнього (1) і внутрішнього (2) теплопровідних прошарків, $[Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}]$
$C_{1p\mu}$	питома молярна ізобарна теплоємність пари пального, $[Дж \cdot моль \cdot K^{-1}]$
$C'_{p.s}$	питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
$C'_{p.s1}, C'_{p.s2}$	питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу зовнішнього (1) і внутрішнього (2) відбиваючого шарів, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
$C'_{p.gr.g}$	питома об'ємна ізобарна теплоємність зернистого середовища з газовими зазорами, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
$C'_{p.gr.l}$	питома об'ємна ізобарна теплоємність зернистого середовища із зазорами, заповненими рідким паливом, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
$C'_{p.1}, C'_{p.2}$	питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалів зовнішнього (1) і внутрішнього (2) прошарків, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
$C'_{p.3}$	питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалів одягу, $[Дж \cdot м^{-3} \cdot K^{-1}]$
D	коефіцієнт дифузії переносимої речовини, $[м^2 \cdot с^{-1}]$
D_a	коефіцієнту дифузії пари пального в повітрі без гранул, $[м^2 \cdot с^{-1}]$
D_{ef}	ефективний коефіцієнт дифузії, $[м^2 \cdot с^{-1}]$

D_{gr}	коефіцієнт дифузії пари у повітрі крізь зернистий шар по його порожнинах, $[m^2 \cdot s^{-1}]$
d_c	середній діаметр каналу руху, $[m]$
F	площа поверхні, $[m^2]$
F_c	площа теплового контакту ТТТ із гарячим середовищем, $[m^2]$
F_f	площа пожежі, $[m^2]$
F_0, F_1, F_2	коефіцієнти розкладу площі пожежі F_f у ступеневий ряд по часу, відповідно, $[m^2]$, $[m^2 \cdot s^{-1}]$, $[m^2 \cdot s^{-2}]$
ΔF_i	площа поверхні рівних концентрацій у i -ій трубці струму, $[m^2]$
Fo	критерій Фур'є
G_{in}	масова витрата газів до приміщення, $[kg \cdot s^{-1}]$
G_{out}	масова витрата газів із приміщення, $[kg \cdot s^{-1}]$
Gr	критерій Грасгофа
g	щільність імовірності частки площ захисного шару із заданою товщиною, $[m^{-1}]$
g	прискорення вільного падіння, $[m \cdot s^{-2}]$
g_c	масова частка солі у розчині
g_i	масова частка i -го компонента
$g_{\mu, w}$	мольна частка води у розчині
H	питома масова ентальпія утворення речовини, $[J \cdot kg^{-1}]$
H_i	взята з врахуванням можливих хімічних та фазових перетворень ентальпія i -го компонента, розрахована на одиницю його маси, $[J \cdot kg^{-1}]$
H_{wc}	питома масова ентальпія утворення розчину солі, $[J \cdot kg^{-1}]$
H_{xgl}	питома масова ентальпія ксерогеля, $[J \cdot kg^{-1}]$
$H_{\mu, g}$	питома молярна ентальпія сухого газу, $[J \cdot mol^{-1}]$
$H_{1\mu}$	питома молярна ентальпія пари пального, $[J \cdot mol^{-1}]$
$H_{2\mu}$	питома молярна ентальпія повітря, $[J \cdot mol^{-1}]$
ΔH_{gl}	теплота, що йде на одержання 1 кг пари з вологого гелю при температурі t_{cr} , $[J \cdot kg^{-1}]$

ΔH_j	питомий тепловий ефект j -ої реакції (або фазового перетворення) у розрахунку на одиницю маси j -ого компонента, [Дж·кг ⁻¹],
ΔH_v	питома теплота пароутворення води, [Дж·кг ⁻¹]
ΔH_w	енергія утворення гелю із ксерогеля та води, розрахована на одиницю маси потрібної для цього води, [Дж·кг ⁻¹]
$\Delta H_{1\mu.l.g}$	питома молярна теплота пароутворення пального, [Дж·моль ⁻¹]
h	товщина шару матеріалу, [м]
h	товщина теплопровідного оптично тонкого прошарку, [м]
h_f	висота полум'я, [м]
h_{gr}	загальна товщина шару гранульованого матеріалу, [м]
h_n	висота нейтральної зони, [м]
h_o	висота отвору, [м]
h_s	товщина відбиваючого шару екрану, [м]
h_{sum}	сумарна товщина відбиваючих шарів двошарового екрану, [м]
h_{s1}, h_{s2}	товщина внутрішнього (1) та зовнішнього (2) відбиваючих шарів двошарового екрану, [м]
h_{xgl}	товщина шару ксерогелю, [м]
h_1, h_2	товщина внутрішнього (1) та зовнішнього (2) теплопровідних оптично тонких прошарків двошарового екрану, [м]
h_3	товщина одягу, [м]
h_+ і h_-	відповідно, висота верхнього і нижнього країв отвору, [м]
Δh	товщина шару зернистого матеріалу, [м]
i	індекс нумерації доданків або індекс позначення компонент ($i = p$ - інертна конденсована; $i = a$ - активна конденсована; $i = b$ - інертна конденсована, що є продуктом взаємодії; $i = g$ - газова) або індекс позначення трубок струму
i	уявна одиниця ($i = \sqrt{-1}$)
J	потік маси, [кг·с ⁻¹]
J_i	потік маси i -го компонента, [кг·с ⁻¹]
J_μ	молярний потік компонента, [моль·с ⁻¹]

$J_{1\mu}$	молярний потік пари пального, [моль·с ⁻¹]
$\Delta J_{i,\mu}$	молярний потік компонента крізь i -ту трубку струму, [моль·с ⁻¹]
j	індекс позначення реакцій або речовин
$\dot{j}$	загальний питомий потік газів, [кг·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_i$	щільність потоку маси i -го компонента, [кг·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_\mu$	загальна щільність молярного потоку часток газу, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{\mu,g}$	щільність молярного потоку сухого газу, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{\mu,i}$	щільність молярного потоку i -го компонента, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{1\mu}$	поверхнева щільність молярного потоку пари горючої рідини, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{2\mu}$	поверхнева щільність молярного потоку повітряної компоненти суміші, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{1\mu}^{(a)}$	поверхнева щільність молярного потоку пари пального в перехідному повітряному шарі, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{1\mu}^{(gl)}$	поверхнева щільність молярного потоку пари пального в гелі, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
$\dot{j}_{1\mu}^{(gr)}$	поверхнева щільність молярного потоку пари пального в гранульованому шарі, [моль·с ⁻¹ ·м ⁻²]
K	критерій (коефіцієнт) відносної теплової активності середовищ
$K_{gr,a}$	коефіцієнт послаблення потоку при наявності гранульованого шару
$K_{gr,gl,a}$	коефіцієнт послаблення потоку при наявності гранульованого шару і шару гелю
k	коефіцієнт послаблення теплового потоку випадковим захисним шаром
k	стала адіабати газового середовища
k	безрозмірний множник, що враховує ступінь свободи переносу газу в просторі ($k \leq 1$, у вільному просторі $k = 1$)
k_{eff}	коефіцієнт ефективності використання води
k_L	коефіцієнт лінійного розширення (стиску) гелю при висиханні в ксерогель

k_m	масова частка вологого гелю, що переходить у пару при повнім сушінні гелю
k_V	коефіцієнт спучування
$k_{V,i}$	локальний коефіцієнт спучування
$k_{V,max}$	максимальний коефіцієнт спучення
$k_{V,tot}$	загальний коефіцієнт спучення
L, l	характерний розмір задачі, [м]
L	товщина захисного покриття, [м]
L_i	маса i -го продукту згоряння, яка утворюється при повному згорянні одиниці маси пального матеріалу, [кг·кг ⁻¹]
L_{O_2}	маса кисню, яка потрібна для повного згоряння одиниці маси пального матеріалу, [кг·кг ⁻¹]
L_{tr}	товщина дерев'яної підкладки, [м]
L_0	початкова товщина захисного покриття, [м]
l_i	довжина шляху масопереносу у i -ій трубці струму, [м]
l_m	середнє значення довжини трубки струму між поверхнями захисного шару, [м]
Δl_i	відстань між поверхнями шару, узята уздовж i -ої трубки струму, [м]
t	температура (охолодження), [с ⁻¹]
m	маса, [кг]
m_0	початкова величина маси покриття, [кг]
dm	загальна маса елемента покриття, [кг]
dm_i	маса i -го компонента у елементі покриття, [кг]
Δm_{tot}	загальна втрата маси покриття за час теплового впливу, [кг]
$Nu_D \equiv Sh$	дифузний критерій Нуссельта (критерій Шервуда)
$Nu_T \equiv Nu$	температурний критерій Нуссельта
n	просторова координата, яка спрямована по нормалі до границі, [м]
n	індекс нумерації доданків
$\vec{n}_1, \vec{n}_2$	одичні вектори, спрямовані по нормалі до відповідних елементарних поверхонь
p	тиск, [Па]

p, p_0	загальний тиск у вільному просторі, [Па]
$p_{c.s}$	тиск насиченої пари води над поверхнею розчину солі, [Па]
p_g	парціальний тиск сухого газу, [Па]
p_s	тиск рівноваги газової і рідкої фази, [Па]
p_{v0}	парціальний тиск водяної пари на поверхні ксерогеля, [Па]
p_1	парціальний тиск пари горючої рідини, [Па]
$p_{1.LICL}$	парціальний тиск пари горючої рідини, що відповідає нижній концентраційній межі запалення, [Па]
p_{1d}, p_{1u}	парціальний тиск пари пального на нижній і верхній границях області масопереносу, відповідно, [Па]
p_{1h}	парціальний тиск пари горючої рідини на рівні поверхні зернистого покриття, [Па]
p_{1s}	тиск насиченої пари пального, [Па]
p_2	парціальний тиск чистого повітря, [Па]
$p^{(gr)}$	загальний тиск газового середовища у порожнинах гранульованого шару, [Па]
Q	тепловий потік крізь поверхню, [Вт]
Q_L	надлишковий тепловий потік на 1 м фронту пожежі, від якого треба захиститися, [Вт·м ⁻¹]
Q_l	питома нижча теплота згоряння пального, [Дж·кг ⁻¹]
Q_R	загальна об'ємна локальна щільність стоку ентальпії реакції розпаду, [Вт·м ⁻³]
Q_w	тепловий потік, що уходить із газового середовища приміщення, [Вт]
q	щільність потоку енергії в середовищі, [Вт·м ⁻²]
q_{con}	питомий конвекційний потік у прошарку, [Вт·м ⁻²]
q_f	результуючий питомий тепловий потік від полум'я до захисного шару, [Вт·м ⁻²]
$q_{f.r}$	результуючий питомий променистий тепловий потік від полум'я до захисного шару, [Вт·м ⁻²]
q_r	результуючий питомий потік теплового випромінювання, [Вт·м ⁻²]

q_λ	щільність теплопровідного теплового потоку, $[\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}]$
q_ψ	питомий променистий тепловий потік на поверхні тіла, опромінюваного факелом пожежі, $[\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}]$
q_0	параметр рівняння розрахунку q_ψ , $[\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}]$
q^*	результуючий питомий тепловий потік, що падає на поверхню об'єкту захисту, $[\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}]$
R	універсальна газова стала, $8,314 [\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}]$
R_i	об'ємна щільність швидкості зміни маси i -го компонента, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}]$
R_m	питома газова стала газового середовища у приміщенні, $[\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}]$
R_α	термічний опір тепловіддачі, $[\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}]$
R_λ	термічний опір теплопровідності плоского шару, $[\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}]$
Re	критерій Рейнольдса
r	радіус, $[\text{м}]$
r_v	об'ємна частка газових включень у загальному об'ємі покриття
r_v	об'ємна частка порожнеч у зернистому середовищі, крізь які рухається пара рідини
$r_{1.LICL}$	об'ємна частка пального газу у повітрі на нижній концентраційній межі запалення
s	параметр перетворень Лапласа по часу, $[\text{с}^{-1}]$
s	площа поверхні краплі, $[\text{м}^2]$
T, t	відповідно, абсолютна температура, $[\text{К}]$, температура за шкалою Цельсія, $[\text{°C}]$
$T_{a,i}$	нижніх температурний поріг реакцій i -го активного компонента, $[\text{К}]$
T_f, t_f	температура навколишнього середовища, $[\text{К}]$, $[\text{°C}]$
T_f, t_f	температура полум'я, $[\text{К}]$, $[\text{°C}]$
$T_{f,0}$ і $T_{f,\max}$	початкове і максимальне асимптотичне значення температури середовища, відповідно, $[\text{К}]$
$T_{g,\text{beg}}$	температурний поріг реакції спучування, $[\text{К}]$

T_h	температура на зовнішній поверхні зернистого шару, [K]
T_s, t_s	температура рівноваги газової і рідкої фази, [K], [°C]
T_s, t_s	температура відбиваючого шару, [K], [°C]
T_s, t_s	температура зовнішньої гарячої поверхні покриття, що спучується, [K], [°C]
$T_{s1}, t_{s1},$ T_{s2}, t_{s2}	температура зовнішнього (1) і внутрішнього (2) відбиваючих шарів двошарового екрану, [K], [°C]
T_w	середня абсолютна температура поверхні огорожі, [K]
T_0, t_0	початкова температура, [K], [°C]
T_{li}	температура запалення рідини, [K]
$t_{f.st}(\tau)$	температура стандартної пожежі, °C
t_{gl0}	початкова температура вологого гелю, [°C]
t_L	зображення по Лапласу температури, [°C·с]
t_{max}	максимальна температура нагріву, [°C]
$t_{s.cr.1},$ $t_{s.cr.2}$	критична температура зовнішнього (1) і внутрішнього (2) відбиваючого шару двошарового екрану, [°C]
Δt_{cr}	$\Delta t_{cr} \equiv t_{cr} - t_0$, [°C]
u_m	питома масова швидкість вигорання, [кг·м ⁻² ·с ⁻¹]
V	об'єм тіла, [м ³]
dV	об'єм елемента покриття, [м ³]
dV_i	об'єм i -го компонента в елементі покриття, [м ³]
dV_{loc}	об'єм елемента покриття у випадку локалізованих газових компонент, [м ³]
dV_{max}	максимально можливий об'єм елемента покриття, [м ³]
dV_0	початковий (до спучування) об'єм елемента покриття, [м ³]
ΔV	загальний об'єм зернистого шару, [м ³]
ΔV_i	об'єм i -ої трубки струму, [м ³]
v	питомий об'єм речовини покриття, [м ³ ·кг ⁻¹]
v_i	питомий об'єм i -го компонента, [м ³ ·кг ⁻¹]
W_-	об'ємна витрата витяжної примусової вентиляції, [м ³ ·с ⁻¹]

W_+	об'ємна витрата припливної примусової вентиляції, $[m^3 \cdot s^{-1}]$
w	швидкість переносу газової суміші, як цілого, $[m \cdot s^{-1}]$
w_g	швидкість руху газового компонента відносно остову, $[m \cdot s^{-1}]$
w_{del}	швидкістю руху границі області делокалізації, $[m \cdot s^{-1}]$
w_{fr}	швидкість руху остову відносно поверхні захисту, $[m \cdot s^{-1}]$
w_i	швидкість руху i -го компонента відносно поверхні захисту, $[m \cdot s^{-1}]$
w_s	швидкість руху гарячої поверхні покриття, що спучується, $[m \cdot s^{-1}]$
x, y, z	просторові Декартові координати, $[m]$
x_{cr}	мінімальна безпечна товщина вогнезахисної смуги, $[m]$
x_{del}	x -координата границі області делокалізації, $[m]$
x_d, x_u	координати нижньої і верхньої границь області переносу, $[m]$
x_s	товщина зазору між накидкою й тілом постраждалого, $[m]$
x_s	координата гарячої поверхні покриття, що спучується, $[m]$
x_{sum}	сума товщин повітряних прошарків двошарового відбиваючого екрану, $[m]$
x_1, x_2	товщини зовнішнього (1) і внутрішнього (2) повітряних прошарків двошарового відбиваючого екрану, $[m]$
Δx	$\Delta x = x_u - x_d$ - ширина області переносу, $[m]$
y_m	обезразмірена найбільш імовірна товщина захисного шару
$\bar{y}$	обезразмірене середнє значення товщини захисного шару
α	коефіцієнт конвекційної тепловіддачі, $[Wt \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\bar{\alpha}$	середній по поверхні огорожі коефіцієнт тепловіддачі, $[Wt \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
β	коефіцієнт масопереносу (масовіддачі), $[m \cdot s^{-1}]$
γ	швидкість зміни температури у часі, $[K \cdot s^{-1}]$
$\delta(Z)$	дельта-функція Дірака, $[Z^{-1}]$
δ_D	товщині дифузійного граничного шару, $[m]$
δ_T	товщині температурного граничного шару, $[m]$
δ_*	зведена товщина тіла, $[m]$
ε	відносна випромінювальна здатність (ступінь чорноти)
ε_{con}	коефіцієнт зростання теплопереносу у газовому прошарку,

	обумовлений конвекцією газу
ε_f	відносна випромінювальна здатність полум'я
ε'_s і ε''_s	відносна випромінювальна здатність зовнішньої і внутрішньої поверхні відбиваючого шару, відповідно
ε'_{s1} і ε''_{s1} , ε'_{s2} і ε''_{s2}	відносна випромінювальна здатність зовнішньої і внутрішньої поверхні зовнішнього (1) і внутрішнього (2) відбиваючих шарів двошарового екрану
ε_{II}	зведена відносна випромінювальна здатність системи з двох паралельних нескінчених плоских поверхонь
η	коефіцієнт динамічної в'язкості газового середовища, [Па с]
η_b	коефіцієнт повноти згоряння пального
θ	відносна надлишкова температура
θ	кут, [рад]
$\mathcal{G}(Z)$	функція Хевісайда (сходинка від нуля до одиниці при $Z = 0$)
κ	коефіцієнт поглинання променистого потоку, [м ⁻¹]
κ_1, κ_2	коефіцієнти поглинання променистого потоку матеріалів внутрішнього (1) та зовнішнього (2) теплопровідних прошарків, [м ⁻¹]
κ_3	коефіцієнт поглинання променистого потоку матеріалу одягу, [м ⁻¹]
λ	коефіцієнт теплопровідності, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
λ_{free}	коефіцієнт теплопровідності газової суміші за межами покриття, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
$\lambda_{gr.g}$	коефіцієнт теплопровідності гранульованого середовища з простором між гранулами, який заповнено газом, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
$\lambda_{gr.l}$	коефіцієнт теплопровідності зернистого середовища із зазорами, заповненими рідким паливом, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
λ_i	коефіцієнт теплопровідності у i -му елементарному шарі покриття, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
λ_{xgl}	коефіцієнт теплопровідності ксерогеля, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
λ_1, λ_2	коефіцієнти теплопровідності матеріалів внутрішнього (1) та зовнішнього (2) теплопровідних прошарків, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]
λ_3	коефіцієнт теплопровідності матеріалу одягу, [Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹]

μ	молярна маса, $[\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]$
μ	безрозмірний дійсний параметр характеристичного рівняння
μ_c	молярна маса солі, $[\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]$
μ_i	молярна маса i -го компонента, $[\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]$
μ_{mix}	молярна маса газової суміші, $[\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]$
μ_n	n -ий корінь характеристичного рівняння
$\mu_v = \mu_w$	молярна маса водяної пари, $0,018 [\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}]$
ν	коефіцієнт кінематичної в'язкості, $[\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]$
ν_g	коефіцієнт кінематичної в'язкості газового середовища, $[\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}]$
ρ	густина, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_g	реальна густина газу у каналі руху, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_f	густини рідкого палива, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_{gr}	густини матеріалу гранул, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_i	масова концентрація i -го компонента, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_s	густина матеріалу відбиваючого шару, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_1, ρ_2	густина матеріалів внутрішнього (1) та зовнішнього (2) теплопровідних оптично тонких прошарків, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
ρ_3	густина матеріалу одягу, $[\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}]$
σ	стала випромінювання абсолютно чорного тіла, $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}]$
σ	характерна зміна товщини захисного шару, $[\text{м}]$
τ	час, $[\text{с}]$ або $[\text{хв}]$
τ_a	загальний час установаження процесів тепло- та масопереносу у перехідних концентраційному й температурному шарах над поверхнею покриття, $[\text{с}]$
$\tau_{cr.1},$ $\tau_{cr.2}$	час нагріву до критичної температури (межа вогнестійкості) зовнішнього (1) та внутрішнього (2) відбиваючих шарів двошарового екрану, $[\text{с}]$
$\tau_{D.gl}$	характерний час дифузії пари крізь шар гелю, $[\text{с}]$
$\tau_{D.gr}$	характерний час дифузії пари крізь зернистий шар, $[\text{с}]$
τ_f	характерний час виходу на асимптотичне значення температури,

	[с]
$\tau_{T.gr}$	характерний час прогріву зернистого шару, [с]
τ_{Σ}	характерний час прогріву поверхні масивного тіла, покритого захисним шаром, [с]
$\tilde{\tau}_{\Sigma}$	відносний (до τ_{Σ}) час
τ_0	характерний час прогріву покриття, [с]
τ^*	характерний час прогріву (охолодження) поверхні масивного тіла, у відсутності захисного покриття, [с]
$\Delta\tau$	час усереднення опису, [с]
$\Delta\tau_A$	тривалість етапу перетворень захисного шару вологого гелю, [с]
φ	безрозмірна змінна
φ	молярна концентрація, [моль·м ⁻³]
φ_g	молярна концентрація сухого газу, [моль·м ⁻³]
$\varphi_{1.LICL}$	нижня концентраційна межа запалення, [моль·м ⁻³]
φ_1, φ_2	молярні концентрації переносимої речовини на зовнішніх границях шару, [моль·м ⁻³]
φ_1, φ_2	відповідно, молярні концентрації пари пального і повітря у їх суміші, [моль·м ⁻³]
φ_1, φ_2	кути між нормаллю ($\vec{n}_1$ або $\vec{n}_2$) і вектором, який з'єднує елементарні поверхні, [рад]
φ_{1d} і φ_{1u}	концентрації пари пального на нижній і верхній границях області масопереносу, відповідно, [моль·м ⁻³]
$\Delta\varphi$	$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – перепад концентрацій компонента на дифузійному шарі, [моль·м ⁻³]
Ψ	коефіцієнт опромінювання (кутовий коефіцієнт)
Ψ_b	швидкість вигорання (газифікації) пального у осередку пожежі, [кг·с ⁻¹].
Ψ_{max}	максимально можливе значення коефіцієнту опромінення
ω	параметр із рівняння зв'язку перепаду тиску, щільності потоку пари і товщини шару ксерогелю, [с ⁻¹]
$\omega(n)$	n -та область періодичності тангенсу

ВСТУП

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 захисні покриття або екрани, що розташовані між джерелом тепла і об'єктом захисту, для зменшення енергетичного впливу на об'єкт захисту або для запобігання небажаному масопереносу. До них відносяться: покриття і екрани із поглинаючих матеріалів; відбиваючі екрани; екрани із матеріалів, що спучуються; захисні шари неоднорідного матеріалу.

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., Страхов В.Л., Тичино М.О., Фомін С.Л., Яковлєв А.І., Яковлєва 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., Trossarelli L., Vandersall H.L., Wang Z., Wilson M., Yu J. та інші вчені.

Роботи по використанню даних засобів йдуть у напрямку розробки нових теплоізоляційних матеріалів [1-6], визначення теплофізичних властивостей таких матеріалів [7-16], експериментального дослідження та розрахунку параметрів конструкцій при використанні цих матеріалів в процесі вогнезахисту [17-22], поведінки захищених об'єктів при різних режимах пожежі [23-28].

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 теоретичних аспектів даної діяльності. До них відноситься: виявлення основних особливостей захисної дії екранів і покриттів; математичний опис явищ із максимальним використанням фізичних законів; знаходження точних рішень відповідних задач, що надає можливість використовувати загальніші аналітичні (а не чисельні) залежності; а також, неповнота 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 виявлення основних особливостей процесів захисту речовин і матеріалів від теплової дії пожежі, відображення цих особливостей у математичного опису із максимальним використанням фізичних законів та розробки комплексу алгоритмів і програмного забезпечення для рішення прикладних задач захисту.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Частина дисертаційної роботи 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 задачі дослідження.

Метою роботи є розвиток наукових основ використання покриттів і екранів для 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 треба 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 й 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 ландшафтною 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) процесу висихання гелів при теплозахисті; 3) процесів ізоляції небезпечних рідин за допомогою шарів піноскла та гелю; *комп'ютерного моделювання* (до якого входить розробка 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 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 однобічного 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

~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 зростанні 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 знаходження 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, 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.

10. На базі оцінки променистого теплового потоку від факелу ландшафтної пожежі, який має форму довгої смуги, 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.

Всі положення, винесені на захист, та результати їх застосування наведено у роботах [29-69]. Особистий внесок здобувача в працях, які написані у співавторстві, полягає у наступному: в роботі [29] у з'ясуванні природи особливостей моделювання швидкості вигорання пального в залежності від режиму газообміну у приміщенні, а в роботі [30] у вказівці на шлях врахування цих особливостей; в роботі [32] отримані співвідношення визначення максимальної величини променистого потоку від факелу полум'я ландшафтної пожежі та ширини вогнезахисної смуги; в роботах [36, 37, 60] у застосуванні загальної моделі покриття, що спучується, одноосібної роботи [35] до випадків одного [36] та трьох [37] активних компонент у складі покриття; в роботах [38, 63] у розробці математичної моделі захисної дії одношарової тепловідбиваючої накидки та аналітичному рішенні цієї моделі; в роботі [44] у аналізі регресійного рівняння часу спалахування системи в залежності від складу і товщини захисного шару гелю; в роботі [46] у побудові математичної моделі процесу стаціонарної ізотермічної дифузії пари горючих рідин крізь ізолюючий

шар гелю; в роботі [48] у обговоренні щодо відношення експериментальних досліджень ізолюючої дії шару гелю до моделі роботи [46]; в роботі [50] у розробці моделі стаціонарної ізотермічної дифузії пари рідини крізь двошарову систему «гранульований матеріал – гель»; в роботах [38, 39] у розробці моделі поведінки крапель гелеутворюючих систем у високотемпературному газовому середовищі та чисельному рішенні цієї моделі; в роботах [40, 41, 62] у розробці моделі охолодження нагрітих поверхонь шарами вологого гелю та аналітичному рішенні цієї моделі; в патенті [54] у обговоренні впливу змочування гранульованого матеріалу на його тепло- і масо- ізоляційні властивості; у монографії [58] у написанні розділу про математичне моделювання вогнезахисної дії здатного до спучування гелевого покриття СК-1; в посібниках [55, 57] у написанні глав стосовно моделювання пожежі у приміщенні, теплообміну при фазових перетвореннях, стаціонарної і нестаціонарної теплопровідності та променистого теплообміну; в посібнику [56] 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 [65] у розробці математичної моделі захисної дії двошарового захисного екрану та комп'ютерному рішенні цієї моделі; в роботі [67] 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 Всероссийская научно-практическая конференция “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 3 навчальних посібниках, 1 монографії, а також 11 тезах доповідей на науково-технічних конференціях і 1 патенті України на корисну модель.

Структура та 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАХИСТУ РЕЧОВИН І МАТЕРІАЛІВ

ВІД ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАХИСНИХ ЕКРАНІВ І ПОКРИТТІВ

Розглянемо сучасний стан захисту речовин і матеріалів від впливу пожежі. При цьому будемо розглядати тільки пасивні способи захисту за допомогою твердих захисних екранів і покриттів. Тим самим із розгляду випадає захист за допомогою водяних завіс [70-83], або конструкцій на основі водопліткових екранів [84-89]. Не буде розглядатися вогнезахист деревини, що базується на використанні просочувальних складів [90-96].

Зразу обумовимо терміни. Тут і в подальшому ми будемо називати захисним покриттям шар захисної речовини, що безпосередньо торкається об'єкту захисту. Екраном ми будемо називати шар речовини, між яким і об'єктом захисту існує прошарок, заповнений газом, і тоді це простий екран, або заповнений речовиною в негазовій фазі чи іншим екраном, і тоді це складний екран. Будь-який захист поверхні об'єкту за допомогою прокладки з шарів (або шару) речовини ми будемо називати екрануванням.

Нас буде цікавити пасивний захист від двох типів явищ, які викликає пожежа: 1) від перегрівання об'єктів, що потрапили під вплив пожежі; 2) від інтенсифікації масопереносу небезпечних речовин (наприклад випаровування пального у розливі), яка може мати місце при пожежі. Класифікація таких способів захисту представлена на рис. 1.1.

1.1 Класифікація пасивних способів захисту від впливу пожежі

Серед об'єктів, які необхідно захищати від теплового впливу, слід виділити два великих класи, підхід до захисту елементів яких різниться – це неживі об'єкти і люди.

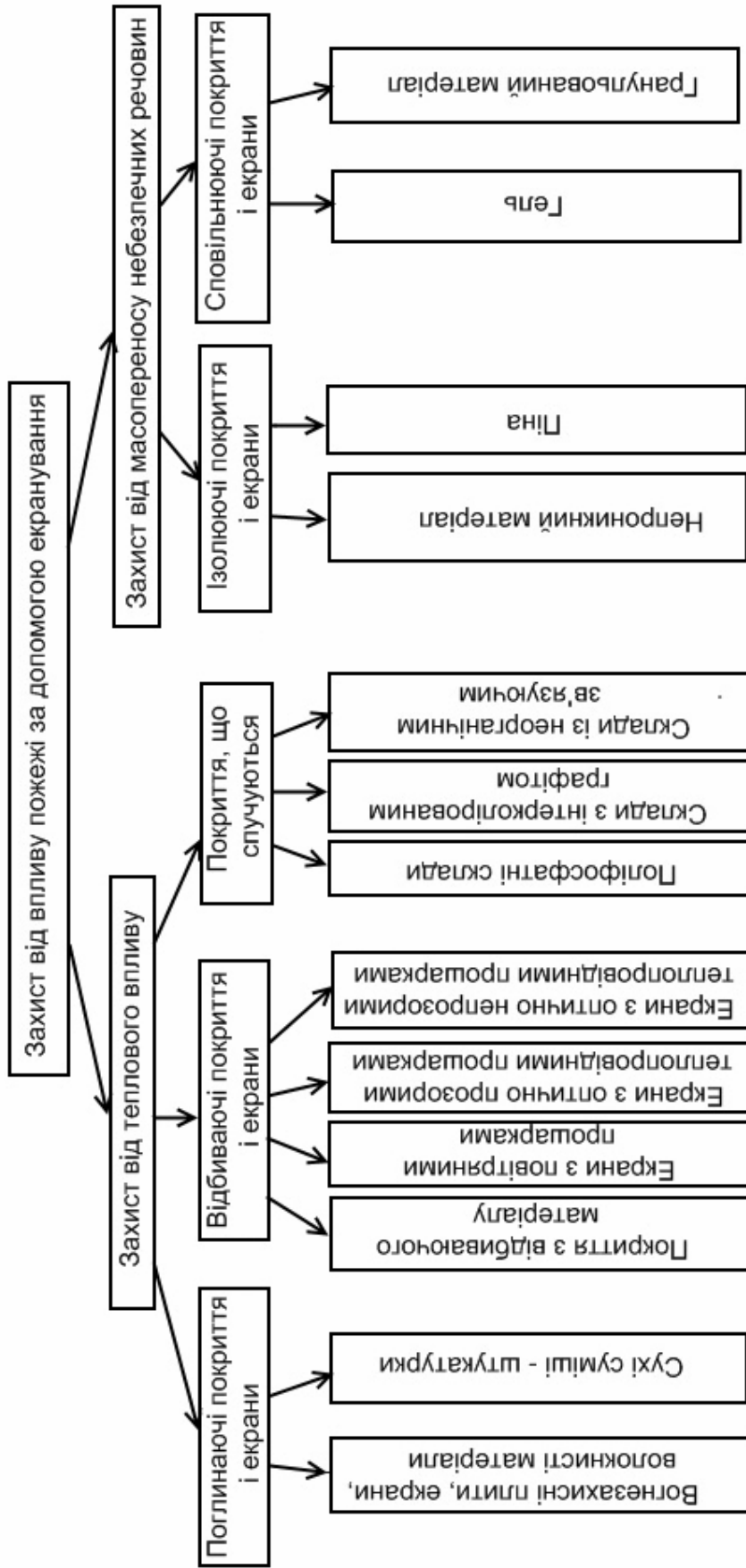


Рис. 1.1 Класифікація пасивних способів захисту від впливу пожежі за допомогою екранування

Відмітимо відмінності у захисті людей.

1) Через неможливість нанесення покриття безпосередньо на людину пристроєм захисту людини за допомогою екранування залишається екран (не покриття), причому для збільшення ефективності його дії екран має бути відбиваючим.

2) Екранування людей не повинно скасовувати їх мобільність, що накладає більш жорсткі (ніж для стаціонарних об'єктів) обмеження на вагу екрану.

3) Як правило, у випадку захисту об'єктів умовою безпеки є обмеження на рівень температури поверхні об'єкту. Через те, що у живому об'єкті діє механізм терморегуляції, який підтримує певний рівень температури поверхні тіла, важливим для виконання умови безпеки стає рівень теплового потоку, який здатен компенсувати механізм терморегуляції для забезпечення заданого рівня температури. Як результат, параметром, рівень якого необхідно контролювати при дотриманні умови безпеки людини, є результуючий тепловий потік, що потрапляє на шкіру людини.

Підведемо підсумки, для мобільного захисту людей доцільно використовувати відбиваючі екрани. Відбиваючі екрани, як правило, складніші за інші пристрої екранування, тому при захисту стаціонарних (тобто неживих) об'єктів найчастіше доцільніше використовувати поглинаючі покриття і екрани та покриття, що спучуються.

Розглянемо існуючу практичну і теоретичну ситуацію щодо відповідних способів екранування неживих об'єктів.

1.2 Захист від теплового впливу

Неживими об'єктами, що вимагають протипожежного захисту найчастіше є будівлі і споруди. Протипожежний захист будівель включає до себе комплекс технічних рішень. Одне з таких рішень – пасивний захист конструкцій спеціальними матеріалами, які забезпечують підвищення вогнестійкості конструкцій. Будівлі з не обробленими конструкціями мають

низький ступень вогнестійкості. Особливо актуально це питання проявляється у випадку незахищених металоконструкцій, які при пожежі швидко нагріваються до критичної температури, при якій втрачають свою несучу здатність, внаслідок чого руйнуються.

Для прикладу: як встановила експертна комісія, башти «Близнюки» торговельного центру у Нью-Йорку зруйнувалися не від удару літаків, а від пожежі, що почалася після цього удару і привела до втрати несучої здатності конструкції (дивись [97-99]). Вогнестійкість будівель через неналежний рівень вогнезахисту виявилася недостатньою.

Трагічні події 11 серпня 2001 року крім політичних і соціальних поставили ряд технічних проблем [23, 100-108]. До таких проблем відноситься захист унікальних об'єктів від небезпек, пов'язаних із комбінованими особливими впливами на будівлі і споруди. Однак через те, що одним із впливів є пожежа, проблема забезпечення необхідної межі вогнестійкості залишається, набуваючи більш складного характеру.

Підвищення межі вогнестійкості металевих конструкцій дозволяє забезпечити евакуацію і тим самим зберегти під час пожежі життя людей і матеріальні цінності.

Існують багато способів вогнезахисту будівельних конструкцій. Ці способи вогнезахисту поділяються на дві групи – активні і пасивні.

Активні способи являють собою системи пожежної організації: пожежна сигналізація, автоматичні системи пожежогасіння. Вони не є предметом цієї роботи і тому в ній не розглядатимуться.

Пасивний вогнезахист полягає у створенні на поверхні елементів конструкцій покриттів (екранів), що, знаходячись між джерелом тепла і конструкцією, витримуючи високі температури і безпосередню дію вогню, зменшують потік тепла, що потрапляє на конструкцію. Цей захист сповільнює прогрівання і дозволяє конструкції зберегти свої функції при пожежі протягом заданого періоду часу.

Пасивні вогнезахисні покриття поділяються на теплоізолючі (інертні поглинаючі) і реактивні:

- теплоізолюючі (інертні поглинаючі) вогнезахисні покриття не змінюють своєї фізичної форми під час нагріву і забезпечують вогнезахист завдяки фізичним і тепловим властивостям;

- реактивні вогнезахисні покриття внаслідок хімічних реакцій, викликаних нагріванням, суттєво збільшуються у товщині і змінюють форму (спучуються), чим забезпечують вогнезахист завдяки ефекту теплоізоляції.

До найбільш поширених матеріалів, що використовують при пасивному способі вогнезахисту, відносяться конструктивні вогнезахисні матеріали (плити, сегменти, блоки і т.п.), вогнезахисні штукатурні суміші і тонкошарові реактивні покриття (склади, що спучуються).

Використання вогнезахисних матеріалів підвищує межу вогнестійкості:

- вогнезахисних штукатурок (до 180 і більше хвилин);
- облицювальних вогнестійких плит (до 180 і більше хвилин);
- вогнезахисних складів (фарб), що спучуються (до 90 хв).

Вибір способу вогнезахисту несучих металевих конструкцій провадиться на основі техніко-економічного аналізу з урахуванням таких характеристик об'єкта:

- величина необхідної межі вогнестійкості конструкції;
- складність конфігурації конструкції;
- обмеження по вазі вогнезахисного покриття;
- умови експлуатації і проведення будівельно-монтажних робіт;
- ступінь агресивності навколишнього середовища стосовно вогнезахисту і матеріалу конструкції;
- необхідні строки проведення робіт;
- естетичні вимоги до конструкції.

1.2.1 Поглинаючі покриття і екрани

Розглянемо інертні способи вогнезахисту, які реалізуються за допомогою вогнезахисних штукатурок, облицювальних вогнестійких плит, матів з вогнетривкої повсті та такого іншого.

Роботи по використанню даних засобів йдуть у напрямку розробки нових теплоізоляційних вогнетривких матеріалів цього типу, визначення теплофізичних властивостей таких матеріалів, експериментального дослідження та розрахунку параметрів конструкцій при використанні цих матеріалів в процесі вогнезахисту, поведінки захищених конструкцій при різних режимах пожежі [7, 8, 17-20, 24, 109-117].

Для теплоізоляційного вогнезахисту використовуються штукатурки «Неоспрей», «Девиспрей», «Ендодерм», плити «Promatect», «Екопласт», «Ендодерм», мати МВТ-1200, шари з повсті МКРВ-200 і таке інше [7, 8, 17, 19]. Загальною їх властивістю є мале (у порівнянні з величиною $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) значення коефіцієнта теплопровідності λ . Як правило, малий коефіцієнт теплопровідності означає і малу густину ρ (у порівнянні з величиною $1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$), тобто захисні облаштування із цими матеріалами є відносно легкими. Особливо видатні властивості з цієї сторони має матеріал Pyrogel ХТ [1, 118], який складається із аерогелю та армованої нетканої скловолокнистої прокладки, має густину $180 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, і значення коефіцієнт теплопровідності в межах $0,02\text{-}0,09 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ (в залежності від температури). Вадами цього матеріалу є відносно низький рівень максимальної температури використання (650°C) і відносно велика вартість.

Широке використання у будівництві металевих конструкцій актуалізувало застосування вогнезахисних покриттів і екранів, що надало важливості теплотехнічним розрахункам властивостей цих конструкцій при наявності захисту. Розрахунок властивостей будівельної конструкції з інертним покриттям якісно не відрізняється від розрахунку цієї конструкції без покриття. Формально нанесення покриття зводиться до додачі до конструкції додаткового

теплопровідного шару з відомими властивостями матеріалу. В середині матеріалів тепло передається теплопровідністю, між шарами обмін енергією йде крізь теплопровідний контакт. Із зовнішнім гарячим середовищем контактує тільки захисний шар. На нього тепловий потік від джерел тепла потрапляє конвекцією та тепловим випромінюванням. Вироблена точка зору на процеси знайшла відображення у нормативних документах, наприклад у ДСТУ і відповідних Єврокодах [119-121], де надані конкретні рекомендації щодо оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій. У цих документах дані рекомендації і алгебраїчні співвідношення, використовуючи які, можна розраховувати характеристики захищених металевих конструкцій. Приклади використання наданих рекомендацій містяться у роботах [122, 123].

Передача тепла у захисному покритті та у будівельній конструкції описується рівнянням нестационарної теплопровідності щодо нестационарного поля температур $t(x, y, z, \tau)$, °C, відносно просторових декартових координат (x, y, z) і часу τ . Це рівняння у загальному випадку має вигляд [124, 125]:

$$c'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda(t) \cdot \text{grad}(t)], \quad (1.1)$$

$$c_*(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}[\lambda_*(t) \cdot \text{grad}(t)], \quad (1.2)$$

де λ, λ_* - коефіцієнти теплопровідності, Вт м⁻¹ К⁻¹; c', c_* - питомі об'ємні ізобарні теплоємності, відповідно, матеріалу захисного шару і будівельної конструкції, Дж м⁻³ К⁻¹. Рівняння (1.1) діє у межах захисного шару, рівняння (1.2) – у межах конструкції.

Граничними умовами до рівнянь (1.1), (1.2) на границі конструкції із захисним шаром є неперервність температури і теплового потоку. Умова неперервності потоку на цій границі має вигляд [124, 125]:

$$t|_{-0} = t|_{+0}, \quad -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{-0} = -\lambda_* \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{+0}, \quad (1.3)$$

де символом n позначена просторова координата, яка на границі спрямована по нормалі до границі у напрямку від захисного шару, при цьому границі відповідає значення $n = 0$.

Гранична умова до рівняння (1.1) на границі захисного шару з боку джерел тепла також відображає неперервність теплового потоку. Вона має вигляд [124, 125]:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n'} \Big|_s = q_r - \alpha \cdot [t|_s - t_f], \quad (1.4)$$

де символом n' позначена просторова координата, яка на границі спрямована по нормалі до границі у напрямку до захисного шару; індекс «s» вказує на визначення величини на граничній поверхні; α – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі з даної поверхні у навколишнє середовище, Вт м⁻² К⁻¹; t_f – температура навколишнього середовища, °С.

Результуюча щільність потоку теплового випромінювання q_r , що падає на поверхню, визначається співвідношенням [55, 119, 126]:

$$q_r = \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot [T_{ff}^4 - T|_s^4] \cdot \psi, \text{ Вт м}^{-2}, \quad (1.5)$$

де ε_f і ε'_s – ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) полум'я і зовнішньої поверхні захисного шару, відповідно; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт·м⁻²·К⁻⁴ – константа випромінювання абсолютно чорного тіла; T_{ff} – абсолютна ефективна температура полум'я, К (у разі, коли полум'я відсутнє, у формулу (1.5) замість T_{ff} підставляють абсолютну температуру гарячого середовища

$T_f = t_f + 273, \text{ K}$; ψ - середній коефіцієнт опромінення елементу поверхні захисного шару на поверхню полум'я (кутовий коефіцієнт).

Відмітимо, що у багатьох випадках $T_{ff} \gg T|_s$, через що у виразі (1.5) зникає залежність від температури поверхні захисного шару:

$$q_r \approx \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot T_{ff}^4 \cdot \psi. \quad (1.6)$$

Для закінчення опису (у сенсі граничних умов) треба задати умови на поверхні, яка не покрита захисним шаром (якщо така поверхня існує). На границі з теплопровідним контактом ці умови мають вигляд аналогічний співвідношенню (1.3), на границі з текучим не гарячим середовищем вигляд умов аналогічний формулі (1.4) з меншими величинами теплових потоків.

Якщо конструкція достатньо товста (тобто її прогрів за час розгляду не відображається на холодних поверхнях), то її розглядають як термічно товсте (масивне) тіло і другою граничною умовою стає обмеженість температури вдалині від гарячої поверхні.

У разі металевих конструкцій найчастіше реалізується варіант термічно тонкого тіла (ТТТ), при якому просторова зміна температури у межах конструкції нехтовно мала у порівнянні із середнім значенням температури, тобто поле температур у межах конструкції є практично однорідним. Така ситуація має місце, якщо виконується вимога малості критерію Біо [55, 57, 126]

$$Bi_* = \frac{\alpha_2 \cdot l}{\lambda_*} \ll 1, \quad (1.7)$$

де α_2 – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі з вільної поверхні ТТТ у навколишнє середовище, $\text{Вт м}^{-2} \text{ К}^{-1}$; l – характерний розмір задачі теплообміну, м.

Такий стан суттєво спрощує опис. Виявляється, що в однакових умовах геометрично різні термічно тонкі тіла прогриваються однаково, якщо вони мають однакові значення зведеної товщини

$$\delta_* \equiv \frac{V}{F_c}, \quad (1.8)$$

де V і F_c – відповідно, об'єм ТТТ і площа його теплового контакту із гарячим середовищем.

Ця обставина дозволяє, вирішивши задачу прогріву для ТТТ простої конфігурації, розповсюдити отриманий результат на інші ТТТ.

Більшість робіт, пов'язаних з розрахунками температури захищених (і не захищених) конструкцій, вирішують систему рівнянь (1.1) – (1.4). Не глядячи на важливість аналітичних рішень, більшість результатів отримується внаслідок чисельного рішення системи. У такої ситуації є дві важливих причини:

1) у разі залежності коефіцієнтів системи від температури, система є нелінійною, внаслідок чого її навіть формальні аналітичні рішення невідомі;

2) у разі можливості нехтувати залежністю коефіцієнтів рівнянь від температури система стає лінійною, однак пошук неформального аналітичного рішення суттєво ускладнюється разом із геометрією задачі.

Лінійні задачі про нагрів одиночних незахищених тіл простої форми вирішені [124]. Захист за допомогою покриття означає реалізацію ситуації не менш ніж 2-ох тіл. Тут аналітично вирішена тільки задача прогріву термічно товстого тіла із плоскою поверхнею крізь захисне покриттям, що має форму нескінченного площинного шару. При цьому зовнішній вплив на покриття задається рідкісними на практиці граничними умовами 1-го роду.

Одним із важливих питань є розрахункове визначення захисної дії покриття в умовах, коли його товщина є величиною, що випадково змінюється вздовж поверхні покриття. Найбільш розповсюдженим варіантом рішення такої

задачі є використання співвідношень, які отримані для випадку фіксованої товщини, в які в якості цієї товщини підставляють її математичне очікування.

1.2.2 Покриття, що спучуються

Розглянемо ситуацію з вогнезахистом за допомогою реактивних покриттів. До них відносяться матеріали (фарби, лаки, обмазки), що при нагріванні багаторазово збільшують об'єм. В результаті утворюється захисний шар із значним термічним опором, що значно уповільнює прогрівання об'єкту вогнезахисту.

Механізм цього явища значно складніший за звичайне теплове розширення. Теплове розширення [127] в основному обумовлене ангармонічністю теплових коливань. Причини розширення реактивних покриттів при нагріванні інші. Таке «надрозширення» [128] здійснюється механізмами, що мають загальні риси: 1) наявність внутрішніх джерел збільшення об'єму – хімічних перетворень (розпадів із утворенням продуктів у газовій фазі); 2) наявність деякої критичної температури нагріву, починаючи з якої «вмикається» фізико-хімічний механізм збільшення об'єму; 3) рідиноподібний стан основної маси під час зростання об'єму.

Механізми «надрозширення» можна поділити на три форми:

- вспінювання - вспінювання низьков'язкого розплаву у більшості маси (класичний приклад – склад на основі тріади «поліфосфат амонію – пентоерітріт – меламін»), дивись рис. 1.2;

- спучування - утворення і зростання внутрішніх порогазових макропорожнин у високов'язких розплавах (приклад – композиції на основі натрій силікатного скла із наповнювачем), дивись рис. 1.3;

- теплове розшарування - збільшення об'єму твердих включень наповнювача (який приклад включень – інтеркалірований графіт), дивись рис. 1.4.

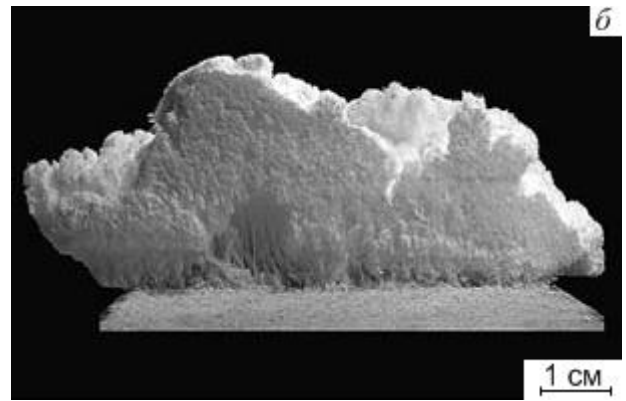
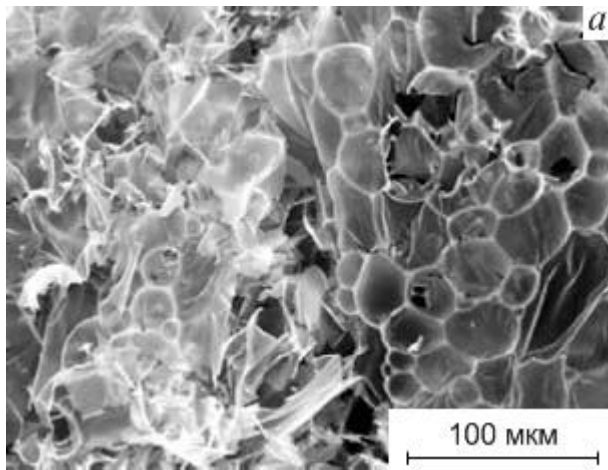


Рис. 1.2 Вспінене покриття на основі органо-неорганічного складу (а) та натрій-силікатного скла без наповнювачів (б) [128]

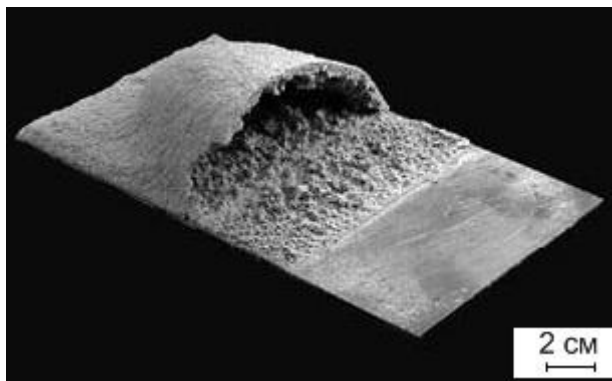


Рис. 1.3 Спучене покриття на основі натрій-силікатного скла з наповнювачем [128]

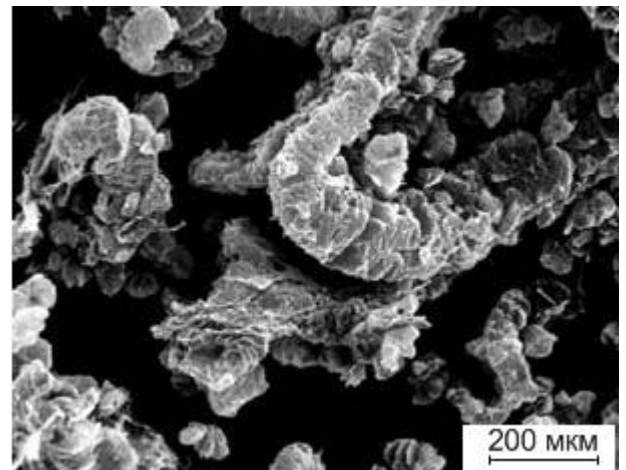


Рис. 1.4 Пінококс на основі композиції з графітом JLS-GR-1002 [128]

У подальшому у даній роботі, там де це не має принципове значення, замість терміну «надрозширення» буде використовуватися більш звичний термін «спучування».

Роботи по використанню пов'язаного з «надрозширенням» способу вогнезахисту йдуть у напрямку розробки нових матеріалів цього типу, утворення матеріалів із заданими властивостями, визначення теплофізичних властивостей таких матеріалів, визначення впливу старіння покриттів на їх

вогнестійкість, експериментального дослідження та розрахунку параметрів конструкцій при використанні цих матеріалів в процесі вогнезахисту. Важливою складовою є діяльність по дослідженню фізико-хімічних механізмів дії таких складів, математичному моделюванню як окремих стадій процесів розширення, так і дії покриття у цілому.

Так роботи [2-6, 9-13, 129, 130] присвячені розробці покриттів із заданими властивостями, впливу різних складових на ці властивості. Як правило, відомо, які властивості складу посилює (чи послабляє) той чи інший його інгредієнт. Проблема полягає у тому, що кожна складова різнопланово впливає на декілька важливих властивостей (таких як спучуваність, і пов'язана з нею теплоізоляційна здатність, міцність, довговічність, адгезія, токсичність, вартість і т.д.). Через це задача підбору складу є задачею оптимізації, через що різним цільовим функціям відповідають різні оптимальні склади.

У роботі [14] розглянуті властивості вогнезахисних композицій на базі водо-дисперсних матеріалів. Представлені результати випробувань на вогнестійкість сталевих зразків, які захищені вогнезахисними складами, а також дані на вологопроникність та експлуатаційні властивості вогнезахисних композицій. Встановлено, що вуглекислий амоній, сульфокислий кальцій та хлорид амонію перспективні як присадки до складу водо-дисперсних матеріалів, які використовують для вогнезахисту металевих конструкцій.

В роботах [15, 25-28, 131-137] досліджуються властивості конкретних складів. Так у роботі [131] було вивчено вплив співвідношення фосфатів амонію та водорозчинних амонійних солей амінометиленфосфонових кислот на вогнезахисні властивості покриттів, що вспінюються. Показана висока ефективність застосування отриманих покриттів для конструкцій із металу і деревини. У роботі [132] був зроблений підбір гелеутворюючих систем для отримання вогнезахисних покриттів, здатних до спучування. У роботі [133] наведені результати дослідно-промислових випробувань розроблених із вітчизняної сировини вогнезахисних композицій, що спучуються. Дослідження показали, що використання даних матеріалів підвищує рівень безпеки.

У роботах [134-136] визначається зміна властивостей покриття внаслідок старіння. У роботах [25-28] досліджується вплив на вогнезахисну дію різних режимів або спеціальних умов пожежі. У роботі [137] вивчалось питання щодо мінімальної товщини вогнезахисного покриття, що спучується. У роботі [15] вимірювалася теплопровідність спучених покриттів. У роботі [16] проводилися термогравіметричні дослідження здатних до спучування вогнегасник та вогнезахисних гелів.

Не втратив актуальності огляд [138] фізико-хімії здатних до спінювання вогнезахисних покриттів на основі поліфосфата амонія. Огляд присвячено узагальненню існуючих уявлень о фізиці і хімії перетворень, що мають місце в органофосфатоамонійних складах в ході їх нагрівання до високої температури, яка характерна для умов пожежі. Для таких складів механізмом «надрозширення» є вспінювання із подальшим утворенням пінококса.

Для визначення поведінки конструкцій, покритих здатними до спучування складами, як правило, використовують експериментально-розрахункові підходи [21, 22, 139-142].

Так у роботі [21] була розглянута розрахункова методика, яка дозволяє визначати температурні поля конструкцій, покритих шаром спучуваного вогнезахисного складу. Для спучуваного покриття використовувалась двофазна модель - «холодна фаза»+ «фаза, що спучилась». Шляхом чисельного експерименту досліджувалась динаміка спучуваного шару і його вплив на вогнестійкість конструкції.

У роботі [22] розглядалася можливість прогнозування швидкості нагрівання металевих конструкцій із вогнезахисним покриттям, що спучується, за результатами випробувань малогабаритних зразків у лабораторних дослідженнях. Для цього експериментально визначається залежність умовного ефективного коефіцієнта теплопровідності вогнезахисного шару від температури підкладки, а далі розраховується нагрів конструкції із врахуванням отриманої експериментальної залежності, а також масивності

підкладки. Розрахункові дані порівнюються з результатами випробувань на стандартних зразках.

У роботах [139-141] визначення характеристик вогнезахисної здатності вогнезахисних покриттів, що спучуються, проводилося розрахунково-експериментальним методом із використанням рішення зворотної задачі теплопровідності [142]. Формально розглядалася задача прогріву тіла і захисного покриття із незмінними розмірами, механізмом звичайної теплопровідності, якій відповідають співвідношення (1.1)-(1.5), із залежністю коефіцієнтів теплопровідності $\lambda(t)$ і теплоємності $c'(t)$ покриття від температури t . Вид цієї залежності постулювався. Далі на основі рішення системи (1.1)-(1.5) визначалися розрахункові величини поля температур t_{cal} у вибраних точках системи, які порівнювалися з експериментальними значеннями температур t_{exp} у цих точках. Вид залежностей $\lambda(t)$ і $c'(t)$ знаходився із умови мінімізації виразу

$$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (t_{exp,j} - t_{cal,j})^2}{n}} \quad (1.9)$$

де n - кількість вимірів, які роблять для рішення зворотної задачі; індекс j відповідає j -му виміру.

Властивістю даного підходу є відсутність у ньому спучування (а саме зміни товщини захисного шару в розрахунках процесу прогріву). Як результат, реально існуюча залежність від сценарію спучування у скритій формі міститься у функціональних залежностях $\lambda(t)$ та $c'(t)$, які в дійсності є якимось зведеними (умовними) значеннями параметрів. При різних режимах нагріву вид функцій $\lambda(t)$ та $c'(t)$ буде різним, що обмежує область застосування кожного отриманого результату не тільки складом захисного покриття, а і використаним режимом прогріву.

Можливість поширення експериментальних результатів, отриманих при конкретному режимі прогріву, на інші режими прогріву вимагає наявності адекватної моделі процесу спучування. Серед рівнянь такої моделі обов'язково повинні бути ті, що безпосередньо відображають спучування. Ця ситуація робить важливим розробку математичних моделей спучування, як фізико-хімічного процесу.

Через складність і різноманітність процесу «надрозширення», кожен з його варіантів (спінювання, спучення, теплове розшарування) може мати свої моделі, які будуть ускладнюватися по мірі деталізації. Через складність явищ кожна така модель має вільні параметри, чисельне значення яких через складності теоретичного визначення треба знаходити експериментально.

Так модель [143] є варіантом математичної моделі спінювання складу на основі епоксидної смоли (в якості зв'язуючого) і поліфосфата амонія (в якості газоутворювача) з подальшим утворенням пінококсу.

У роботі [144] розглянута математична модель водовмісних здатних до спучування вогнезахисних покриттів. Базовими співвідношеннями моделі є закони збереження речовини і енергії. Модель розглядає неспучене покриття як насичене водою пористе середовище. У моделі враховуються процеси випаровування води на фронті нагріву, переніс виниклої водяної пари під дією градієнту тисків у холоднішу область і подальшу її конденсацію у цій області. Згідно із моделлю спучення проходить при більш високих температурах ніж процеси пароутворення води. В цій моделі рівняння спучування не є наслідком рівнянь фізичних явищ. Функція, яка відображає спучування, є залежністю виключно від температури. Ця функція має невизначені коефіцієнти, чисельне значення яких визначається із експерименту. Модель показала задовільне узгодження на прикладі водовмісного покриття на неорганічній основі ОСП-1.

Необхідна модель, яка природнім образом відображає процес спучування. Вона повинна спиратися на закони збереження енергії і речовини у фізико-хімічних процесах, що супроводжують спучування. Крім цього бажано, щоб в такій моделі спучування (тобто значне зростання об'єму захисного покриття в

ході нагрівання) витікало з рівнянь фізичних процесів, а не вводилося формальною функцією. Таку модель треба побудувати з метою використання її для опису відповідного процесу вогнезахисту.

1.2.3 Відбиваючі екрани

Розглянемо ситуацію щодо захисту від теплового впливу пожежі за допомогою відбиваючих екранів. Екран є більш складним об'єктом ніж покриття, який ще й вимагає більшого простору для розташування. Такі властивості є недоліками екранів. Через це використання екранів доцільно там, де вони мають переваги у порівнянні із покриттями. До переваг екрану відноситься відсутність прямого контакту із об'єктом захисту і можливість реалізації мобільного екрану. Саме ці властивості екранів важливі при забезпеченні захисту людей. Саме для цього найчастіше використовуються нестационарні відбиваючі екрани.

Екрануючий (тобто послаблюючий пряму дію) ефект мають шари будь-якого матеріалу, наприклад звичайного одягу (останній діє, як поглинаючий екран). Відбиваючий екран перш за все відбиває значну частину потоку падаючого теплового випромінювання. Через це його захисний потенціал при інших рівних умовах перевищує можливості звичайного матеріалу, який або поглинає падаючий тепловий потік (через що нагрівається) , або пропускає його далі, не реалізуючи захисту.

У протипожежній практиці прикладом захисту людей відбиваючим екраном є захист за допомогою вогнезахисної накидки або вогнезахисного костюму, зовнішній шар якого зроблений із відбиваючого теплове випромінювання матеріалу. Такий костюм крім відбиваючого шару, як правило, має ще додаткові шари звичайного теплопровідного матеріалу (тканини). Відмітимо що через нещільне прилягання шарів в системі найчастіше ще є повітряний прошарок. Таким чином вогнезахисний костюм веде себе як багатошарова система.

Вимоги до вогнезахисних костюмів, які називають спеціальним захисним одягом від підвищених теплових впливів (СЗО ПТВ), та методи їх випробувань викладені у відповідних нормативних документах [145, 146]. В залежності від ступеня теплового захисту СЗО ПТВ підрозділяються на три типи виконання: важкий, напівважкий і легкий у відповідності до таблиці 1.1 [146].

Таблиця 1.1

Тип виконання СЗО ПТВ	Умови експлуатації				
	Температура, °С	Час впливу, с, не менше	Тепловий потік, кВт/м ²	Час впливу, с, не менше	Допустимий час впливу відкритого полум'я, с, не менше
Важкий	200	960	18,0	960	30
	800	20	25,0	240	
			40,0	120	
Напівважкий	200	600	10,0	900	20
			18,0	600	
Легкий	200	480	10,0	480	15

Основні роботи, які мають відношення до використання відбиваючих екранів для захисту людей від теплового впливу пожежі, присвячені різним аспектам застосування теплозахисних костюмів [147-164].

Одним із аспектів є можливість зовнішнього шару одягу при нагріванні вступати у ендотермічні хімічні реакції. Так у дослідженні [147] «розроблено математичну модель взаємодії спеціальних матеріалів захисного одягу пожежників з температурними факторами і відповідна методика розрахункового експерименту для аналізу числових значень параметрів, яка розглядає полімерний композитний матеріал захисного одягу пожежників як

тришарову композицію в складі: а) поверхневий шар між одягом і зовнішнім середовищем, в якій відбувається процес горіння; б) сердечник (основа); в) поверхневий шар між одягом і внутрішнім середовищем (підкостюмний простір)».

Запропонована модель дозволила визначити шляхи підвищення захисних якостей спеціальних матеріалів одягу пожежників від високотемпературних факторів.

У роботі [148] експериментально досліджувався вплив інфрачервоного випромінювання на організм людини, одягненої у захисний одяг пожежного. Для вивчення впливу інфрачервоного випромінювання на підкостюмний простір було обґрунтовано та вибрано 11 контрольних точок для вимірювання температури. Місця розташування цих точок на манекені збігаються з оптимальними температурними зонами організму з точки зору фізіології людини.

У роботах [149, 150] розглянуті питання щодо вдосконалення обладнання і методик дослідження термозахисних властивостей захисного одягу пожежників. Порівнювалися впливи різних штучних джерел тепла таких як ІЧ випромінювачі, газові пальники та інші (дивись рис. 1.5, рис. 1.6). Підкреслена важливість полігонних досліджень з джерелами теплового випромінювання близькими до джерел, які мають місце в умовах реальних пожеж.

У дослідженнях [151] обґрунтовано параметри персонального сигналізатора небезпечного рівня густини теплового потоку для спорядження ним захисного одягу пожежника-рятувальника.

В роботі [152] «Викладено результати експериментальних досліджень з визначення показників температурних режимів підкостюмного простору при дії підвищеної температури. На основі проведених стендових експериментальних досліджень із застосуванням манекена у теплозахисному одязі, обґрунтовано та визначено найбільш ефективне розміщення приладу контролю температурних режимів підкостюмного простору.»

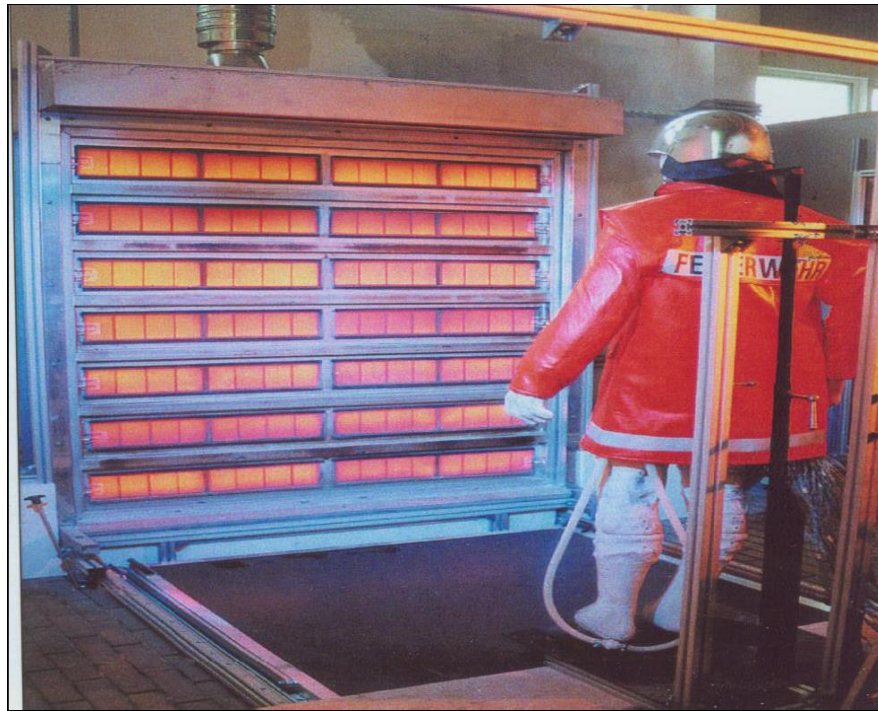


Рис. 1.5 Стенд теплових панелей, який використовується для випробування захисного одягу [150]

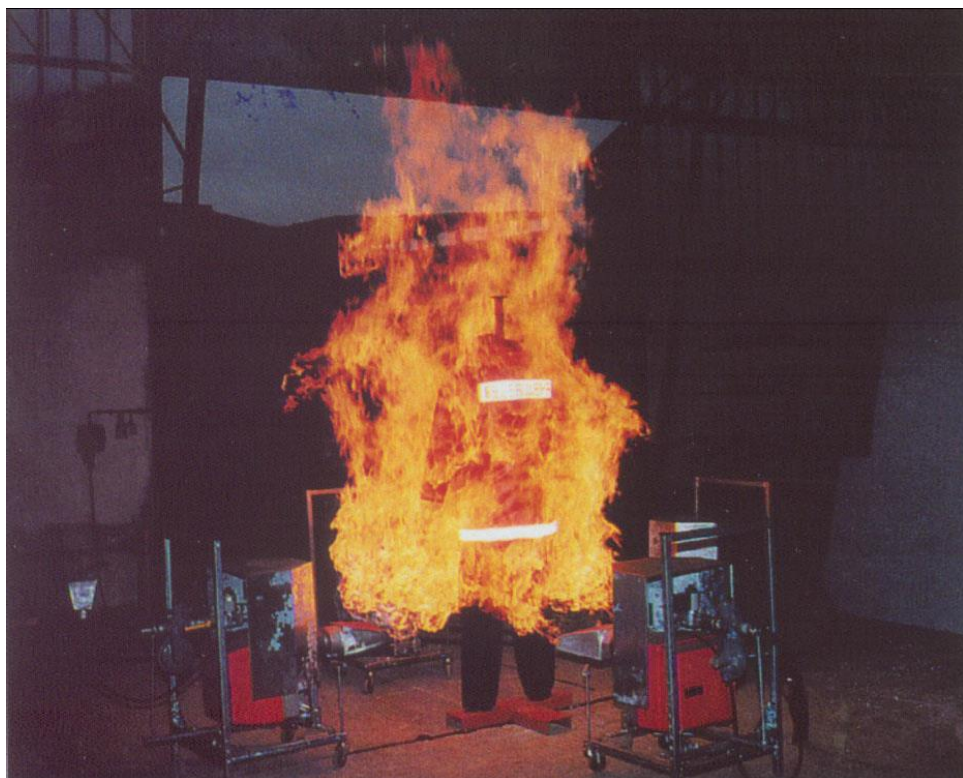


Рис. 1.6 Газові пальники, які використовуються для випробувань захисного одягу [150]

Зразу відмітимо, що експериментальні результати, отримані з використанням манекенів, неможна напряду переносити на людей, бо тіло людини (на відміну від манекену) має власну внутрішню систему терморегуляції. Коли ця терморегуляція приводить до потовиділення, ситуація додатково ускладнюється, бо вода у підкостюмному просторі змінює теплообмін.

Вплив навіть незначної кількості води на теплозахисні властивості був продемонстрований у експериментальній частині роботи [153]. Було показано, що добавка 1 г води на 1 см² матеріалу, що відповідає кількості виділення поту при важкому фізичному навантаженні та температурі підкостюмного простору в межах 24–50°C, призводить до зменшення часу захисної дії на 28%.

Питання щодо теплозахисту людей за допомогою теплозахисних костюмів можна поділити на ті, що відображають: 1) конструктивні особливості костюмів і принципи їх захисної дії; 2) параметри, на які краще орієнтуватися при визначенні теплового стану пожежних та основні чинники, які треба враховувати, при оцінці можливості виконання роботи; 3) чинники (крім зовнішнього теплового потоку), які необхідно враховувати при складанні співвідношень теплового балансу. Питання всіх цих типів є у дослідженнях [154-158]. До першого типу питань відноситься питання щодо можливості використання додаткових джерел охолодження (водольодяного акумулятора). До другого – використання в якості основного параметру, що відображає ізолюючі властивості теплозахисного костюму, значення температури середовища у підкостюмному просторі. Чинниками, які при цьому треба враховувати, є час і інтенсивність навантажень. До третього типу питань відноситься врахування у співвідношеннях теплового балансу випару поту пожежного. Ці обставини викладено у анотації до [159]: «Удосконалено фізико-математичну модель теплообміну організму пожежного у разі ерготермічних навантажень в ізолюючому одязі з водольодовими акумуляторами холоду, що враховує нестационарні процеси фазового переходу холодоагенту, теплові потоки з навколишнього середовища та тіла людини, а також конструктивні

особливості теплоізолюючої оболонки. Обґрунтовано оптимальні параметри захисного одягу і час безпечного перебування пожежних за умов високих ерготермічних навантажень. Запропоновано новий комплексний критерій оцінки ізолюючих властивостей даного одягу на підставі визначення теплового стану пожежних, який базується на використанні значення температури в підкостюмному просторі. Уточнено складові частини теплового балансу у системі "навколишнє середовище - захисний одяг - людина" для реальних температурних умов, а саме: величини теплових потоків, спричинених конвекцією; радіації та випару поту пожежного.»

Роботи [160-162], як і [154, 155, 158], розглядають питання щодо застосування у захисному одязі систем охолодження з використанням як водольодяного акумулятора, так і проточної води і повітря.

В якості подальшого розвитку наукових досліджень [163, 164] розглядаються питання щодо застосування газотеплозахисних костюмів, які забезпечують захист не тільки від впливу теплових факторів, а і від надмірної вологості, задимленості, загазованості довкілля.

В більшості робіт при теоретичному описі захисної дії теплозахисного одягу зовнішній відбиваючий теплове випромінювання шар його розглядають, як теплопровідну пластину кінцевої товщини. Поверхні цієї пластини (відбиваючого екрану) характеризують відповідними відносними випромінювальними здатностями. Теплове випромінювання всередині пластини не розглядають. Такий опис означає погляд на цей шар, як на оптично непрозоре тіло. Він (опис) приводить до необхідності вирішувати рівняння нестационарної теплопровідності в межах екрану, що значно ускладнює рішення загальної задачі теплообміну між джерелом тепла і об'єктом захисту. У випадках, коли екрануючий шар є термічно тонким тілом, задача значно спрощується. Саме цю ситуацію, яка майже завжди на практиці реалізується для металізованих матеріалів, необхідно дослідити.

Відмітимо ще одну обставину. У значній частині робіт, що містять теоретичний опис передачі тепла крізь повітряний прошарок між тілом

пожежного і екрануючим шаром, цей процес теплообміну розглядають як два окремих процеси конвекційної тепловіддачі: 1) між екраном і повітрям прошарку; 2) між повітрям прошарку і поверхнею тіла пожежного. У випадку вільної конвекції середовища у прошарку такий підхід з методичної точки зору є помилковим. Через вузькість прошарку два останні процеси фізично неможливо розділити. Реалізується єдиний рух середовища у просторі між двома поверхнями. При описі відповідного теплообміну треба від самого початку використовувати рівняння конвекційного теплообміну у обмеженому просторі [125].

1.2.4 Гелеві теплозахисні покриття

Одним із основних практичних способів захисту поверхонь тіл від теплового впливу пожежі є їх зрошення водою, яке, відводячи надлишки тепла, або охолоджує вже нагріту поверхню, або не дозволяє їй нагріватися до небезпечного рівня.

Використання води має цілий ряд переваг, до яких відноситься доступність і дешевизна, простота збереження і використання, відсутність отруйності, відносні хімічна інертність та термічна стійкість. Унікально висока охолоджувальна здатність води є наслідком її значної теплоємності і високої теплоти випаровування. Висока рухливість і мала стисливість забезпечує легкість транспортування води і доставку її (у виді суцільних струменів) до місця використання.

Основним недоліком використання води для цілей охолодження шляхом поливу (як і практично будь-якої рідини) є низьке значення коефіцієнта використання. Так при гасінні пожеж цей коефіцієнт не перевищує 10% [56]. Основною причиною такої ситуації є стікання води з нахилених та вертикальних поверхонь. Це призводить до необхідності багаторазової обробки одного і того ж об'єкту, що суттєво зменшує можливості захисту.

Вказаний недолік відсутній у гелеутворюючих систем (ГУС), які спочатку були запропоновані, як засіб пожежогасіння [165-167]. Вони являють

собою два склади, що зберігаються окремо, і подаються окремо-одночасно. Перший склад є розчином гелеутворюючого компонента, другий склад – розчином каталізатора гелеутворювання. При одночасній подачі двох розчинів вони змішуються на поверхні пожежогасіння чи охолодження. Взаємодія між компонентами призводить до утворення стійкого гелю, шар якого (при відповідній подачі) надійно утримується на вертикальних і похилих поверхнях.

Основна перевага ГУС перед водою полягає у суттєвому зменшенні втрат, що пов'язані із стіканням.

Основою вогнезахисної дії вологого гелю є два процеси: 1) висихання гелю, тобто ендотермічний процес видалення води з утворенням все більш сухого ксерогелю [168]; 2) опір процесу передачі тепла крізь звичайний поглинаючий тепло прошарок, матеріал якого (ксерогель) має низьке значення коефіцієнту теплопровідності.

Однією з переваг ксерогелевих покриттів є мала трудомісткість їх нанесення на дерев'яні конструкції. Їх можна наносити методом напилення, причому одноразове нанесення дозволяє отримати шар товщиною до 10 мм [169].

Недоліком ксерогелевих вогнезахисних покриттів є їх легке відшаровування від поверхонь захисту і суттєве розтріскування за рахунок усадки під час сушіння. Це не дозволяє використовувати їх для довготривалого вогнезахисту деревини. Крім цього існує проблема зниження вогнезахисних властивостей покриттів на основі силікатів при старінні. Це пояснюється розкладанням силікатної каркаса під впливом вуглекислого газу із повітря [170]. Силікатна основа покриття при старінні втрачає міцність, і утворюються, так звані, "висоли" у вигляді білого нальоту на поверхні.

Вказані проблеми вдалося подолати шляхом підбору складу ГУС на основі силікатів. Пошуку відповідних складів, дослідженню їх властивостей і визначенню способів застосування присвячені роботи [171-182], кінцеві результати яких відображені у монографії [58] та обзорі [183].

В цілому теоретичні аспекти використання ГУС вимагають подальшого опрацювання.

1.3 Захист від небажаного масопереносу

Ряд небезпечних ситуацій характеризується тим, що в атмосферне повітря потрапляють пари пожежонебезпечної (горючої) чи токсичної речовини, які з'являються внаслідок випаровування відповідної рідини з її вільної поверхні. Така вільна поверхня утворюється внаслідок розливу рідини, чи розгерметизації ємності, у якій ця рідина утримувалася. Захистом від такого небажаного масопереносу небезпечної речовини може бути повна або часткова ізоляція цієї речовини, яка здійснюється за допомогою, відповідно, ізолюючих або сповільнюючих масоперенос екранів чи покриттів.

1.3.1 Ізолюючі покриття і екрани

Найпростішим варіантом ізоляції такого типу є засипання джерела випаровування інертною речовиною, наприклад піском. Такий спосіб є доцільним при малих площах поверхні випаровування (не більших за $\sim 1 \text{ м}^2$) і невеликих об'ємах рідини. При більших обсягах найчастіше в якості ізолюючого покриття виступає шар повітряно-механічної піни. У практиці цивільної безпеки піну найчастіше використовують як засіб пожежогасіння пожеж класу В [184-188].

Піни отримують з робочих розчинів піноутворювачів. За умовами зберігання піни відносять до рідкофазних сполук, за умовами застосування вони є двофазними системами. Піна – дисперсна система, що складається з газоподібної дисперсної фази і рідкого дисперсійного середовища [189, 190]. Для піни характерна комірково-плівкова структура, в якій заповнені газом осередки розділені тонкими рідкими плівками піноутворювача. Піни є термодинамічне нестійкими системами. До руйнування пін призводять три основних процеси: 1) зменшення товщини плівок з часом; 2) дифузійне перенесення газу з малих комірок у великі; 3) стікання дисперсійного

середовища під дією сили тяжіння. Необхідною умовою утворення піни є наявність у воді поверхнево-активних речовин (ПАР). Вони зменшують енергію, потрібну для утворення нових поверхонь розподілу, і частково збільшують стійкість плівок.

Зараз в переважній більшості випадків в якості газового наповнювача пін використовується повітря. Використання замість повітря інших газів, що не підтримують горіння, призводить лише до незначного збільшення вогнегасних характеристик піни [189, 190]. Одночасно з цим помітно ускладнюється процес отримання таких пін і збільшується їх вартість.

Важливою характеристикою піни, яка обумовлює її застосування, є кратність піни, яка є відношенням об'єму піни до об'єму піноутворювача, із якого піна утворилася. Піни поділяються на піни низької кратності (кратність не більша за 20), піни середньої кратності (кратність від 20 до 200), піни високої кратності (кратність більша за 200).

Основою вогнегасного механізму дії пін є ізоляція пари горючої рідини від зони горіння [191-194]. Присутність піни на поверхні рідини істотно сповільнює швидкість надходження пари рідини в зону горіння. Одночасно піна екранує поверхню рідини від зовнішнього теплового потоку (теплова ізоляція), що уповільнює прогрів поверхневих шарів горючих речовин, що у свою чергу зменшує інтенсивність випаровування. Потрапляючи на поверхню рідини, піна охолоджує і розбавляє рідину, що також сприяє припиненню горіння.

Через дуже низьку густину пін, існують проблеми з подачею пін на великі відстані. Збільшення швидкості пінного струменя одночасно зі збільшенням дальності подачі призводить до більшого руйнування піни.

Одним із негативних моментів у застосуванні пін є наявність у піноутворювачах екологічно небезпечних ПАР. Токсичності та екологічній небезпеці ПАР присвячена велика кількість наукових досліджень [195-200].

ПАР здійснюють комбінований негативний вплив на організм людини. Зазначається, що при попаданні в організм людини ПАР: 1) здатні викликати

порушення важливих біохімічних процесів, що протікають в клітинах організму, порушити функцію клітини і саму її цілісність; 2) стимулюють резорбцію речовин в шлунково-кишковому тракті; 3) підвищують вміст холестерину в крові; 4) змінюють екскреторну функцію печінки; 5) змінюють водний і електролітний баланси організму; 6) порушують біоенергетику і окисно-відновні процеси в організмі; 7) демонструють синергетичну дію - створюють передумови посилення токсичної дії інших небезпечних речовин.

Застосування більш екологічно безпечних ПАР в складі піноутворювачів (протеїнових рослинного та тваринного походження) призводить до погіршення вогнегасних характеристик відповідних пін.

Одним з перспективних способів, що забезпечують тривалу ізоляцію поверхні випаровування пролитої горючої рідини і попередження займання її парів, є застосування швидко твердіючої піни (ШТП) низької кратності. Така піна здатна з плином часу мимовільно переходити у твердий стан, суттєво знижуючи екологічне навантаження на атмосферу від продуктів аварійного розливу [201-203].

Тривалість ізолюючої дії таких пін може становити кілька діб. Ця обставина є вирішальним фактором щодо використання таких пін для перешкоджання поширенню пари небезпечної рідини в навколишнє середовище.

Особливо ефективним є застосування ШТП при подачі на палаючу рідину, оскільки до затвердіння піна покриває всю поверхню і припиняє горіння, а в подальшому перешкоджає повторному займанню пароповітряної суміші.

Приблизний об'ємний склад водного розчину ШПТ складає карбамідоформальдегідної смоли - 10-25 %, піноутворювача (Пунш-С) – 5 %, ортофосфорної кислоти – 2-4 %.

Експериментальні дані, отримані при визначенні ізолюючої здатності ШТП, на поверхні дизельного палива показують, що питома втрата маси горючої рідини з-під шару твердіючої піни товщиною 1 см знижується в три

рази. Збільшення шару ШТП призводить до подальшого зниження втрати маси пального в ході випаровування. Так при покритті дизельного палива ШТП шаром 4 см, питома втрата маси пального знижується в 12 разів. Використання ШТП для ізоляції поверхні нафти, гептану і октану призводить до зниження забруднення атмосфери їх продуктами випаровування, не менше ніж у два рази. Збільшення товщини шару ШТП призводить до зниження процесу випаровування нафти і нафтопродуктів. Таким чином, ШТП здатна забезпечувати тривалий захист поверхні горючої рідини, в тому числі нафтопродуктів від випаровування і забезпечувати пожежовибухонебезпеку робіт при ліквідації аварій, пов'язаних з їх аварійними розливами.

Істотним розвитком методу пінного пожежогасіння є розробка вогнегасних ШТП на неорганічній основі (кремнезему) [204]. У цьому методі (золь-гель способі) поєднується процес спінювання і гелеутворювання в результаті чого протягом часу від 2 секунд до 2 хвилин відбувається твердіння піни. Утворюється стійка тверда піна, яка при тепловій дії набирає міцність і перетворюється в пінокерамічний матеріал. Це, в свою чергу, дозволяє використовувати твердіючу піну як вогнегасний засіб, в тому числі і для гасіння пожеж класу В. Відзначається, що висушений шар твердої піни руйнується при всмоктуванні води. Впровадження запропонованого способу гасіння, мабуть, дозволить вирішити проблему низької стійкості пін.

Основними недоліками пін є або низька стійкість, або екологічна небезпечність. Це наштовхнуло на ідею використання для ізоляції (а також пожежогасіння) водовмісних гелів на неорганічній основі. Як показав проведений аналіз [205, 206], можливі екологічні збитки при гасінні однакових пожеж з використанням водовмісних гелів на неорганічній основі менші за збитки при використанні існуючих пін. Те ж саме можна стверджувати про ізоляцію за допомогою гелів і пін.

Можливість ізоляції (зменшення масопереносу) рідини внаслідок нанесення на її поверхню шару гелю експериментально досліджувалось у роботах [48, 207-209]. Шар гелю утворювався за допомогою гелеутворюючої

системи “ $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$ ”. Її компоненти відповідають вимогам з токсичності та екологічним вимогам до вогнегасник речовин. Було показано, що суцільні гелеподібні шари зменшують швидкість випаровування горючих органічних рідин. Найбільші ізолюючі властивості гелеві шари виявляють по відношенню до рідин, що слабо розчинні у воді. Для вуглеводневих рідин коефіцієнт уповільнення випаровування (тобто відношення потоку речовини з вільної поверхні до потоку, що має місце при наявності шару гелю) мінімально можливим суцільним шаром гелю становить $\sim(26 \div 35)$. У випадку вуглеводневих рідин склад гелю мало впливає на його ізолюючі властивості. Тому в якості вогнегасного гелеутворюючого складу обрано систему з найменшим вмістом гелеутворювача й каталізатора гелеутворення: $\text{CaCl}_2(5\%) + \text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2(5\%)$.

Для покращення ізолюючих властивостей гелевих шарів необхідно: збільшувати їх товщину; ввести до складу системи речовини, які знижують розчинність та збільшують в'язкість, збільшити вміст твердої фази у складі гелю.

З дослідів витікає, що з часом ізолююча дія гелевого прошарку послаблюється, що краще помітно у випадку тонкіших прошарків. Послаблення ізолюючої дії пояснюють старінням гелю (з часом гель через висихання починав розтріскуватись).

Проведені експериментальні дослідження впливу швидкості вітру на ізолюючі властивості гелеобразного шару по відношенню до парів токсичних та горючих рідин показали [209], що коефіцієнт уповільнення випаровування при використанні гелеподібних шарів зростає з ростом швидкості вітру. Відмітимо, що така поведінка коефіцієнта якісно відповідає розробленій математичній моделі стаціонарного ізотермічного варіанту цього процесу [46].

Однією із основних проблем (щодо використання гелів для ізоляції поверхонь рідин) є та обставина, що у більшості випадків густина гелів вища за густину відповідної рідини, через що гель, нанесений на поверхню рідини, тоне. Щоб обійти це ускладнення, в експериментальних роботах [48, 207-209]

гель розміщали на металевій сітці, яку тримали на поверхню рідини. Для практичного використання такий спосіб є недоречним.

Для подолання проблеми проводилися експериментальні дослідження щодо можливості сумісного використання гелю разом із попередньо нанесеним плавучим покриттям [210-212]. Досліджувалися можливості використання у якості плавучої підкладки шару піни або шарів дисперсного плавучого матеріалу. Так у роботі [210] було встановлено, що у разі, коли товщина шару піни перевищує 2 см, а товщина шару гелю становить 2 мм, гель зберігає свою цілісність і не тоне більше 15 хвилин. У дослідженні [212] була обґрунтована можливість використання при ізоляції бензину в якості носіїв гранульованого спученого перліту з насипною густиною 194 кг/м^3 і подрібненого піноскла з дійсною густиною 160 кг/м^3 . За критеріями екологічності, стійкості, стабільної плавучості, мінімальної густини, яка забезпечує максимальну вантажопідйомність, в якості матеріалу плавучої підкладки було вибрано подрібнене (гранульоване) піноскло [213-220].

Піноскло (ПС) являє собою тверду піну з твердим дисперсійним середовищем і газоподібної дисперсною фазою. Піноскло проводиться українською промисловістю і є доступним матеріалом. Для нього характерна низька густина ($100 - 200 \text{ кг/м}^3$), хімічна інертність, негорючість, високі теплоізоляційні властивості (теплопровідність $0,04 - 0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), висока температура розм'якшення (більша за 450°C) і повна екологічна і гігієнічна безпека. Існують кілька видів ПС. За характеристиками пор розрізняють – відкрито пористе і закрито пористе піноскло. Також розрізняють гранульоване і блочне ПС. Використовується також подрібнене ПС, зовнішні порожнини якого відкриті для проникнення рідин, а внутрішні закриті.

1.3.2 Сповільнюючі покриття і екрани

Шар гранульованого ПС сам по собі є перешкодою для процесів масопереносу. Ця обставина ініціювала експериментальні дослідження масопереносу крізь шари гранульованого ПС, що плавають на поверхні бензину

[221, 222]. Досліджувалася втрата бензину в залежності від часу випаровування, температури системи, товщини шару ПС, характерного розміру гранул ПС.

Крім процесів випаровування крізь зернисте покриття експериментально досліджувалися тісно пов'язані з ними процеси горіння горючих рідин із шаром гранульованого ПС на поверхні [223-227].

Порівняння впливу шару ПС на випаровування горючих рідин в умовах відсутності горіння і в умовах горіння дозволяє зробити висновок, що в умовах горіння шар ПС уповільнює випаровування у багато разів більше, ніж у відсутності горіння. Так при шарі ПС товщиною 10 см уповільнення випаровування бензину в умовах горіння в 6 разів більше, ніж в умовах відсутності горіння [224]. Цей факт можна пояснити тим, що швидкість випаровування без горіння внаслідок впливу шару ПС зменшується тільки за рахунок зменшення швидкості дифузії парів горючої рідини крізь пористий матеріал. На швидкість горіння горючої рідини крім зменшення швидкості дифузії впливає ще охолодження шару горючої рідини гранульованим ПС і екранування теплового потоку від полум'я до поверхні рідини.

В якості першого кроку теоретичного дослідження процесу випаровування небезпечної рідини крізь шар гранульованого піноскла була розроблена модель стаціонарної ізотермічної дифузії крізь шар зернистого матеріалу [228]. Для цього було проведено допоміжне теоретичне дослідження, щодо дифузії крізь пустоти середовища, яке заповнено гранулами [47].

Передбачення розробленої стаціонарної ізотермічної моделі [228] якісно співпадають з результатами експериментів. Нажаль у цій моделі не був врахований стефанівський потік, що виникає при дифузії у газовій суміші [229]. Врахування цього потоку важливо, коли тиск насиченої пари рідини близький до загального тиску суміші (що часто має місце, наприклад, у випадку бензину). У зв'язку з цією обставиною, а також з тим, що процеси захисту від теплового впливу є неізотермічними, стала актуальною побудова моделі нестаціонарної неізотермічної дифузії крізь шар піноскла з врахуванням стефанівського потоку.

Нажаль, експериментальні дослідження масопереносу крізь двошарову систему «піноскло – гель» не проводилися. Існує теоретичне дослідження цього процесу, який розглядається як стаціонарне ізотермічне випаровування рідини крізь двошарову систему [50]. В рамках цієї моделі були отримані аналітичні залежності щільності потоку пари і її концентрації в довільних точках системи. В цій моделі стефанівський потік також не враховувався. В даній ситуації необхідність прогнозу ізолюючих властивостей системи «піноскло-гель» також вимагає побудови більш реалістичного опису процесів.

Відсутність експериментальних досліджень простого випаровування крізь систему «піноскло – гель» пояснюється наявністю дослідів щодо окремих стадій цього процесу і бажанням скоріше дослідити процес пожежогасіння з використанням системи «піноскло – гель». Такі експериментальні дослідження проводилися, що знайшло своє відображення у публікації [230]. Їх реалізація на модельних осередках пожежі проходила, як гасіння за допомогою одного піноскла із додаванням (у разі не досягнення результату) прошарку гелю, який забезпечував гасіння.

Розроблені способи гасіння горючих та легкозаймистих рідин за допомогою гелю та плавучих зернистих систем знайшли своє відображення у патентах [54, 231, 232].

1.4 Постановка проблеми і способи її вирішення

Наведений аналіз показав, що, незважаючи на практичну важливість захисту об'єктів від теплового впливу пожеж за допомогою екранів і покриттів, багато пов'язаних із захистом питань (наприклад, вибір оптимального засобу захисту) залишаються не з'ясованими. Така ситуація є наслідком недостатньої теоретичної проробки даної проблеми.

Цей стан пояснюється різноманітністю способів і засобів захисту (велика кількість варіантів) і складністю процесів, що супроводжують захист (складність задач). Для більш спрямованого пошуку рішень проблеми захисту

дуже важливим стає 1) виявлення основних особливостей захисної дії різних варіантів екранів та покриттів для подальшого врахування цих особливостей.

Особливості захисної дії екранів і покриттів є прямим наслідком фізичних законів тепло- і масопереносу, що визначають функціонування цих засобів захисту. Внаслідок цього бажаним підходом відповідних досліджень є 2) побудова математичних моделей функціонування захисту із максимальним використанням фізичних законів.

Практичне використання математичних моделей має на увазі вміння прогнозу наслідків, які витікають із моделі, що найчастіше неможливо без рішення відповідних модельних задач. Стає важливим 3) максимальне просунення, щодо точних (а не чисельних) рішень задач, що надає можливість використовувати загальніші аналітичні (а не чисельні) залежності.

У випадках неможливості знайти аналітичне рішення необхідно для практичного використання мати інструмент отримання чисельних рішень. Стає важливим 4) розробка алгоритмів і програмного забезпечення для рішення виниклих прикладних задач, стосовно захисту у стандартних загальноприйнятих та у найбільш поширених умовах (наприклад, умовах пожежі у приміщенні).

Маючи на меті дотримуватись сформульованих підходів, розглянемо задачі, сукупність яких необхідно вирішити для розв'язання проблеми. Остання полягає у необхідності розвитку наукових основ захисту від теплового впливу пожежі шляхом виявлення особливостей захисної дії екранів із поглинаючих матеріалів, матеріалів, що спучуються, відбиваючих екранів і шарів із неоднорідного матеріалу, розробки комплексу математичних моделей функціонування теплового захисту, а також розробки алгоритмів і програмного забезпечення для вирішення прикладних задач з їх використанням.

Поглинаючі покриття і екрани

Необхідно дослідити захист за допомогою площинного шару поглинаючого матеріалу у ситуації, коли можливим є опис в рамках лінійної задачі нестационарної теплопровідності. Метою є аналітичне рішення задач

прогріву: 1) плоскої поверхні термічно товстого тіла (тобто формально півпростора); 2) плоскої поверхні термічно тонкого тіла. В обох випадках зовнішній вплив описується поширеними на практиці граничними умовами 3-го роду.

Наявність цих рішень робить можливим знаходження аналітичних залежностей характеристик захисту (наприклад, межі вогнестійкості) від параметрів системи захисту (наприклад, від товщини прошарку захисного матеріалу).

Додатково треба дослідити захисну дію покриття в умовах, коли його товщина є величиною, що випадково змінюється вздовж поверхні покриття. Необхідно з'ясувати, коли обов'язково треба враховувати випадковий характер товщини, не задовольняючись простим використанням її математичного очікування.

Покриття, що спучуються при нагріванні

Зазвичай при моделюванні захисту за допомогою покриттів, що спучуються, увага спрямована на математичне описання, як окремих стадій і механізмів, так і спучування у цілому. Однією зі складностей опису є пов'язаність процесів. Так, наприклад, найчастіше процес спучення вимагає одночасного рідкого стану носія і наявності газового компонента, який розширюється при нагріванні. У багатьох роботах для подолання невизначеності опису постулюють дещо штучні залежності між параметрами задачі. Наприклад вважають, що коефіцієнт спучування є функцією тільки температури (тобто є параметром стану, що невірно).

Задачею, яку необхідно вирішувати, є побудова моделі покриття, що при максимально можливій простоті і мінімальній штучності уловлює основні особливості процесу спучування і його наслідки. Модель повинна будуватися на основі законів збереження енергії і речовини. Спучування повинно бути наслідком розширення газової компоненти захисного покриття у його рідкій основі. Запропонований підхід повинен у рамках єдиної моделі описувати викликані нагріванням від зовнішнього теплового потоку процеси

теплопереносу, термічного розкладу, випаровування, спучування й винесення маси.

Для практичного використання необхідно розробити алгоритми та програмне забезпечення щодо моделювання захисної дії такого покриття в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні.

Відбиваючі екрани

Побудова математичної моделі дії відбиваючого екрану із врахуванням теплообміну у прошарку є однією із проблем, яку необхідно вирішити. Необхідно дослідити питання про захист поверхонь тіл від теплового впливу пожежі за допомогою одного або декількох термічно тонких відбиваючих екранів з повітряними або теплопровідними оптично тонкими прошарками. Ще необхідно розглянути модель теплозахисної дії напівважкого теплозахисного костюма в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні.

Тут також для практичного використання необхідно 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.

Гелеве теплозахисне покриття

Для теоретичного забезпечення використання ГУС необхідно:

- 1) побудувати математичну моделі процесу висихання гелю, що спирається на закони збереження речовини і енергії і враховує відмінності висихання гелю від випаровування води, виявити особливості цього процесу у випадку термічно тонкого шару гелю; 2) знайти аналітичне рішення задачі щодо охолодження масивного тіла шаром вологого гелю з відведенням від нього тепла у зовнішнє середовище крізь теплоізолюючий шар сухого ксерогелю, що утворився.

Однією із додаткових задач є уточнення витрати гелеутворюючого складу необхідної для покриття захисної смуги з метою локалізації ландшафтної пожежі. Уточнення викликане необхідністю врахування існування ділянок горючого матеріалу із найбільш сприятливою щодо можливості займання орієнтацією.

Ізолююча дія покриття рідини шаром гранул

Через те, що процеси захисту від теплового впливу є неізотермічними, набула актуальності побудова більш реалістичної ніж існуючі моделі нестационарної неізотермічної дифузії пари небезпечної речовини крізь шар піноскла з врахуванням стефанівського потоку.

Це є однією із задач, яку необхідно дослідити. Рішення такої задачі надає можливість визначити залежність щільності потоку та концентрації пального від товщини прошарку гранульованого матеріалу і температури системи. Це, у свою чергу, дозволить відстежувати виконання умов пожежної безпеки в даній системі.

Ізолююча дія покриття рідини двошаровою системою «шар гранул+шар гелю»

Для наближення теоретичного опису до реальності необхідно, базуючись на законах тепло- і масопереносу, побудувати модель нестационарної (і як перший крок) ізотермічної дифузії крізь двошарову систему «піноскло-гель» з врахуванням стефанівського потоку.

Доведення перелічених задач до стану можливості практичного використання вирішить основну наукову проблему дисертаційного дослідження. Через це в якості останньої узагальнюючої дії необхідно розробити практичні рекомендації, алгоритми та комп'ютерні програми щодо вибору покриттів і екранів для захисту об'єктів від теплового впливу пожежі.

1.5 Висновки

У даному розділі на основі аналізу стану захисту речовин і матеріалів від впливу пожежі за допомогою захисних екранів і покриттів сформульована проблема, яка вимагає рішення. Вона полягає у необхідності розвитку наукових основ захисту від теплового впливу пожежі шляхом виявлення особливостей захисної дії екранів із поглинаючих матеріалів, матеріалів, що спучуються, відбиваючих екранів і шарів із неоднорідного матеріалу, розробки комплексу математичних моделей функціонування теплового захисту, а також розробки

алгоритмів і програмного забезпечення для вирішення прикладних задач з їх використанням.

У розділі сформульовані задачі, рішення яких у сукупності приведе до рішення проблеми. Так для досягнення цієї мети треба:

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

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

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

4) 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 й 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;

5) 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;

6) 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;

7) визначити витрату гелеутворюючого складу необхідну для покриття захисної смуги з метою локалізації ландшафтної пожежі;

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

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

РОЗДІЛ 2

ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ПЛОСКИМ ТЕПЛОЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ ІЗ ПОГЛИНАЮЧОГО ОДНОРІДНОГО МАТЕРІАЛУ

У даному розділі буде досліджене питання про захист поверхонь тіл від теплового впливу пожежі за допомогою плоского покриття, яке складається з поглинаючого однорідного матеріалу.

2.1 Захист масивного тіла

У даному підрозділі одержані співвідношення для розрахунку температури поверхні масивного (термічно товстого) тіла, захищеної шаром інертного теплоізоляційного матеріалу [31].

Поставлена задача є задачею нестационарної теплопровідності в системі з напівнескінченного тіла, відділеного від зовнішнього світу пластиною кінцевої товщини. Зовнішні впливи задаються як граничні умови на зовнішній границі цієї пластини. Така задача давно поставлена. Відома методика її розв'язання, однак доступні для огляду аналітичні рішення знайдені тільки у випадку граничних умов 1-го (див., наприклад, [124]) і, можливо, 2-го роду. У випадку граничних умов 3-го роду, що відповідають наявності завжди присутнього конвекційного теплообміну захисного покриття із зовнішнім середовищем, відповідні неформальні аналітичні рішення відсутні.

Приймаємо, що плоска поверхня масивного тіла відокремлена від зовнішнього впливу плоскою нескінченною пластиною товщиною h , що складається із захисної речовини. Схематично ситуація зображена на рисунку 2.1, на якому масивному тілу відповідають значення просторової координати $x > 0$, а захисному покриттю - $0 > x > -h$.

Нагадуємо, що з точністю кращу за відсоток у задачах прогріву плити товщиною h_* , м, можна розглядати, як нескінченно товсту (термічно товсту), якщо виконується співвідношення [233]

$$\frac{h_*}{2\sqrt{a_* \cdot \tau}} > 0,6, \quad (2.1)$$

де a_* - коефіцієнт теплопровідності матеріалу масивного тіла, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; τ - час прогріву, с. Також вважається, що інші характерні розміри поверхні нагріву перевищують h_* .

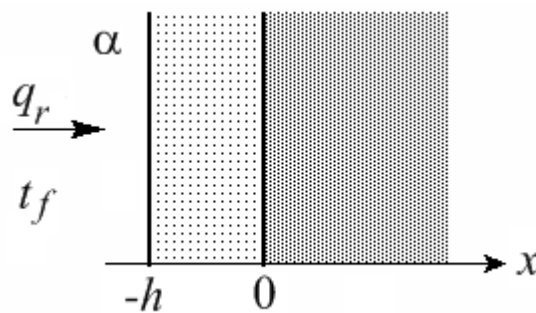


Рис. 2.1 Просторова схема прогріву

Система рівнянь, що описує процес прогріву, є системою рівнянь нестационарної теплопровідності. Вона визначає поле температур $t(x, \tau)$ і має відомий вигляд:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad -h \leq x \leq 0; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a_* \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x < \infty; \quad (2.3)$$

де величина a є коефіцієнтом теплопровідності матеріалу захисного шару. Коефіцієнти теплопровідності дорівнюють

$$a = \frac{\lambda}{c'}, \quad a_* = \frac{\lambda_*}{c'_*}, \quad \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1},$$

де λ, λ_* - коефіцієнти теплопровідності, Вт м⁻¹ К⁻¹; c', c'_* - питомі об'ємні ізобарні теплоємності (відповідно, матеріалу захисного шару і масивного тіла), Дж м⁻³ К⁻¹. (Характерні числові значення λ, c' та a деяких речовин і матеріалів наведені у додатку А.)

Граничні умови до рівнянь (2.2), (2.3) мають відомий вигляд.

1) Умова на границі із зовнішнім середовищем ($x = -h$) виражає неперервність повного потоку тепла:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-h+0} = q_r - \alpha \cdot [t(-h, \tau) - t_f], \quad (2.4)$$

де q_r – результуюча щільність потоку теплового випромінювання, що падає на поверхню, Вт м⁻²; α – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі з даної поверхні у повітря, Вт м⁻² К⁻¹; t_f – температура навколишнього середовища, °С.

2) Умовами на границі покриття із термічно товстим тілом ($x=0$) є неперервність температури й питомого теплового потоку, відповідно:

$$t(-0, \tau) = t(+0, \tau), \quad (2.5)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-0} = -\lambda_* \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=+0}. \quad (2.6)$$

3) Остання з умов забезпечує обмеженість величини температури термічно товстого тіла:

$$t(x, \tau)|_{x=\infty} < \text{const} . \quad (2.7)$$

Початковою умовою задачі (2.2)-(2.7) взято однорідний розподіл температури в покритті й масивному тілі, тобто при $-h < x$

$$t(x, 0) = t_0 . \quad (2.8)$$

де t_0 – початкова температура, яка вважається відомою.

Задача (2.2) – (2.8) у випадку сталості величин $a, a^*, \lambda, \lambda^*, q_r, \alpha, t_f$ й t_0 буде вирішуватися за допомогою перетворення Лапласа, проведеного по часовій змінній [31]. Застосуємо це перетворення до нестационарного поля $[t(x, \tau) - t_0]$ окремо в областях $-h < x < 0$ й $x > 0$ (дивися, наприклад, [124]). У результаті відбувається перехід до зображень по Лапласу:

$$t_L(x, s) = \int_0^\infty [t(x, \tau) - t_0] \cdot \exp(-s\tau) d\tau . \quad (2.9)$$

У подальшому Лаплас образ функції $f(\tau)$ будемо позначати за допомогою символу оператора $\hat{L}$, тобто $F(s) = \hat{L}[f(\tau)]$. Праобраз Лаплас образу (тобто вихідну функцію $f(\tau)$) позначатимемо символом зворотного оператора $\hat{L}^{-1}$, тобто $f(\tau) = \hat{L}^{-1}[F(s)]$. Наприклад,

$$t_L(x, s) = \hat{L}[t(x, \tau) - t_0], \quad t(x, \tau) - t_0 = \hat{L}^{-1}[t_L(x, s)].$$

Функції $t_L(x, s)$ задовольняють лінійній системі звичайних (а не у частинних похідних) диференціальних рівнянь щодо просторової змінної x . Ці рівняння, які є наслідком рівнянь (2.2) і (2.3), мають вигляд

$$s \cdot t_L(x, s) = a \cdot \frac{d^2 t_L(x, s)}{dx^2}, \quad -h \leq x \leq 0; \quad (2.10)$$

$$s \cdot t_L(x, s) = a_* \cdot \frac{d^2 t_L(x, s)}{dx^2}, \quad 0 \leq x < \infty. \quad (2.11)$$

Граничні умови до цих рівнянь, які є наслідком рівнянь (2.4) – (2.7), мають вигляд

$$-\lambda \cdot \left. \frac{dt_L(x, s)}{dx} \right|_{x=-h} = \frac{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_0)}{s} - \alpha \cdot t_L(-h, s), \quad (2.12)$$

$$t_L(-0, s) = t_L(+0, s), \quad (2.13)$$

$$-\lambda \cdot \left. \frac{dt_L(x, s)}{dx} \right|_{x=-0} = -\lambda_* \cdot \left. \frac{dt_L(x, s)}{dx} \right|_{x=+0}, \quad (2.14)$$

$$t_L(x, s) \Big|_{x=\infty} < const. \quad (2.15)$$

Рішення рівнянь (2.10), (2.11) будемо шукати у вигляді

$$t_L(x, s) = A \cdot e^{k \cdot x} + B \cdot e^{-k \cdot x}, \quad -h \leq x \leq 0, \quad (2.16)$$

$$t_L(x, s) = A_* \cdot e^{k_* \cdot x} + B_* \cdot e^{-k_* \cdot x}, \quad 0 \leq x < \infty, \quad (2.17)$$

де введено параметри

$$k(s) \equiv \sqrt{\frac{s}{a}}, \quad k_*(s) \equiv \sqrt{\frac{s}{a_*}}, \quad (2.18)$$

а A, B, A_*, B_* – невизначені коефіцієнти, значення яких задається граничними умовами (2.12) – (2.15).

Із умови (2.15) витікає, що

$$A_* = 0. \quad (2.19)$$

Відразу відмітимо, що внаслідок останнього співвідношення (згідно із виразом (2.17)) коефіцієнт B_* співпадає із зображенням по Лапласу різниці температур $[t(x, \tau) - t_0]$ на поверхні масивного тіла, тобто

$$t_L(0, s) = B_* \quad (2.20).$$

Із використанням формул (2.16), (2.17), (2.19) система рівнянь (2.13), (2.14) набуває вигляд

$$\begin{cases} -\lambda \cdot k \cdot (A - B) = \lambda_* \cdot k_* \cdot B_* \\ A + B = B_* \end{cases}, \quad (2.21)$$

який можна трансформувати у

$$\begin{cases} A = \frac{1-K}{2} \cdot B_* \\ B = \frac{1+K}{2} \cdot B_* \end{cases}, \quad (2.22)$$

де використовується критерій відносної теплової активності середовищ

$$K \equiv \frac{\lambda_* \cdot k_*}{\lambda \cdot k} = \sqrt{\frac{\lambda_* c'_*}{\lambda c'}}. \quad (2.23)$$

(Характерні числові значення важливої для визначення критерію активності K величини $\sqrt{\lambda \cdot c'}$ для різних речовин і матеріалів наведені у додатку А.)

Гранична умова (2.12) надає відсутній зв'язок

$$-\lambda \cdot k \cdot (A \cdot e^{-\varphi} - B \cdot e^{\varphi}) = \frac{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_0)}{s} - \alpha \cdot (A \cdot e^{-\varphi} + B \cdot e^{\varphi}), \quad (2.24)$$

у якому використана безрозмірна змінна

$$\varphi \equiv k \cdot h = \sqrt{s \cdot \tau_0}, \quad (2.25)$$

для запису якої уведене характерний час прогріву покриття

$$\tau_0 = \frac{h^2}{a}. \quad (2.26)$$

(Характерні числові значення τ_0 для шару покриття товщиною $h=1$ см, зробленого із відповідних речовин і матеріалів наведені у додатку А.)

Підставивши вирази (2.22) у рівняння (2.24), отримаємо рівняння з одним невідомим коефіцієнтом B_* , який співпадає із $t_L(0, s)$:

$$B_* \cdot \left[e^{\varphi} \cdot \frac{1+K}{2} \cdot \left(1 + \frac{\lambda \cdot k}{\alpha} \right) + e^{-\varphi} \cdot \frac{1-K}{2} \cdot \left(1 - \frac{\lambda \cdot k}{\alpha} \right) \right] = \frac{t_{\max} - t_0}{s}, \quad (2.27)$$

де введено параметр

$$t_{\max} = \frac{q_r}{\alpha} + t_f, \quad (2.28)$$

який співпадає з максимально можливою температурою, до якої при великих часах прогріву асимптотично наближається температура поверхні масивного тіла.

Із виразу (2.27) витікає, що

$$t_L(0, s) = \frac{t_{\max} - t_0}{s \cdot \left[\left(1 + K \cdot \frac{\varphi}{Bi} \right) \cdot ch(\varphi) + \left(K + \frac{\varphi}{Bi} \right) \cdot sh(\varphi) \right]}. \quad (2.29)$$

Символом Bi у формули (2.29) позначено критерій Біо покриття:

$$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}. \quad (2.30)$$

Спроба повернутися до вихідної температури $t(x, \tau)$, застосовуючи зворотне перетворення Лапласа до виразу (2.29), приводить до важко оцінюваних рядів. У зв'язку із цим ми розглянемо дві межові області параметрів. Першою буде область відносно великих часів прогріву.

2.1.1 Прогрівання за великого часу прогріву

Довгострокова область часу визначається обмеженням

$$\tau \gg \tau_0, \quad (2.31)$$

що означає домінування в інтегралі зворотного перетворення Лапласа внеску від області значень із $\varphi \ll 1$.

Остання нерівність дозволяє спростити співвідношення (2.29):

$$t_L(0, s) \approx \frac{t_{\max} - t_0}{s \cdot \left[1 + \left(1 + \frac{1}{Bi} \right) \cdot K \cdot \varphi \right]} = \frac{t_{\max} - t_0}{s \cdot \left[1 + \sqrt{s \cdot \tau_\Sigma} \right]}, \quad (2.32)$$

де параметр τ_Σ , як буде видно з подальшого, має сенс характерного часу прогріву поверхні масивного тіла, покритого захисним шаром. Він дорівнює

$$\tau_\Sigma = \lambda_* c'_* \cdot \left(\frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \right)^2. \quad (2.33)$$

Відзначимо, що доданки в дужках у формулі (2.33) являють собою термічні опори теплопровідності захисного шару й тепловіддачі на його поверхні. Це означає, що в межах (2.31) нанесення захисного шару еквівалентно відповідному збільшенню термічного опору тепловіддачі.

Прообраз виразу (2.32) можна знайти спираючись на зв'язок між функціями часу $f(\tau)$ і їх Лаплас образами $F(s)$.

Необхідне для вирішення задачі співвідношення має вигляд (див., наприклад, [124]):

$$\hat{L}^{-1} \left[\frac{b}{s \cdot (b + \sqrt{s})} \right] = 1 - e^{b^2 \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc}(b \cdot \sqrt{\tau}),$$

де b - позитивна константа. Застосувавши останню формулу до виразу (2.32) (беручи $b = (\sqrt{\tau_\Sigma})^{-1}$), випишемо шукану залежність

$$t(0, \tau) = t_0 + \left(\frac{q_r}{\alpha} + t_f - t_0 \right) \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{\tau}{\tau_\Sigma} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_\Sigma}} \right) \right], \quad (2.34)$$

у якій символом $\operatorname{erfc}(Z)$ позначена додаткова функція помилок Гауса. Формула (2.34) вирішує задачу.

Відмітимо, що у випадку $h = 0$, відповідно до формули (2.33), $\tau_{\Sigma} = \tau_*$, де

$$\tau_* \equiv \frac{\lambda_* c'_*}{\alpha^2} \quad (2.35)$$

і співвідношення (2.34) дає відомий результат задачі прогріву (охолодження) масивного тіла у відсутності захисного покриття. З цієї обставини витікає, що в області (2.31) часи досягнення однакових температур захищеною й не захищеною поверхнею відносяться як

$$\frac{\tau_{\Sigma}}{\tau_*} = \left(\frac{\alpha \cdot h}{\lambda} + 1 \right)^2 = (\operatorname{Bi} + 1)^2. \quad (2.36)$$

Співвідношенню (2.34) можна надати більш загального безрозмірного вигляду. Для цього перейдемо до відповідних безрозмірних змінних. Введемо відносну надлишкову температуру поверхні термічно товстого тіла

$$\theta \equiv \frac{t(0, \tau) - t_0}{t_{\max} - t_0}, \quad (2.37)$$

і відносний час

$$\tilde{\tau}_{\Sigma} \equiv \frac{\tau}{\tau_{\Sigma}}. \quad (2.38)$$

У даних змінних рівняння (2.34) набуває вигляд

$$\theta(\tilde{\tau}_{\Sigma}) = 1 - \exp(\tilde{\tau}_{\Sigma}) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tilde{\tau}_{\Sigma}}). \quad (2.39)$$

Поведінку цієї функції відображає графік на рис. 2.2.

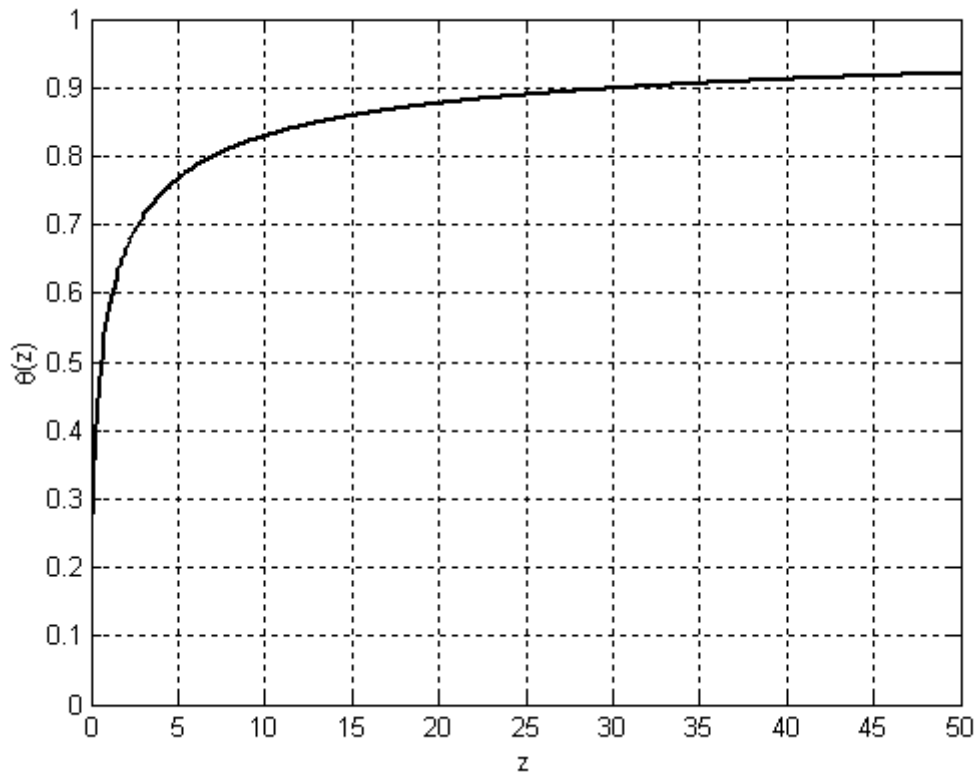


Рис. 2.2 Графік залежності $\theta(z) = 1 - \exp(-z) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{z})$, де $z = \tilde{\tau}_\Sigma$

Якщо, вирішуючи задачу пожежної безпеки, задатися критичним рівнем температури поверхні t_{cr} , то її безрозмірний відповідник буде мати величину

$$\theta_{cr} \equiv \frac{t_{cr} - t_0}{t_{\max} - t_0}. \quad (2.40)$$

Ця критична температура пов'язана з безрозмірним часом $\tilde{\tau}_\Sigma$ співвідношенням [51]

$$\theta_{cr} = 1 - \exp(-\tilde{\tau}_\Sigma) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tilde{\tau}_\Sigma}), \quad (2.41)$$

із якого витікає залежність критичного значення граничної температури (2.24)

$t_{\max.cr}$ від часу й критичної температури t_{cr} :

$$t_{\max.cr} = t_0 + \frac{t_{cr} - t_0}{1 - \exp(\tilde{\tau}_{\Sigma}) \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{\tilde{\tau}_{\Sigma}})}. \quad (2.42)$$

Залежність критичного значення часу τ_{cr} від критичної температури можна отримати вирішивши рівняння (2.41) щодо змінної $\tilde{\tau}_{\Sigma}$. Можна одержати явний вид цієї залежності в області $\tilde{\tau}_{\Sigma} \gg 1$, що відповідає близьким до одиниці значенням θ_{cr} , використовуючи відоме асимптотичне розкладання функції помилок:

$$\operatorname{erf}(A) = 1 - \frac{\exp(-A^2)}{\sqrt{\pi} \cdot A} \left[1 + O\left(\frac{1}{A^2}\right) \right],$$

де виразом $O(Z)$ позначається величина порядку Z .

Результат має вигляд

$$\tilde{\tau}_{\Sigma.cr} = \frac{1}{\pi \cdot (1 - \theta_{cr})^2}, \quad (2.43)$$

що в розмірних змінних записується формулою

$$\tau_{cr} = \frac{\tau_{\Sigma}}{\pi} \cdot \left(\frac{t_{\max} - t_0}{t_{\max} - t_{cr}} \right)^2 = \frac{\tau_{\Sigma}}{\pi} \cdot \left[\frac{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_0)}{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_{cr})} \right]^2. \quad (2.44)$$

2.1.2 Прогрівання за великих коефіцієнтах активності та малих критеріях Біо [40, 41]

Доступні до огляду аналітичні вирази температури можна отримати за умов великої величини коефіцієнта активності (2.23)

$$K \gg 1 \quad (2.45)$$

та малих значень критерію Біо (2.30)

$$Bi \ll 1. \quad (2.46)$$

Згідно з додатком А межі (2.45) відповідає нанесення неметалевого покриття на металеву поверхню. У неметалів λ має величину ~ 1 Вт м⁻¹ К⁻¹, що у випадку значення $\alpha \approx 40$ Вт м⁻² К⁻¹ надає обмеженню (2.46) вид $h \ll \lambda/\alpha \approx 2,5$ см.

У цьому випадку вид Лаплас образу різниці температур $[t(x, \tau) - t_0]$ (дивись вираз (2.29)) спрощується до

$$t_L(0, s) \approx \frac{t_{\max} - t_0}{s \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\Phi}{Bi}\right) \cdot ch(\Phi)}. \quad (2.47)$$

Для знаходження праобразу виразу (2.47) у області представимо $[ch(\Phi)]^{-1}$ у вигляді ряду:

$$[ch(\Phi)]^{-1} = \left(\frac{e^{\Phi} + e^{-\Phi}}{2} \right)^{-1} = \left(e^{\Phi} \cdot \left[1 - \frac{1 - e^{-2\Phi}}{2} \right] \right)^{-1}.$$

Це дозволяє сприймати $[ch(\varphi)]^{-1}$, як суму членів геометричної прогресії із показником $\left(\frac{1-e^{-2\cdot\varphi}}{2}\right)$, тобто

$$[ch(\varphi)]^{-1} = \left(e^{\varphi} \cdot \left[1 - \frac{1-e^{-2\cdot\varphi}}{2} \right] \right)^{-1} = e^{-\varphi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{1-e^{-2\cdot\varphi}}{2} \right)^n.$$

Такий ряд при малих φ має кращу збіжність, ніж ряд по ступеням $e^{-2\cdot\varphi}$.

Далі скористаємося відомим розкладом бінома Ньютона

$$\left(\frac{1-e^{-2\cdot\varphi}}{2} \right)^n = \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \cdot \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot e^{-2\cdot i \cdot \varphi}.$$

де символом $m!$ позначається факторіал цілого невід'ємного числа m .

Останнє співвідношення дозволяє записати $[ch(\varphi)]^{-1}$ у вигляді

$$\frac{1}{ch(\varphi)} = e^{-\varphi} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot e^{-2\cdot i \cdot \varphi} \right].$$

Отриманий вираз надає можливість надати формулі (2.47) вигляд:

$$t_L(0, s) = \frac{t_{\max} - t_0}{s \cdot \left(1 + \frac{K}{Bi} \cdot \varphi \right)} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot e^{-(2\cdot i + 1) \cdot \varphi} \right]. \quad (2.48)$$

Знайдемо Лаплас праобраз функції (2.48), яку можна представити у вигляді

$$t_L(0, s) = (t_{\max} - t_0) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot I_L(s, i) \right], \quad (2.49)$$

де

$$I_L(s, i) = \frac{e^{-(2 \cdot i + 1) \cdot \varphi}}{s \cdot \left(1 + \frac{K}{Bi} \cdot \varphi \right)} = \frac{e^{-(2 \cdot i + 1) \cdot \sqrt{\tau_0} \cdot \sqrt{s}}}{s \cdot \left(1 + \frac{K}{Bi} \cdot \sqrt{\tau_0} \cdot \sqrt{s} \right)}. \quad (2.50)$$

Відмітимо також, що згідно із формулами (2.23), (2.26), (2.30) і (2.35) існує співвідношення

$$\frac{K}{Bi} \sqrt{\tau_0} = \sqrt{\frac{\lambda_* \cdot c'_*}{\alpha^2}} = \sqrt{\tau_*}, \quad (2.51)$$

яке дозволяє надати формулі (2.50) вигляд

$$I_L(s, i) = \frac{e^{-(2 \cdot i + 1) \cdot \sqrt{\tau_0} \cdot \sqrt{s}}}{s \cdot \left(1 + \sqrt{\tau_*} \cdot \sqrt{s} \right)}. \quad (2.52)$$

Знайдемо Лаплас праобраз виразу (2.52). Для цього будемо використовувати співвідношення (див., наприклад, [124])

$$\hat{L}^{-1} \left[\frac{b \cdot e^{-u \cdot \sqrt{s}}}{s \cdot (b + \sqrt{s})} \right] = \operatorname{erfc} \left(\frac{u}{2 \cdot \sqrt{\tau}} \right) - e^{bu + b^2 \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc} \left(b \cdot \sqrt{\tau} + \frac{u}{2 \cdot \sqrt{\tau}} \right), \quad (2.53)$$

у якому $b > 0$ і $u \geq 0$ сталі.

Зробивши підстановку $b = (\sqrt{\tau_*})^{-1}$ і $u = (2 \cdot i + 1) \cdot \sqrt{\tau_0}$ у формулу (2.48), отримаємо шуканий Лаплас праобраз виразу (2.52):

$$\begin{aligned}
I(\tau, i) &\equiv \hat{L}^{-1}[I_L(s, i)] = \\
&= \operatorname{erfc}\left(\frac{1+2 \cdot i}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}}\right) - e^{(1+2 \cdot i) \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_*} + \frac{\tau}{\tau_*}}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}} + \frac{1+2 \cdot i}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}}\right). \quad (2.54)
\end{aligned}$$

Якщо ввести безрозмірний час

$$\tilde{\tau}_* \equiv \frac{\tau}{\tau_*} \quad (2.55)$$

і множник

$$K_* \equiv \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_*}}, \quad (2.56)$$

який згідно з співвідношенням (2.51) дорівнює

$$K_* = \frac{Bi}{K}, \quad (2.57)$$

і тому, згідно із початковими обмеженнями (2.45), (2.46), є малою величиною

$$K_* \ll 1, \quad (2.58)$$

то співвідношення (2.54) можна записати у безрозмірних змінних

$$\begin{aligned}
I(\tau, i) &= I_i(\tilde{\tau}_*, K_*) \equiv \\
&\equiv \operatorname{erfc}\left(\frac{1+2 \cdot i}{2} \cdot \frac{K_*}{\sqrt{\tilde{\tau}_*}}\right) - e^{(1+2 \cdot i) \cdot K_* + \tilde{\tau}_*} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\tilde{\tau}_*} + \frac{1+2 \cdot i}{2} \cdot \frac{K_*}{\sqrt{\tilde{\tau}_*}}\right). \quad (2.59)
\end{aligned}$$

Залежність функції (2.59) від безрозмірного часу z при різних значеннях i і K_* відображена на рисунку 2.3.

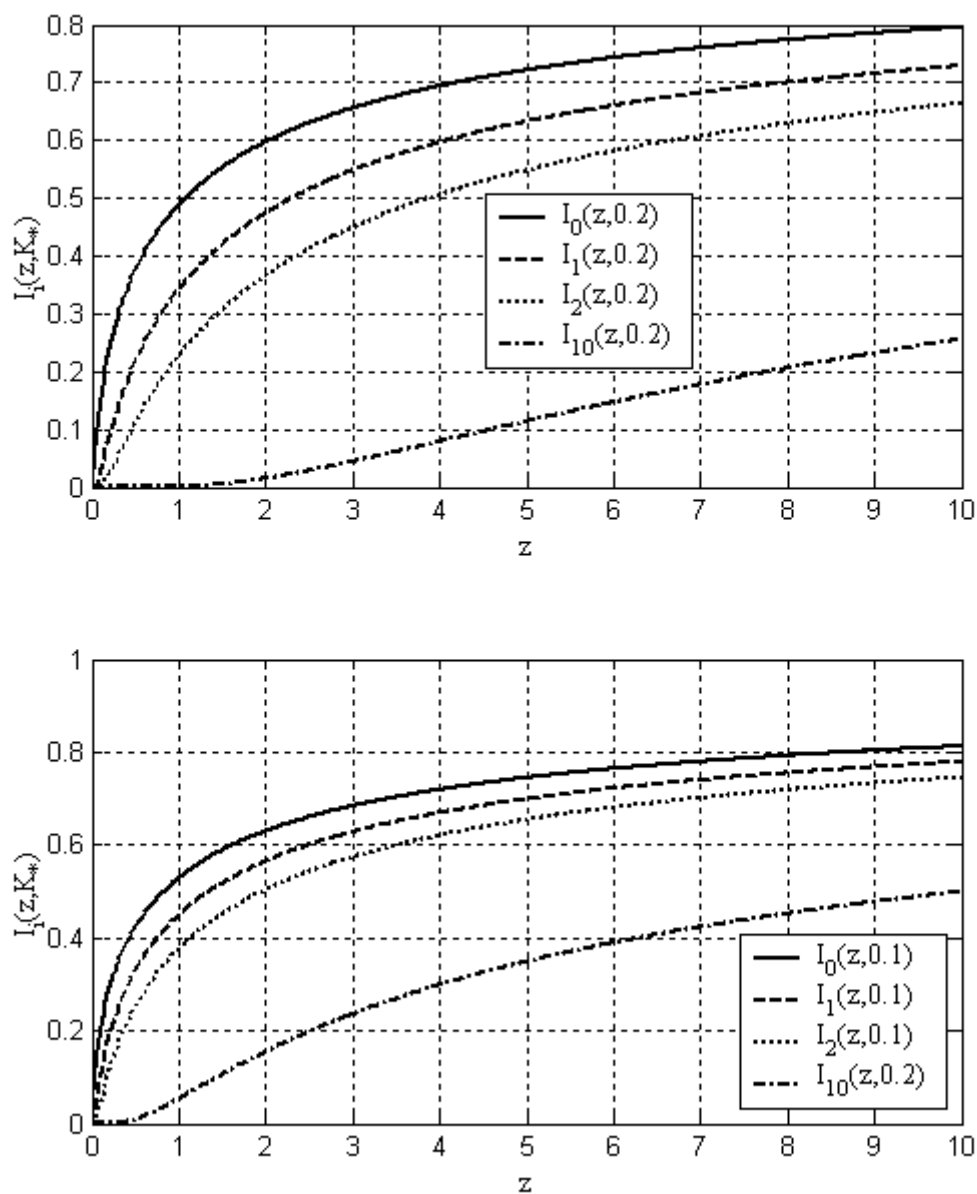


Рис. 2.3 Графіки залежності $I_i(z, K_*)$ за різних значень i (0; 1; 2; 10) і K_* (0,2; 0,1)

Із лінійності перетворень Лапласа витікає, що температура поверхні захищеного термічно товстого тіла задовольняє співвідношенню

$$t(0, \tau) = t_0 + (t_{\max} - t_0) \cdot I_{\text{tot}}(\tau), \quad (2.60)$$

де

$$I_{tot}(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{sum}(\tau, n), \quad (2.61)$$

а

$$I_{sum}(\tau, n) = \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot I(\tau, i). \quad (2.62)$$

Залежність декількох перших доданків суми (2.61) від безрозмірного часу $\tilde{\tau}_*$ (2.55) відображена на графіках рисунку 2.4, де функція (2.62) представлена у безрозмірених змінних (дивись (2.59)):

$$I_{sum}(\tau, n) \equiv I_s(\tilde{\tau}_*, n, K_*) = \frac{1}{2^n} \cdot \sum_{i=0}^n (-1)^i \frac{n!}{i!(n-i)!} \cdot I_i(\tilde{\tau}_*, K_*). \quad (2.63)$$

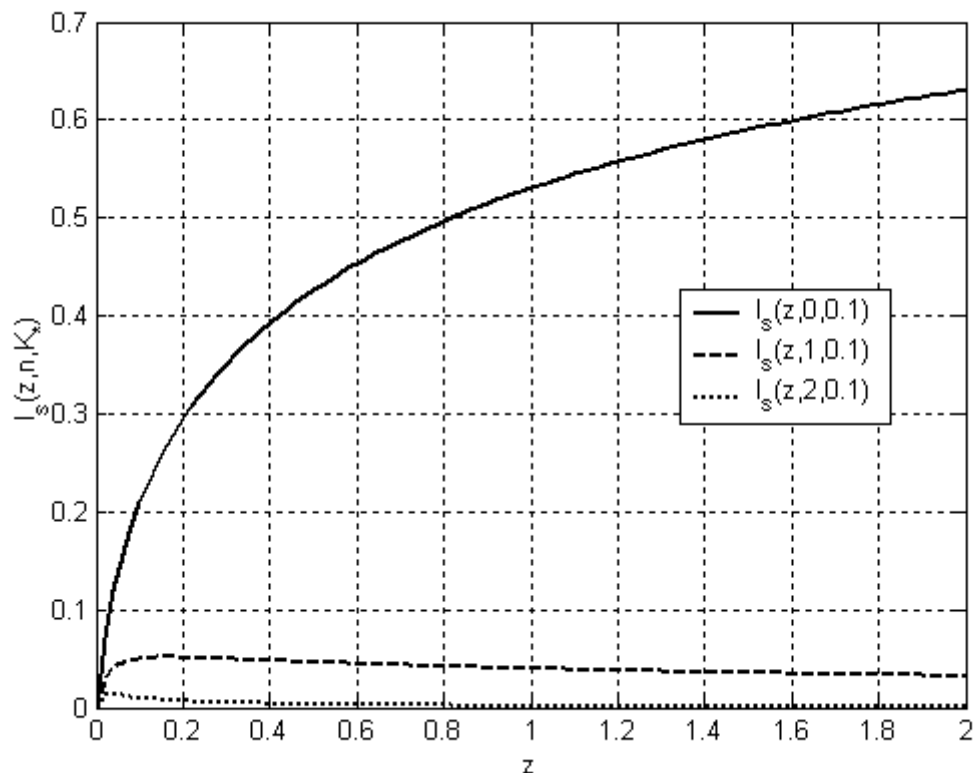


Рис. 2.4 Графіки залежності $I_s(z, n, K_*)$ від безрозмірного часу z за різних значень n (0; 1; 2) і $K_* = 0,1$

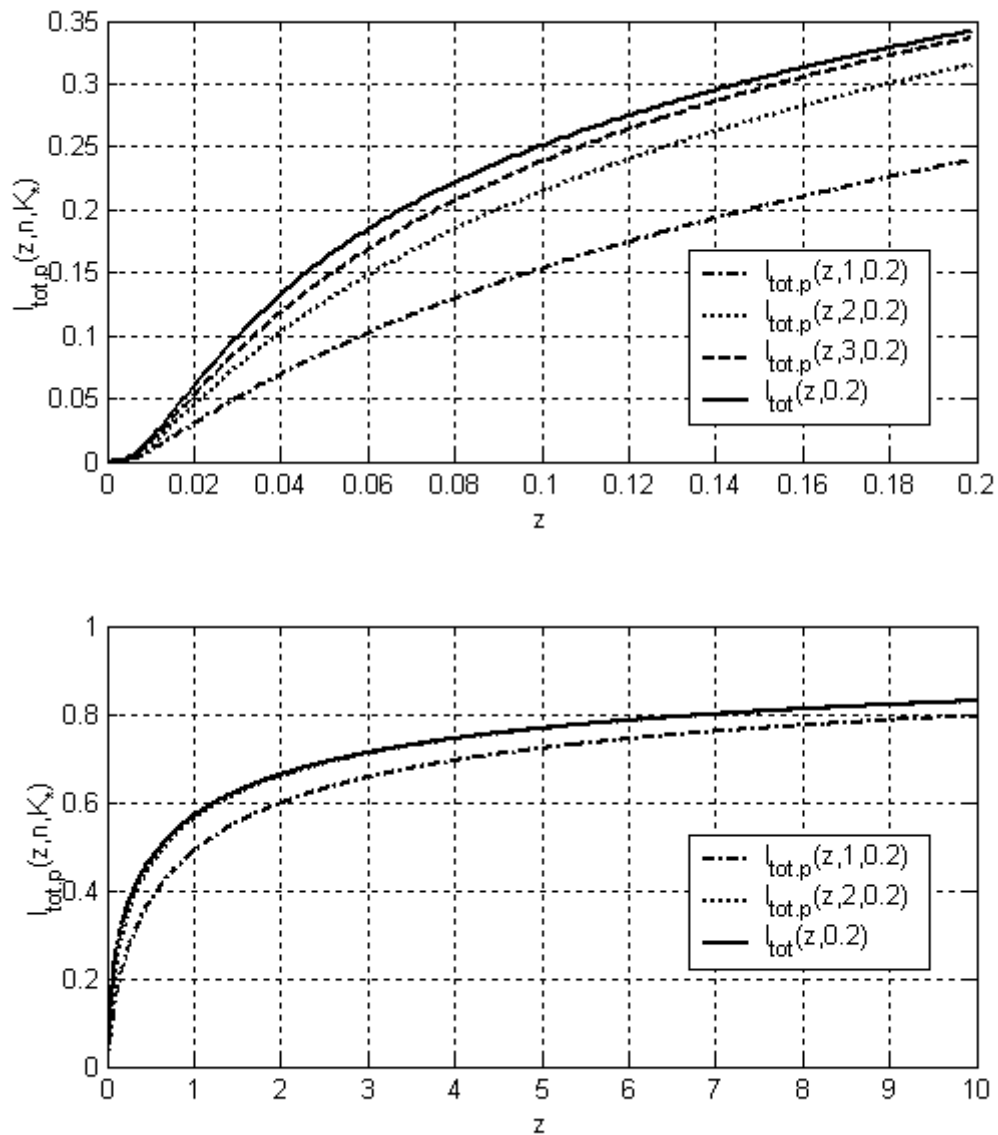


Рис. 2.5 Графіки залежності $I_{tot,p}(z, m, K_*)$ від безрозмірного часу z за значень $n = 1, n = 2, n = 3$ і $n = \infty$, останнє позначено $I_{tot}(z, K_*)$. ($K_* = 0,2$)

Для демонстрації відповіді на питання о кількості суттєвих доданків у ряді (2.61), побудуємо графіки (рисунок 2.5) залежності від безрозмірного часу часткових сум цього ряду:

$$I_{tot,part}(\tau, N) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} I_{sum}(\tau, n) = I_{tot,p}(\tilde{\tau}_*, N, K_*) = \sum_{n=0}^{N-1} I_s(\tau, n, K_*), \quad (2.64)$$

де N - кількість додатків у сумі.

Рисунок 2.5 наглядно демонструє, що для підтримання точності у декілька відсотків в області (великих часів) $\tau \geq \tau_0$ достатньо двох перших членів ряду (2.61), тоді як у не основній для даного розкладу області малих часів $\tau \leq \tau_0$ необхідно додати ще один доданок цього ряду.

Підсумковий результат полягає у тому, що відносна надлишкова температура θ (2.37) залежить від часу згідно із співвідношенням

$$\theta(\tau) = I_{tot}(\tau), \quad (2.65)$$

функція $I_{tot}(\tau)$ якого знаходиться за формулами (2.61), (2.63), (2.54).

Якщо, вирішуючи задачу пожежної безпеки, задаватися критичним рівнем температури поверхні t_{cr} та її безрозмірним відповідником θ_{cr} (2.40), то критична температура θ_{cr} буде пов'язана з часом τ співвідношенням

$$\theta_{cr} = I_{tot}(\tau), \quad (2.66)$$

із якого витікає залежність критичного значення граничної температури $t_{max,cr}$ (2.28) від часу й критичної температури t_{cr} :

$$t_{max,cr} = t_0 + \frac{t_{cr} - t_0}{I_{tot}(\tau)}. \quad (2.67)$$

Залежність критичного значення часу τ_{cr} від критичної температури можна отримати вирішивши рівняння (2.66) щодо змінної τ .

2.2 Захист термічно тонкого тіла [53]

Метою даної частини роботи є одержання співвідношень для розрахунку температури поверхні термічно тонкого тіла (ТТТ) (наприклад, металевої стінки резервуара), захищеного плоским шаром теплоізоляційного матеріалу.

Ситуація зводиться до рішення задачі нестационарної теплопровідності в системі, що складається із ТТТ, відділеного від падаючого теплового потоку пластиною кінцевої товщини. Зовнішні впливи задаються як граничні умови на поверхнях цієї пластини. Така задача давно поставлена. Відома методика її розв'язання, однак доступні для огляду аналітичні рішення знайдені тільки у випадку граничних умов 1-го роду (див., наприклад, [124]). У випадку граничних умов 3-го роду, яким відповідає наявність завжди присутнього конвекційного теплообміну захисного покриття із зовнішнім середовищем, неформальні аналітичні рішення відсутні.

У роботі дана задача традиційно розглядається як одновимірна задача прогріву плоскої термічно тонкої пластини, відділеної від зовнішнього теплового потоку пластиною товщиною h , що складається із захисної речовини. Схематично ситуація зображена на рисунку 2.6, на якому захисній пластині відповідають значення просторової координати $0 < x < h$, а тонкому тілу – $x = h$.

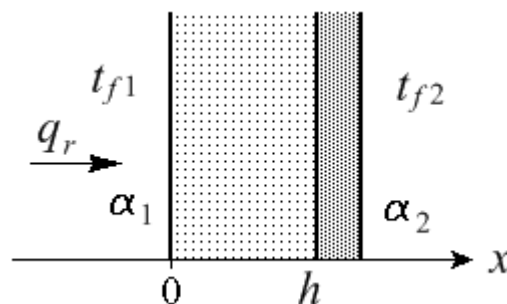


Рис. 2.6 Просторова схема прогріву термічно тонкого тіла

2.2.1 Захист термічно тонкого тіла у загальному випадку

Рівняння нестационарної теплопровідності, що визначає поле температур $t(x, \tau)$ у захисному шарі, має відомий вигляд:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq h; \quad (2.68)$$

де величина " a " є коефіцієнтом температуропровідності матеріалу захисного шару. Вона дорівнює

$$a = \frac{\lambda}{c'}, \quad \frac{m^2}{c},$$

де λ і c' - коефіцієнт теплопровідності, Вт м⁻¹ К⁻¹, і питома об'ємна ізобарна теплоємність, Дж м⁻³ К⁻¹, відповідно.

Граничні умови до рівняння (2.68) мають відомий вигляд.

1) Умова на опромінюваній поверхні ($x=0$), що виражає неперервність повного потоку тепла:

$$-\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_r - \alpha_1 \cdot [t(0, \tau) - t_{f1}], \quad (2.69)$$

де q_r – результуюча щільність потоку теплового випромінювання, що падає на поверхню, Вт м⁻²; α_1 – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі з даної поверхні у середовище, Вт м⁻² К⁻¹; t_{f1} – температура середовища з відповідної сторони, °С.

2) Умовами на протилежній стороні покриття ($x=h$) є, відповідно, безперервність температури й баланс енергії в ТТТ:

$$t(h, \tau) = t_*(\tau), \quad (2.70)$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=h} = c''_* \cdot \frac{dt_*(\tau)}{d\tau} + \alpha_2 \cdot [t_*(\tau) - t_{f2}], \quad (2.71)$$

де c''_* - питома поверхнева теплоємність ТТТ, Дж·м⁻²·К⁻¹, яка дорівнює

$$c''_* = c'_* \cdot h_*, \quad (2.72)$$

де c'_* й h_* - відповідно, питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу ТТТ, Дж м⁻³ К⁻¹, і його товщина, м; α_2 - коефіцієнт конвекційної тепловіддачі з вільної поверхні ТТТ, Вт м⁻² К⁻¹; t_{f2} - температура середовища з відповідної сторони, °С (дивись рис. 2.6).

Початковою умовою задачі (2.68) - (2.71) взято однорідний розподіл температури в покритті і в ТТТ ($0 \leq x \leq h$):

$$t(x, 0) = t_0 \quad (2.73)$$

де t_0 - початкова температура, що вважається відомою.

Нагадаємо, що тіло є термічно тонким, якщо можна зневажати зміною температури в його межах. У нашому випадку ця вимога забезпечується виконанням умови малості критерію Біо задачі тепловіддачі ТТТ у зовнішнє середовище

$$Bi_* = \frac{\alpha_2 \cdot h_*}{\lambda_*} \ll 1, \quad (2.74)$$

де λ_* - коефіцієнт теплопровідності матеріалу ТТТ, Вт м⁻¹ К⁻¹.

Задача (2.68) – (2.72) у випадку незмінності величин a , λ , c'_* , q_r , α_1 , α_2 , t_{f1} , t_{f2} вирішується за допомогою перетворення Лапласа, проведеного по часовій змінній (дивися, наприклад, [124]).

Будемо позначати пряме і зворотнє перетворення Лапласа символами $\hat{L}$ та $\hat{L}^{-1}$, відповідно.

Введемо Лаплас образи різниці температур $[t(x, \tau) - t_0]$ у захисному шарі

$$t_L(x, s) = \hat{L}[t(x, \tau) - t_0] \equiv \int_0^{\infty} [t(x, \tau) - t_0] \cdot \exp(-s \tau) d\tau \quad (2.75)$$

і різниці температур у термічно тонкому тілі

$$t_{*L}(s) = \hat{L}[t_*(\tau) - t_0] \equiv \int_0^{\infty} [t_*(\tau) - t_0] \cdot \exp(-s \tau) d\tau . \quad (2.76)$$

Останні задовольняють лінійній системі звичайних диференціальних рівнянь щодо просторової змінної x .

Рівняння (2.68) набуває вигляд

$$s \cdot t_L(x, s) = a \cdot \frac{d^2 t_L(x, s)}{d x^2}, \quad 0 \leq x \leq h; \quad (2.77)$$

рівняння (2.69), (2.70), (2.71) трансформуються у

$$-\lambda \cdot \left. \frac{dt_L(x, s)}{d x} \right|_{x=0} = \frac{q_r}{s} - \alpha_1 \cdot \left[t_L(0, s) - \frac{t_{f1} - t_0}{s} \right], \quad (2.78)$$

$$t_L(h, s) = t_{*L}(s), \quad (2.79)$$

$$-\lambda \cdot \left. \frac{dt_L(x, s)}{d x} \right|_{x=h} = (s \cdot c_*'' + \alpha_2) \cdot t_{*L}(s) - \alpha_2 \cdot \frac{t_{f2} - t_0}{s}. \quad (2.80)$$

Рішення рівняння (2.76) будемо шукати у вигляді

$$t_L(x, s) = A \cdot e^{k \cdot x} + B \cdot e^{-k \cdot x}, \quad 0 \leq x \leq h, \quad (2.81)$$

де використаємо параметр $k(s)$ (2.18), а A і B – невизначені коефіцієнти, значення яких задається умовами (2.78)–(2.80).

Підставивши вираз (2.81) у рівняння (2.78)–(2.80), отримаємо лінійну систему трьох рівнянь відносно трьох невизначених величин A , B і t_{*L} :

$$\begin{cases} -\lambda \cdot k \cdot (A - B) = \frac{q_r + \alpha_1 \cdot (t_{f1} - t_0)}{s} - \alpha_1 \cdot (A + B) \\ A \cdot e^\varphi + B \cdot e^{-\varphi} = t_{*L} \\ -\lambda \cdot k \cdot (A \cdot e^\varphi - B \cdot e^{-\varphi}) = s \cdot c'' \cdot t_{*L} + \alpha_2 \cdot t_{*L} - \frac{\alpha_2 \cdot (t_{f2} - t_0)}{s} \end{cases}, \quad (2.82)$$

у якому використана раніше введена безрозмірна змінна φ (2.25).

Вирішивши систему рівнянь (2.82), отримаємо вираз

$$t_{*L}(s) = \frac{Bi_1 \cdot (t_{\max 1} - t_0) + \left(ch(\varphi) + Bi_1 \cdot \frac{sh(\varphi)}{\varphi} \right) \cdot Bi_2 \cdot (t_{f2} - t_0)}{D(s)}, \quad (2.83)$$

де

$$D(s) = s \cdot \left\{ [Bi_1 + Bi_2 + C \cdot \varphi^2] \cdot ch(\varphi) + [Bi_1 \cdot Bi_2 + (1 + C \cdot Bi_1) \cdot \varphi^2] \cdot \frac{sh(\varphi)}{\varphi} \right\}. \quad (2.84)$$

При записі співвідношень (2.83), (2.84) використані позначення:

1) критерії Био задачі тепловіддачі покриття -

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot h}{\lambda}, \quad (2.85)$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha_2 \cdot h}{\lambda}; \quad (2.86)$$

2) відношення поверхневих теплоємностей шарів ТТТ і покриття –

$$C = \frac{c''}{c'} = \frac{c'_* \cdot h_*}{c' \cdot h}, \quad (2.87)$$

де c'' - питома поверхнева теплоємність покриття, Дж·м⁻²·К⁻¹:

$$c'' = c' \cdot h; \quad (2.88)$$

3) ефективна температура гарячого середовища –

$$t_{\max 1} = \frac{q_r}{\alpha_1} + t_{f1}. \quad (2.89)$$

Застосування зворотного перетворення Лапласа до виразу (2.83) дає результат

$$t_*(\tau) - t_0 = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Bi_1 \cdot (t_{\max 1} - t_0) + \left(ch(\varphi_n) + Bi_1 \frac{sh(\varphi_n)}{\varphi_n} \right) \cdot Bi_2 \cdot (t_{f2} - t_0)}{\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}} e^{s_n \tau}, \quad (2.90)$$

де додавання провадиться по коріннях s_n характеристичного рівняння

$$D(s) = 0. \quad (2.91)$$

Через позитивність усіх коефіцієнтів у виразі (2.84) рівняння (2.91) не має дійсних коренів. Через це, маючи на увазі робити із дійсними параметрами, зробимо заміну змінних від φ до μ :

$$\varphi = i \cdot \mu, \quad (2.92)$$

де $i = \sqrt{-1}$.

У цих змінних характеристичному рівнянню (2.91) можна надати вигляд:

$$tg(\mu) = -\mu \cdot \frac{Bi_1 + Bi_2 - C \cdot \mu^2}{Bi_1 \cdot Bi_2 - (1 + C \cdot Bi_1) \cdot \mu^2}. \quad (2.93)$$

Зразу відмітимо, що рівняння (2.93) має рішення $\mu = \mu_0 = 0$, що відповідає рішенням $s = s_0 = 0$ рівняння (2.91). Структура рівняння (2.93) така, що, якщо μ_n є рішенням цього рівняння, то і $-\mu_n$ є рішеннями. Останнє означає що, для врахування усіх рішень s_n ($n = 1, 2, \dots$) рівняння (2.91) достатньо розглянути усі позитивні рішення μ_n рівняння (2.93). Також відмітимо, що згідно із формулами (2.25) і (2.92) виконується співвідношення

$$s_n = -\frac{\mu_n^2}{\tau_0}. \quad (2.94)$$

Розташування коренів характеристичного рівняння (2.93) можна побачити, розглядаючи на рисунку 2.7 нанесені на одне поле графіки двох функцій:

$$y_1(\mu) = tg(\mu), \quad (2.95)$$

$$y_2(\mu) = -\mu \cdot \frac{Bi_1 + Bi_2 - C \cdot \mu^2}{Bi_1 \cdot Bi_2 - (1 + C \cdot Bi_1) \cdot \mu^2}. \quad (2.96)$$

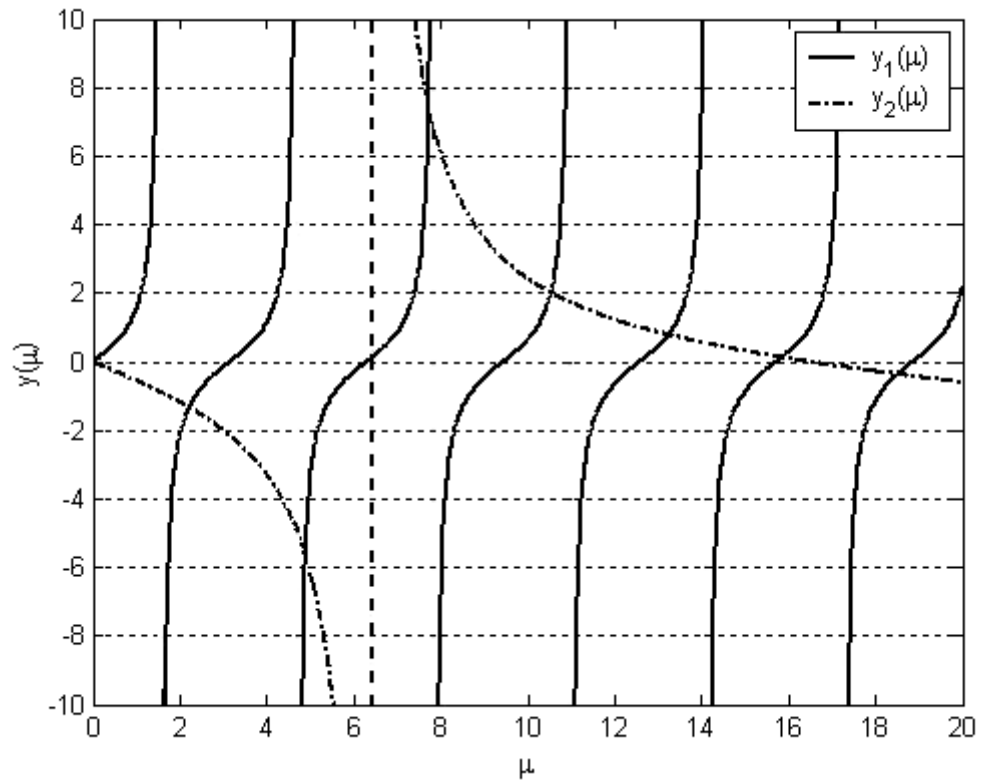


Рис. 2.7 Графіки складових характеристичного рівняння (2.93) (при $Bi_1=2$, $Bi_2=25$, $C=0,1$)

Абсциси точок перетину графіків функцій $y_1(\mu)$ та $y_2(\mu)$ співпадають з коренями рівняння (2.93).

У кожному із періодів $\omega(n) = ((n - 0.5) \cdot \pi; (n + 0.5) \cdot \pi)$, де n - ціле число, періодична функція $y_1(\mu)$ монотонно зростає від $-\infty$ до $+\infty$. Функція $y_2(\mu)$ не має кінцевих розривів. Із двох попередніх тверджень витікає, що у кожному із інтервалів $\omega(n)$ функції $y_1(\mu)$ і $y_2(\mu)$ перетинаються хоча б один раз.

Уточнимо останнє твердження. Для цього введемо позитивну координату μ_b точки розриву функції $y_2(\mu)$. Згідно із визначенням функції $y_2(\mu)$ (2.96) це значення дорівнює

$$\mu_b = \sqrt{\frac{Bi_1 \cdot Bi_2}{1 + C \cdot Bi_1}}. \quad (2.97)$$

Із характеру монотонності функцій $y_1(\mu)$ і $y_2(\mu)$ витікає:

а) якщо точка $\mu_b \notin \omega(n)$, то в інтервалі $\omega(n)$ є тільки одна точка перетину функцій $y_1(\mu)$ і $y_2(\mu)$, тобто тільки один корінь рівняння (2.93) (що дає один корінь рівняння (2.91));

б) якщо $\mu_b \in \omega(n)$ і $n \neq 0$, то в інтервалі $\omega(n)$ є дві точки перетину відповідних функцій, тобто є два кореня рівняння (2.93) (що дає два корені рівняння (2.91)); менший із цих коренів $\mu^<$ є єдиним на інтервалі $\mu^< \in ((n - 0,5) \cdot \pi; \mu_b)$, більший корінь $\mu^>$ є єдиним на інтервалі $\mu^> \in (\mu_b; (n + 0,5) \cdot \pi)$;

в) якщо $\mu_b \in \omega(0)$, то в інтервалі $\omega(0)$ є три корені рівняння (2.93): це $\mu_0 = 0$, $\mu_1 > 0$ і $-\mu_1$; ця ситуація означає існування в даному інтервалі двох коренів рівняння (2.91): це $s_0 = 0$ і $s_1 = -\mu_1^2 / \tau_0$; корінь μ_1 належить інтервалу $\mu_1 \in (\mu_b; 0,5 \cdot \pi)$.

Згідно із рівнянням (2.93) значення ненульових коренів цього рівняння є функцією чотирьох змінних, тобто $\mu_n = \mu(n, Bi_1, Bi_2, C)$. Чисельні значення коренів знаходилися із використанням стандартних комп'ютерних програм. Через те, що кількість змінних перевищує 2, графічне або табличне представлення значень μ_n недоцільне.

Відмітимо важливу особливість залежності величин μ_n від n , яка витікає із розташування послідовних коренів μ_n і μ_{n+1} здебільшого у сусідніх областях ω . Через те, що сусідні області ω зсунуті на відстань π , то ,якщо в ці області не потрапляє точка μ_b ,

$$\mu_{n+1} - \mu_n \approx \pi. \quad (2.98)$$

Із даного співвідношення витікає оцінка

$$\mu_n \approx n \cdot \pi, \quad (2.99)$$

яка часто дозволяє у сумі (2.90) обмежитись невеликою кількістю перших доданків.

Згідно із співвідношенням (2.90) при визначення величини температури треба розраховувати безрозмірну величину $\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}$. Спираючись на співвідношення (2.84), (2.25) і (2.92) можна показати, що

$$\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_0=0} = Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2, \quad (2.100)$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n \neq 0} &= \frac{1}{2} \cdot \cos(\mu_n) \cdot \{Bi_1 \cdot Bi_2 - [1 + 2 \cdot C + C \cdot Bi_1] \cdot \mu_n^2\} - \\ &- \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\mu_n)}{\mu_n} \cdot \{Bi_1 \cdot Bi_2 + [1 + Bi_1 + Bi_2 + C \cdot Bi_1] \cdot \mu_n^2 - C \cdot \mu_n^4\} \end{aligned} \quad (2.101)$$

Маючи на меті надати безрозмірного (критеріального) вигляду рівнянню (2.90), введемо:

1) відносну надлишкову температуру ТТТ

$$\theta \equiv \frac{t_*(\tau) - t_0}{t_{\max 1} - t_0}; \quad (2.102)$$

2) відносну надлишкову температуру середовища з другого боку ТТТ

$$\theta_{f2} \equiv \frac{t_{f2} - t_0}{t_{\max 1} - t_0}; \quad (2.103)$$

3) безрозмірний час процесу (критерій Фур'є):

$$Fo \equiv \frac{\tau}{\tau_0} = \frac{a \cdot \tau}{h^2}. \quad (2.104)$$

У цих змінних рівняння (2.90) набуває повністю безрозмірного вигляду:

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \sum_{n=0}^{\infty} \theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}). \quad (2.105)$$

Доданки ряду (2.105) експоненціально зменшуються із часом

$$\theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = A_n(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo), \quad (2.106)$$

а

$$A_n(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + \left(\cos(\mu_n) + Bi_1 \cdot \frac{\sin(\mu_n)}{\mu_n} \right) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_n}}, \quad (2.107)$$

де знаменник дробі (2.107) описано формулою (2.101).

На рисунках 2.8 та 2.9 наведено графіки залежності від Fo доданків ряду (2.105) (тобто θ_n) для декількох початкових значень n та часткових сум ряду (2.105) θ_{sum} для N початкових доданків:

$$\theta_{sum}(N, Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) \equiv \sum_{n=0}^{N-1} \theta_n(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}). \quad (2.108)$$

З графіків витікає, що якщо не цікавитись ситуацією при малих значеннях часу $Fo \ll 1$, то при розрахунках θ достатньо використовувати декілька

перших (але не менше двох) доданків ряду (2.105). Остання обставина повністю пояснюється існуванням оцінки (2.99) і множником $\exp(-\mu_n^2 \cdot Fo)$ у виразі (2.106). Так у випадку, зображеному на рис.2.8, $Bi_1=2$, $Bi_2=25$, $C=0,1$, що відповідає $\mu_1 = 2,215$, $\mu_2 = 4,888$, $\mu_3 = 7,722$, при $Fo=0,5$ реалізується оцінка

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} < \exp[-(\mu_2^2 - \mu_1^2) \cdot Fo] \approx \exp[-19,0 \cdot 0,5] \approx 7,5 \cdot 10^{-5},$$

$$\frac{\theta_3}{\theta_2} < \exp[-(\mu_3^2 - \mu_2^2) \cdot Fo] \approx \exp[-35,7 \cdot 0,5] \approx 1,8 \cdot 10^{-8}.$$

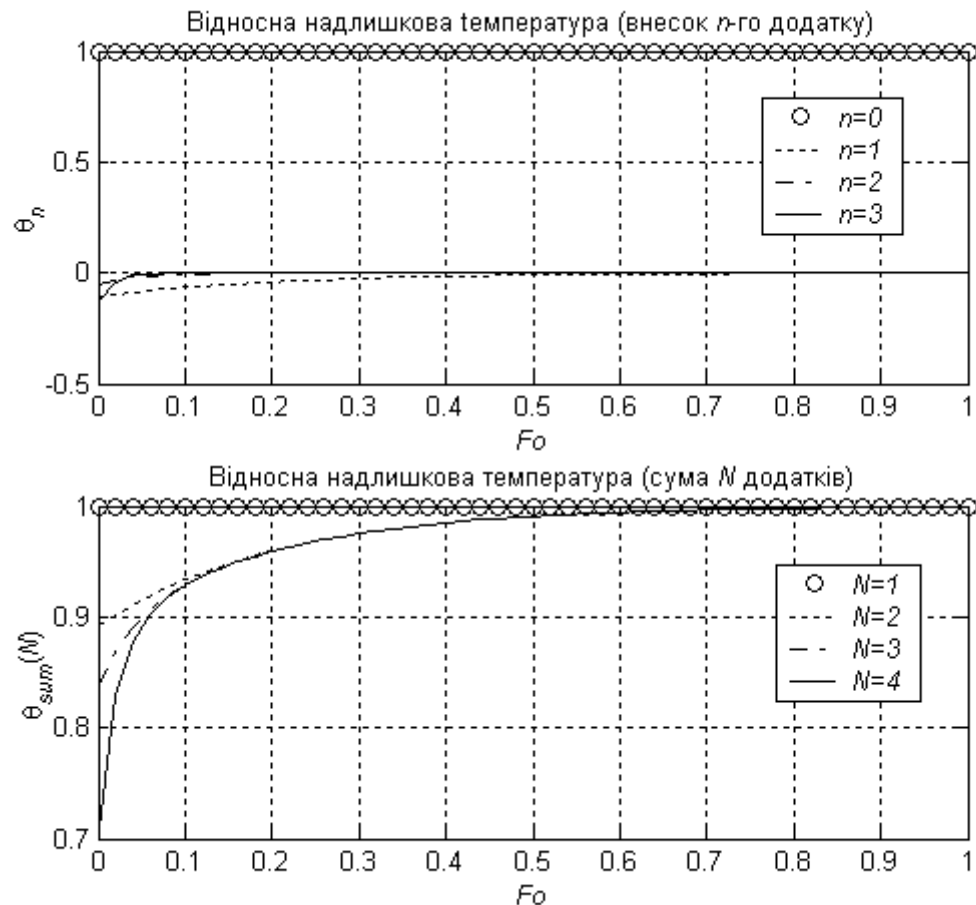


Рис. 2.8 Графіки залежності доданків ряду (2.105) θ_n та часткових сум цього ряду θ_{sum} від критерію Fo при $Bi_1=2$, $Bi_2=25$, $C=0,1$, $\theta_{p2}=1$

У випадку, зображеному на рис.2.9, $Bi_1=0,2$, $Bi_2=0,3$, $C=2$, що відповідає

$\mu_1 = 0,402$, $\mu_2 = 1,937$, $\mu_3 = 4,857$, при $Fo = 0,5$ реалізується оцінка

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} < \exp[-(\mu_2^2 - \mu_1^2) \cdot Fo] \approx \exp[-3,59 \cdot 0,5] \approx 1,7 \cdot 10^{-1},$$

$$\frac{\theta_3}{\theta_2} < \exp[-(\mu_3^2 - \mu_2^2) \cdot Fo] \approx \exp[-19,8 \cdot 0,5] \approx 4,9 \cdot 10^{-5}.$$

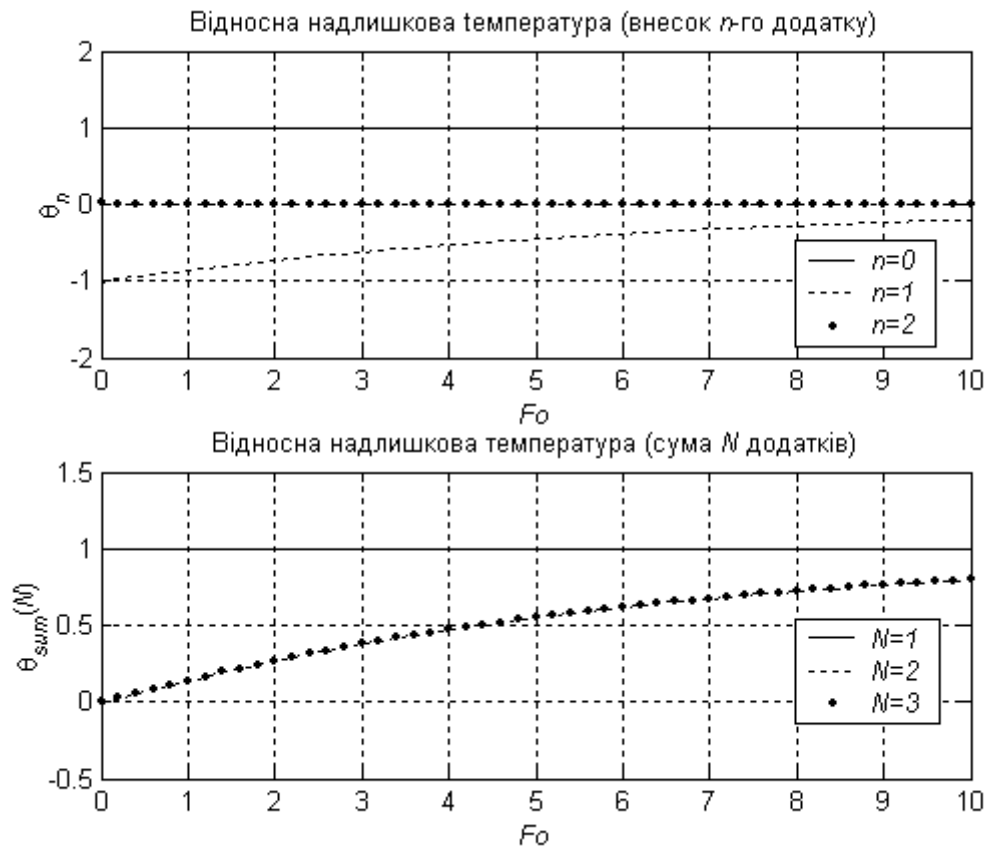


Рис. 2.9 Графіки залежності доданків ряду (2.105) θ_n та часткових сум цього ряду θ_{sum} від критерію Fo при $Bi_1=0,2$, $Bi_2=0,3$, $C=2$, $\theta_{f2}=1$

Якщо, вирішуючи задачу пожежної безпеки, задаватися критичним рівнем температури ТТТ t_{cr} та її безрозмірним відповідником

$$\theta_{cr} \equiv \frac{t_{cr} - t_0}{t_{max1} - t_0}, \quad (2.109)$$

то критична температура θ_{cr} буде пов'язана з безрозмірним часом Fo співвідношенням [51]

$$\theta_{cr} = \theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}), \quad (2.110)$$

із якого витікає залежність критичного значення граничної температури $t_{\max 1.cr}$ (2.89) від часу й критичної температури t_{cr} :

$$t_{\max 1.cr} = t_0 + \frac{t_{cr} - t_0}{\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2})}. \quad (2.111)$$

Залежність критичного значення безрозмірного часу Fo_{cr} від критичної температури θ_{cr} можна одержати, розв'язавши рівняння (2.110) щодо змінної Fo . У межах не малих часів, тобто коли критерій Фур'є (Fo) більше або порядку одиниці, таку операцію можна проробити явно. Як відзначалося раніше, у цьому випадку від ряду (2.105) можна залишити два перших доданки і тоді

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = A_0 + A_1 \cdot \exp[-\mu_1^2 \cdot Fo], \quad (2.112)$$

де

$$A_0(Bi_1, Bi_2, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + (1 + Bi_1) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{Bi_1 + (1 + Bi_1) \cdot Bi_2},$$

а амплітуда $A_1(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2})$ визначається формулою (2.107). Корінь $\mu_1(Bi_1, Bi_2, C)$ характеристичного рівняння (2.93) доведеться одержувати чисельно. Область його одиничності залежить від величини параметра μ_b (2.97): при $\mu_b \in (0; 0,5 \cdot \pi)$ корінь $\mu_1 \in (\mu_b; 0,5 \cdot \pi)$, при $\mu_b \in (0,5 \cdot \pi; 1,5 \cdot \pi)$ корінь $\mu_1 \in (0,5 \cdot \pi; \mu_b)$; при $\mu_b \in (1,5 \cdot \pi; \infty)$ корінь $\mu_1 \in (0,5 \cdot \pi; 1,5 \cdot \pi)$.

Вирішуючи рівняння (2.110) в області адекватності формули (2.112), одержимо залежність критичного значення безрозмірного часу Fo_{cr} від критичної температури θ_{cr} :

$$Fo_{cr} = \frac{1}{\mu_1^2} \cdot \ln \left(\left| \frac{A_1}{A_0 - \theta_{cr}} \right| \right), \quad (2.113)$$

або в розмірному вигляді для межі вогнестійкості

$$\tau_{cr} = \tau_0 \cdot Fo_{cr} = \frac{h^2}{a} \cdot \frac{1}{\mu_1^2} \cdot \ln \left(\left| \frac{A_1}{A_0 - \theta_{cr}} \right| \right). \quad (2.114)$$

2.2.2 Захист термічно тонкого тіла у випадку великих часів прогріву

[53, 33]

При аналітичному дослідженні співвідношення (2.105) ми обмежимося довгостроковою асимптотичною областю (дивись (2.31))

$$Fo \gg 1 \Leftrightarrow \tau \gg \tau_0, \quad (2.115)$$

що означає домінування в сумі (2.105) доданків з $\mu = \mu_0 = 0$ і $\mu = \mu_1$, причому останнього за умови виконання співвідношення

$$\mu_1^2 \ll 1. \quad (2.116)$$

Для пошуку кореня μ_1 скористаємось обмеженням (2.116). Розкладемо $tg(\mu)$ в ступеневий ряд по μ :

$$\operatorname{tg}(\mu) = \mu + \frac{1}{3} \cdot \mu^3 + O(\mu^5),$$

що надасть можливість надати характеристичному рівнянню (2.93) вигляд:

$$1 + \frac{1}{3} \mu_1^2 = - \frac{Bi_1 + Bi_2 - C \cdot \mu_1^2}{Bi_1 \cdot Bi_2 + (1 + C \cdot Bi_1) \cdot \mu_1^2}. \quad (2.117)$$

Рішення рівняння (2.117) відносно μ_1^2 , з врахуванням нерівності (2.116), має вигляд:

$$\mu_1^2 = \frac{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2}{1 + C \cdot (1 + Bi_1) - \frac{1}{3} \cdot Bi_1 \cdot Bi_2}. \quad (2.118)$$

Виконання умови (2.116) накладає обмеження на можливі значення параметрів правої частини співвідношення (2.118).

Умова (2.116) виконується, якщо

або

$$C \gg (1 + Bi_2), \quad (2.119)$$

або

$$(Bi_1 + Bi_2) \ll 1. \quad (2.120)$$

В термінах фізичних параметрів останні умови мають вигляд

або

$$\frac{c'_* \cdot h_*}{c' \cdot h} \gg \left(1 + \frac{\alpha_2 \cdot h}{\lambda} \right), \quad (2.121)$$

або

$$\left(\frac{\alpha_1 \cdot h}{\lambda} + \frac{\alpha_2 \cdot h}{\lambda} \right) \ll 1. \quad (2.122)$$

Аналіз співвідношення (2.118) показує, що і в області (2.119) і в області (2.120) доданком із добутком $Bi_1 \cdot Bi_2$ у знаменнику виразу (2.118) можна знехтувати, тобто при розрахунках у областях (2.119), (2.120) можна приймати

$$\mu_1^2 = \frac{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2}{1 + C \cdot (1 + Bi_1)}. \quad (2.123)$$

Випишемо у явному вигляді коефіцієнти A_0 і A_1 , що використовуються у ряду (2.105).

Згідно із формулами (2.107), (2.100), з врахуванням того, що $\mu_0 = 0$,

$$A_0(Bi_1, Bi_2, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + (1 + Bi_1) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2}. \quad (2.124)$$

Згідно із записом (2.107) коефіцієнт A_1 має загальний вигляд

$$A_1(Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + \left(\cos(\mu_1) + Bi_1 \cdot \frac{\sin(\mu_1)}{\mu_1} \right) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{\left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_1}}, \quad (2.125)$$

Скористаємось обмеженням (2.116) та відомими ступеневими розкладами

$$\cos(\mu) = 1 - \frac{1}{3} \cdot \mu^2 + O(\mu^4), \quad \frac{\sin(\mu)}{\mu} = \frac{\mu + \frac{\mu^3}{6} + O(\mu^5)}{\mu} = 1 + \frac{1}{6} \cdot \mu^2 + O(\mu^4).$$

Згідно з ними перший незникаючий доданок у розкладі чисельника формули (2.125) по ступеням μ_1^2 співпадає із чисельником виразу (2.124).

Розклад знаменника формули (2.125) по ступеням μ_1^2 згідно із співвідношенням (2.101) має вигляд

$$\begin{aligned}
 \left. \frac{dD}{ds} \right|_{s=s_1} &= \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{\mu_1^2}{3} \right] \cdot \{ Bi_1 \cdot Bi_2 - [1 + 2 \cdot C + C \cdot Bi_1] \cdot \mu_1^2 \} - \\
 &- \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{\mu_1^2}{6} \right] \cdot \{ Bi_1 \cdot Bi_2 + [1 + Bi_1 + Bi_2 + C \cdot Bi_1] \cdot \mu_1^2 \} + O(\mu_1^4) = \\
 &= -\mu_1^2 \cdot \left[1 + C \cdot (1 + Bi_1) + \frac{Bi_1 + Bi_2}{2} + \frac{Bi_1 \cdot Bi_2}{4} \right] + O(\mu_1^4) = \\
 &= -(Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2) \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{Bi_1 + Bi_2 + \frac{1}{2} \cdot Bi_1 \cdot Bi_2}{1 + C \cdot (1 + Bi_1)} \right] + O(\mu_1^4) = \\
 &= -(Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2) + O(\mu_1^4).
 \end{aligned} \tag{2.126}$$

При отриманні передостанньої строки запису (2.126) використано явний вид виразу μ_1^2 (2.123). Другий доданок у квадратних дужках цієї строки, згідно із нерівностями (2.119), (2.120) малий у порівнянні з одиницею. Це означає, що з відносною точністю $\sim \mu_1^2$ реалізується збіг абсолютної величини коефіцієнтів:

$$A_1 = -A_0 = -\frac{Bi_1 + (1 + Bi_1) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2}. \tag{2.127}$$

З врахуванням отриманого можна стверджувати, що у області великих часів (2.115) залежність безрозмірної температури ТТТ від часу приймає вигляд

$$\theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}) = \frac{Bi_1 + (1 + Bi_1) \cdot Bi_2 \cdot \theta_{f2}}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2} \cdot [1 - \exp(-\mu_1^2 \cdot Fo)], \tag{2.128}$$

де величина μ_1^2 розраховується за формулою (2.123).

Залежність (2.128) можна представити у розмірному вигляді

$$t_*(\tau) = \frac{q_r + \alpha_1 \cdot t_{f1} + \alpha_2 \cdot t_{f2} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda}\right)}{\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda}\right)} \cdot (1 - e^{-m \cdot \tau}) + t_0 \cdot e^{-m \cdot \tau}, \quad (2.129)$$

у якому параметр m має сенс темпу прогріву (охолодження) ТТТ, однобічно покритого захисним шаром. Згідно із співвідношеннями (2.123), (2.85)-(2.87), (2.104), він дорівнює

$$m = \frac{\mu_1^2}{\tau_0} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda}\right)}{c' \cdot h + c_*' \cdot h_* \cdot \left(1 + \frac{\alpha_1 h}{\lambda}\right)}, \text{ c}^{-1}. \quad (2.130)$$

Дві останні формули вирішують поставлену проблему. Зокрема, у випадку $h=0$, співвідношення (2.129), (2.130) дають відомий результат задачі прогріву (охолодження) термічно тонкого тіла у відсутності захисного покриття.

2.3 Теплозахисна дія випадкового-неоднорідного шару [49]

Метою даного підрозділу є оцінка захисної дії випадково-неоднорідного по товщині покриття (на відміну до ситуації регулярної неоднорідності [234]). Розрахунок проведений у випадку, коли тіло, яке захищає покриття, є термічно товстим. У такому разі, як було показано в роботі [31], нанесення покриття при квазістаціонарному прогріві формально приводить до збільшення термічного опору процесу передачі тепла на величину термічного опору теплопровідності захисного шару.

Проаналізуємо, до чого приводить випадкова неоднорідність покриття.

Нехай на плоску незахищену ділянку поверхні площею dF падає тепловий потік dQ . Його величина визначається рівнянням тепловіддачі

$$dQ = \frac{\Delta t}{R_\alpha} \cdot dF, \text{ Вт} \quad (2.131)$$

де $R_\alpha \equiv 1/\alpha$ - термічний опір тепловіддачі, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$, а α - коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; Δt - перепад температур між гарячим середовищем і поверхнею, яку необхідно захищати, К . У цьому випадку, якщо на дану поверхню нанести майже плоский шар (нормаль до його поверхні відхиляється на малий кут від нормалі до поверхні, яку він захищає) захисного матеріалу, то тепловий потік, що попадає на поверхню, прийме величину

$$dQ_s = \frac{\Delta t}{R_\alpha + R_\lambda} \cdot dF, \text{ Вт.} \quad (2.132)$$

Тут $R_\lambda(h) \equiv h/\lambda$ - термічний опір теплопровідності однорідного плоского шару, $\text{Вт}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$; h - товщина шару, м ; λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Тепловий потік Q_s через кінцеву за розміром ділянку захищеної поверхні отримується інтегруванням співвідношення (2.132) по її площі F

$$Q_s = \int_F \frac{\Delta t}{R_\alpha + R_\lambda} \cdot dF, \text{ Вт.} \quad (2.133)$$

Використаємо ту обставину, що товщина захисного шару h є випадковою функцією місця розташування. Ведемо щільність імовірності частки площ захисного шару із заданою товщиною:

$$g(h) \equiv \frac{1}{F} \cdot \frac{dF}{dh}, \text{ м}^{-1}. \quad (2.134)$$

де F - загальна площа, що підлягає захисту, м^2 .

Використовуючи співвідношення (2.131) - (2.134), представимо потік тепла (2.133) у вигляді

$$Q_s = k \cdot Q, \text{ Вт}, \quad (2.135)$$

де $Q = \frac{\Delta t}{R_\alpha} \cdot F$, Вт, - загальний потік тепла через поверхню без захисту, а k - коефіцієнт пропускання теплового потоку випадковим захисним шаром, який дорівнює

$$k = \int_0^\infty \frac{g(h) \cdot dh}{1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot h}. \quad (2.136)$$

Коефіцієнт (2.136) істотно залежить від конкретної залежності щільності розподілу $g(h)$. Досить загальна структура цієї функції має вигляд:

$$g(h) = P_0 \cdot \delta(h) + \vartheta(h) \cdot \tilde{g}(h), \text{ м}^{-1}. \quad (2.137)$$

Тут $\delta(h)$ - дельта-функція Дірака, одне з основних властивостей якої записується співвідношенням

$$\int_0^\infty f(h) \cdot \delta(h) \cdot dh = f(0), \quad (2.138)$$

де $f(h)$ - довільна гладка в нулі функція від h . Символом $\vartheta(h)$ позначена функція Хевісайда (сходінка від нуля до одиниці, що виникає при $h = 0$).

Відповідно до співвідношень (2.134), (2.137), (2.138) множник P_0 є ймовірністю реалізації захисного шару нульової товщини, що передбачувано збігається із часткою незахищеної площі. Функція $\tilde{g}(h)$ описує розподіл площ захисного шару у випадку $h > 0$. У ході подальших оцінок будемо припускати, що розподіл $g(h)$ обумовлюється двома характерними довжинами: 1) найбільш імовірним (крім нульового) значенням товщини захисного шару a , м; 2) характерним масштабом зміни товщини шару σ , м.

Природно припустити, що вигляд розподілу істотно залежить від величини $y_m = a/\sigma$, що є найбільш імовірною товщиною захисного шару, обезразміреною на характерний масштаб зміни. Припустимо, що ймовірність P_0 визначається тільки y_m , а залежність $\tilde{g}(h)$ має вигляд усіченого нормального розподілу

$$\tilde{g}(h) = \frac{C}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma} - y_m \right)^2 \right], \text{ м}^{-1}. \quad (2.139)$$

Множник C визначається з умови нормировки

$$\begin{aligned} 1 &= \int_0^{\infty} g(h) \cdot dh = P_0(y_m) + \frac{C}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} (y - y_m)^2 \right] \cdot dy = \\ &= P_0(y_m) + \frac{C}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{y_m}{\sqrt{2}} \right) \right], \end{aligned} \quad (2.140)$$

у якій символом $\operatorname{erf}(Z)$ позначений Гаусов інтеграл помилок.

Якщо прийняти не критичну для одержуваних результатів гіпотезу, що ймовірність P_0 збігається із загальною ймовірністю негативних значень товщини h в нормальному розподілі, то

$$P_0(y_m) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \int_{-\infty}^0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{h}{\sigma} - y_m \right)^2 \right] \cdot dh = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y_m}{\sqrt{2}} \right) \right]. \quad (2.141)$$

У цьому випадку з виразу (2.140) витікає, що $C=1$, і коефіцієнт ослаблення теплового потоку випадковим захисним шаром, згідно із визначенням (2.136), дорівнює

$$k(y_m, Bi) = \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{y_m}{\sqrt{2}} \right) \right] + \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} \frac{\exp \left[-\frac{1}{2} (y - y_m)^2 \right]}{1 + Bi \cdot y} \cdot dy. \quad (2.142)$$

У формулі (2.142) уведено безрозмірний параметр

$$Bi = \frac{\alpha \cdot \sigma}{\lambda}, \quad (2.143)$$

який можна трактувати як критерій Біо, пов'язаний з характерною зміною товщини захисного шару σ .

Графіки залежності коефіцієнта пропускання теплового потоку випадковим захисним шаром $k(y_m, Bi)$ від y_m при різних значеннях критерію Bi представлені на рисунку 2.10.

Величина $k_c(y_m, Bi)$ на рисунку 2.10 є коефіцієнтом пропускання теплового потоку шаром постійної товщини, яка дорівнює середній товщині відповідного шару випадкової товщини:

$$k_c(y_m, Bi) = \frac{1}{1 + Bi \cdot \bar{y}(y_m)}, \quad (2.144)$$

де $\bar{y}$ - обеззмірене на σ середнє значення товщини шару випадкової товщини:

$$\bar{y}(y_m) = \frac{1}{\sigma} \cdot \int_0^{\infty} h \cdot g(h) \cdot dh = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_0^{\infty} y \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}(y - y_m)^2\right] \cdot dy. \quad (2.145)$$

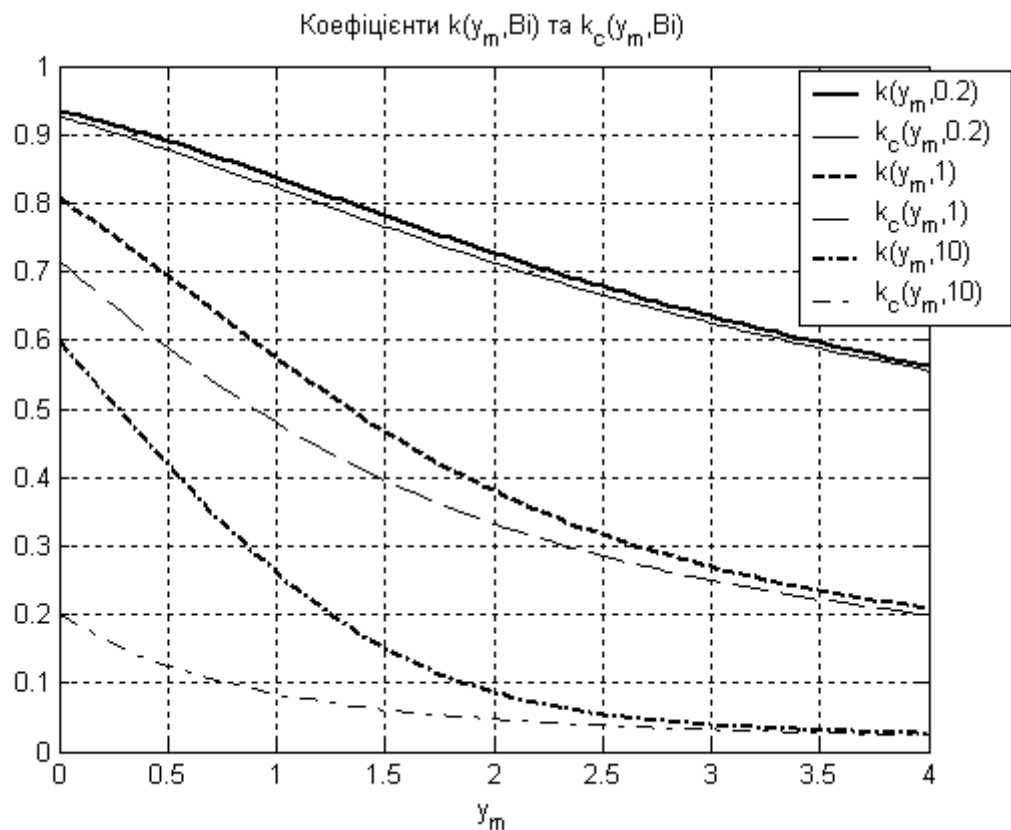


Рис. 2.10 Графіки залежності коефіцієнта пропускання теплового потоку захисним шаром випадкової товщини $k(y_m, Bi)$ і відповідним йому захисним шаром постійної товщини $k_c(y_m, Bi)$ від y_m при різних значеннях критерію Bi

Порівняння графіків рисунку 2.10 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 ($Bi = \alpha \cdot \sigma / \lambda$).

2.4 Моделювання теплозахисної дії поглинаючого покриття при пожежі у приміщенні

У даному підрозділі буде розглянуте питання щодо комп'ютерного моделювання дії вогнезахисного покриття при пожежі у приміщенні.

Нагрівання поверхонь тіл відбувається внаслідок тепловіддачі від гарячого газового середовища приміщення. Значення температури газового середовища у приміщенні визначається у рамках відомої інтегральної моделі [233], деякі аспекти якої, які стосуються швидкості вигорання, уточнювалися у роботах [29, 30].

Інтегральна модель визначає часові залежності середніх об'ємних значень параметрів стану газового середовища у приміщенні, до яких відносяться тиск p_m , Па, густина ρ_m , $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$, абсолютна температура T_m , К, масова частка i -го компонента $g_{i,m}$ (нижній індекс « m » в позначці параметра стану означає середнє об'ємне значення).

Приведемо основні рівняння інтегральної моделі.

1) Рівняння стану ідеального газу:

$$p_m = \rho_m \cdot R_m \cdot T_m, \quad (2.146)$$

де R_m - питома газова стала газового середовища у приміщенні, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

2) Рівняння матеріального балансу:

$$V \frac{d\rho_m}{d\tau} = G_{in} + \psi_b - G_{out}, \quad (2.147)$$

де G_{in} і G_{out} - масова витрата газів до приміщення та назовні, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$, відповідно;

ψ_b - швидкість вигорання (газифікації) пального у осередку пожежі, $\text{кг}\cdot\text{с}^{-1}$; V - об'єм приміщення, м^3 .

3) Рівняння балансу кисню:

$$V \frac{d(\rho_m \cdot g_{O2.m})}{d\tau} = G_{ii} \cdot g_{O2.a} - \eta_b \cdot \psi_b \cdot L_{O2} - G_{out} \cdot g_{O2.m}, \quad (2.148)$$

де η_b - коефіцієнт повноти згоряння пального; L_{O2} - маса кисню, яка потрібна для повного згоряння одиниці маси пального матеріалу, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$; $g_{O2.a}$ - масова частка кисню у припливному (до приміщення) повітрі (зазвичай, $g_{O2.a} = 0,23$).

4) Рівняння балансу продуктів горіння

$$V \frac{d(\rho_m \cdot g_{i.m})}{d\tau} = G_{ii} \cdot g_{i.a} + \eta_b \cdot \psi_b \cdot L_i - G_{out} \cdot g_{i.m}, \quad (2.149)$$

де $i = CO_2, CO, H_2O, HCl$ - індекс продукту згоряння; L_i - маса i -го продукту згоряння, яка утворюється при повному згорянні одиниці маси пального матеріалу, $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$; $g_{i.a}$ - масова частка i -го продукту згоряння у припливному повітрі.

5) Рівняння балансу інертного газу

$$V \frac{d(\rho_m \cdot g_{i.m})}{d\tau} = G_{ii} \cdot g_{i.a} - G_{out} \cdot g_{i.m}, \quad (2.150)$$

де $i = N_2, Ar$ - індекс інертного газу; $g_{i.a}$ - масова частка i -го інертного газу у припливному повітрі.

6) Рівняння енергії

$$\frac{V}{k-1} \frac{dp_m}{d\tau} = (\eta_b \cdot Q_l + i_g) \cdot \psi_b - Q_w + G_{ii} \cdot c_a \cdot T_a - G_{out} \cdot c_m \cdot T_m, \quad (2.151)$$

де k - стала адіабати газового середовища; Q_l – питома нижча теплота згоряння пального, Дж·кг⁻¹; i_g – це питома теплота відповідного процесу газифікації, Дж·кг⁻¹; c_m - середня питома ізобарна теплоємність газового середовища у приміщенні, Дж·кг⁻¹ К⁻¹; c_a - питома ізобарна теплоємність припливного повітря, Дж·кг⁻¹ К⁻¹, а T_a - його абсолютна температура, К.

Тепловий потік Q_w , Вт, що уходить із газового середовища приміщення, складається з двох складових: конвекційного потоку тепла в огорожу і радіаційного теплового потоку з приміщення у навколишнє середовище:

$$Q_w = \bar{\alpha} \cdot (T_m - T_w) \cdot F_w + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_m^4 - T_a^4) \cdot F_a \quad (2.152)$$

де T_w – середня абсолютна температура поверхні огорожі, К; F_a - площа отворів, що з'єднують приміщення із зовнішнім середовищем, м²; ε – ступінь чорноти середовища; $\bar{\alpha}$ - середній по поверхні огорожі коефіцієнт тепловіддачі, Вт·м⁻²·К⁻¹.

Початковими умовами до приведеної системи звичайних диференціальних рівнянь є дані про стан газового середовища перед пожежею, тобто при $\tau = 0$:

$$T_m(0) = T_0, \quad p_m(0) = p_0, \quad \rho_m(0) = \rho_0, \quad g_{i.m}(0) = g_{i.0}.$$

Швидкість вигорання горючого матеріалу ψ_b задається співвідношенням:

$$\psi_b = u_m \cdot F_f \cdot K_{O_2}, \quad (2.153)$$

де u_m - питома масова швидкість вигорання, кг·м⁻²·с⁻¹; F_f - площа пожежі, м², залежність якої від часу має вигляд

$$F_f(\tau) = \begin{cases} F_0 + F_1 \cdot \tau + F_2 \cdot \tau^2, & F_f(\tau) < F_{floor} \\ F_{floor}, & F_f(\tau) \geq F_{floor} \end{cases}, \quad (2.154)$$

де F_0 , m^2 , F_1 , $m^2 \cdot c^{-1}$, F_2 , $m^2 \cdot c^{-2}$ - константи, значення яких задає користувач, F_{floor} - максимальна можлива площа горіння, m^2 ; множник K_{O_2} , що враховує залежність швидкості вигорання від концентрації кисню, задається формулою

$$K_{O_2} = \left(\frac{g_{O_2.m}}{g_{O_2.a}} \right)^2.$$

Газообмін приміщення із навколишнім середовищем має дві складові – примусову вентиляцію і вільну конвекцію. Відповідно, масова витрата газообміну у моделі має вигляд

$$G_{out} = G_{out}^{forc} + G_{out}^{free}, \quad G_{ii} = G_{ii}^{forc} + G_{ii}^{free},$$

в якому на характер газообміну вказує верхній індекс: *forc* - примусовий, *free* - вільний.

Вимушена складова масової витрати задається співвідношеннями

$$G_{out}^{force} = \rho_m \cdot W_-, \quad G_{ii}^{force} = \rho_a \cdot W_+,$$

де W_- та W_+ - задана об'ємна витрата витяжної та припливної примусової вентиляції, відповідно, $m^3 \cdot c^{-1}$; ρ_a - густина припливного повітря, $kg \cdot m^{-3}$.

Вільний газообмін визначається за звичайною методикою (див., наприклад, [235]). Його витрата дорівнює сумі витрат крізь всі відкриті прорізи. Для кожного прорізу важливим є взаємне розташування нижнього і верхнього країв прорізу, крізь який йде газообмін, і так званої нейтральної зони. Для кожного прямокутного прорізу шириною b_o і висотою h_o в залежності від відрахованих

від підлоги висоти нейтральної зони h_n та висот нижнього h_- та верхнього h_+ ($h_+ = h_- + h_o$) країв прорізу існує три варіанти газообміну:

1) нейтральна зона вище прорізу (тобто $h_n > h_+$)

$$G_{out}^{free} = 0,$$

$$G_{ii}^{free} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot b_o \cdot \sqrt{g \cdot \rho_a \cdot (\rho_a - \rho_m)} \cdot \left[(h_n - h_-)^{3/2} - (h_n - h_+)^{3/2} \right]$$

2) нейтральна зона пересікає проріз (тобто $h_+ > h_n > h_-$)

$$G_{out}^{free} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot b_o \cdot \sqrt{g \cdot \rho_m \cdot (\rho_a - \rho_m)} \cdot (h_+ - h_n)^{3/2},$$

$$G_{ii}^{free} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot b_o \cdot \sqrt{g \cdot \rho_a \cdot (\rho_a - \rho_m)} \cdot (h_n - h_-)^{3/2};$$

3) нейтральна зона нижча за проріз (тобто $h_- > h_n$)

$$G_{out}^{free} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot b_o \cdot \sqrt{g \cdot \rho_m \cdot (\rho_a - \rho_m)} \cdot \left[(h_+ - h_n)^{3/2} - (h_- - h_n)^{3/2} \right],$$

$$G_{ii}^{free} = 0,$$

де g - прискорення вільного падіння, м с⁻².

Положення нейтральної зони визначається припущенням, що при наближенні середньої густини середовища у приміщенні ρ_m до характерної густини зовнішнього повітря ρ_a нейтральна зона по висоті приходить на середину приміщення. За таких обставин

$$h_n = \frac{H}{2} + \frac{p_a - p_m}{g \cdot (\rho_a - \rho_m)}, \quad (2.155)$$

де H - висота приміщення, p_a – характерна величина атмосферного тиску поза приміщенням.

Викладена модель стала складовою частиною моделей, які описують нагрівання тіл при пожежі у приміщенні. Створення таких моделей полягає у об'єднанні системи рівнянь моделі пожежі у приміщенні із відповідними системами рівнянь, що описують нагрівання захищених поверхонь тіл. При такому об'єднанні у других системах рівнянь необхідно замість відомої температури газового середовища T_f підставити температуру $T_m(\tau)$ із рівнянь моделі пожежі. Програми рішення таких об'єднаних систем були реалізовані у комп'ютерному середовищі "Mathlab". Тексти цих програм у випадку захисту термічно товстого та термічно тонкого тіла наведений у додатках Б та В.

На рис.2.11 представлено типовий варіант моделювання нагрівання поверхні термічно товстого тіла у випадку пожежі у приміщенні при наявності захисту поверхні та без нього. Наведено графіки залежності від часу температури середовища t_m °C, температура зовнішньої (гарячої) поверхні захисного шару, температури поверхні тіла без захисту та із захистом.

Основні параметри моделювання пожежі у приміщенні були наступні: розміри підлоги приміщення $10\text{ м} \times 6\text{ м}$, висота $H = 4\text{ м}$; параметри двох відкритих отворів $c_{o,1} = 0$, $h_{o,1} = 2$, $b_{o,1} = 1$, $c_{o,2} = 1$, $h_{o,2} = 1$, $b_{o,2} = 1$, де $c_{o,1}, c_{o,2}$ - відстань від підлоги до нижнього краю відповідного отвору, м, $h_{o,1}, h_{o,2}$ - висота відповідного отвору, м, $b_{o,1}, b_{o,2}$ - ширина відповідного отвору, м; об'ємні витрати примусової вентиляції $W_+ = W_- = 0\text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; початкова температура повітря у приміщенні $t_0 = 20^\circ\text{C}$, температура зовнішнього повітря $t_a = 20^\circ\text{C}$; параметри пального (будівлі 1-2 ступеня вогнестійкості: меблі і побутові вироби) $Q_l = 13800\text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$, $u_m = 0,0145\text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, $\eta_b = 0,9$, $L_{O_2} = 1,03$, $L_{CO_2} = 0,203$, $L_{CO} = 0,0022$, $L_{HCl} = 0,014$, $L_{H_2O} = 0,095$, загальна маса горючого

навантаження 1000 кг; параметри розкладення площі пожежі у ряд: $F_0 = 1, \text{ м}^2$, $F_1 = 0,01, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $F_2 = 0,0003, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$.

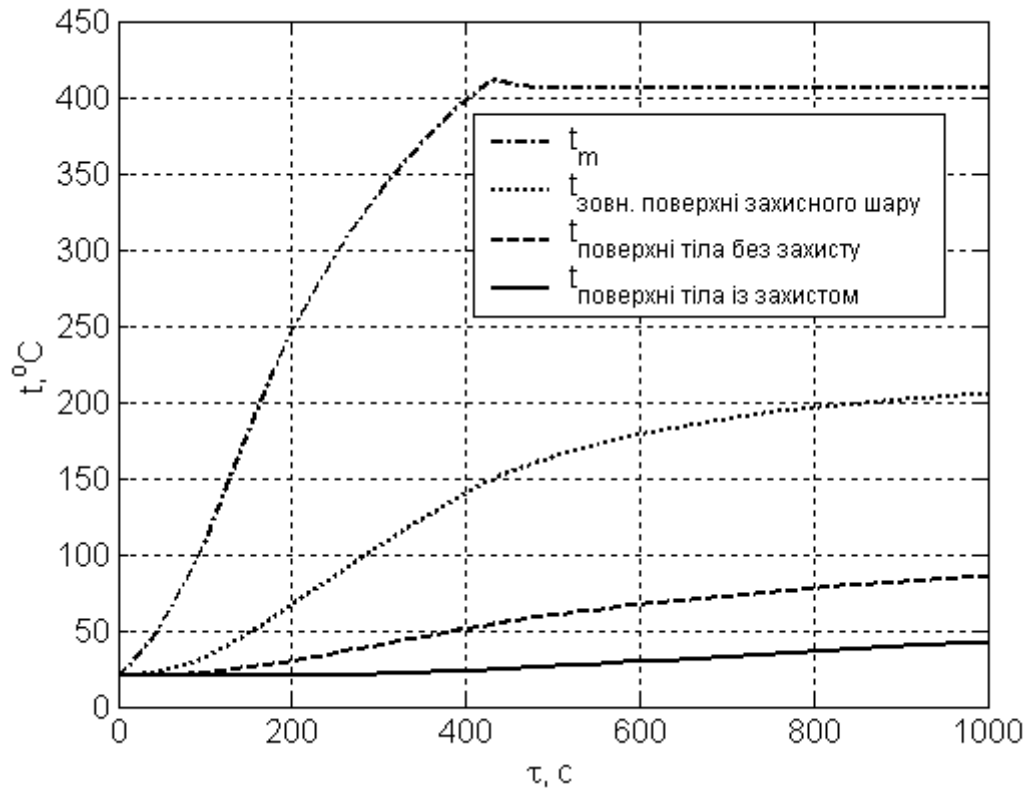


Рис. 2.11 Графіки залежності температур від часу в моделі прогріву поверхні захищеного та незахищеного термічно товстого тіла при пожежі у приміщенні

Параметри захисного шару мали значення $\rho = 500 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_p = 1 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda = 0,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $h = 0,02 \text{ м}$.

Параметри термічно товстого тіла мали величини $\rho_* = 2000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p*} = 1 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda_* = 1,0 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Порівняння двох нижніх ліній на рис. 2.11 наглядно демонструє захисну дію покриття. Вихід температури t_m на стаціонарний режим пов'язаний із досягненням площі горіння F_f свого максимального значення.

На рис.2.12 представлено типовий варіант моделювання нагрівання поверхні термічно тонкого тіла у випадку пожежі у приміщенні при наявності

захисту поверхні та без нього. Наведено графіки залежності від часу температури середовища t_m °C, температура зовнішньої (гарячої) поверхні захисного шару, температури поверхні термічно тонкого тіла без захисту та із захистом.

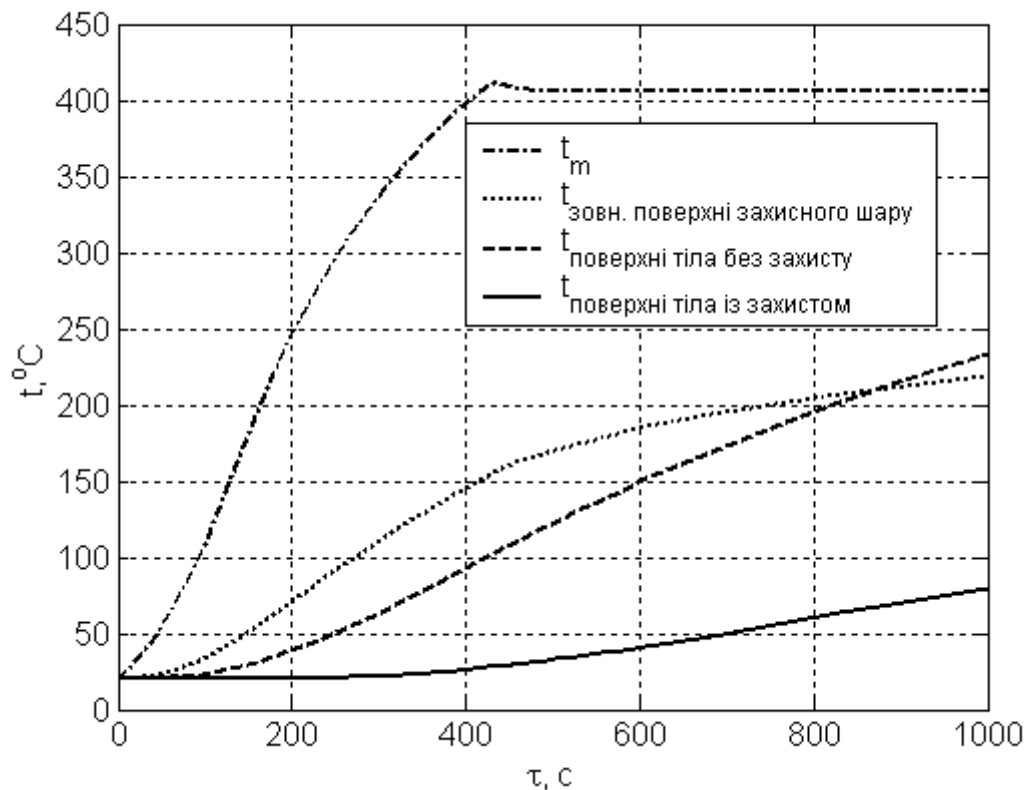


Рис. 2.12 Графіки залежності температур від часу в моделі прогріву поверхні захищеного та незахищеного термічно тонкого тіла при пожежі у приміщенні

Основні параметри моделювання пожежі у приміщенні були такі саме, як і попередньому випадку термічно товстого тіла. Такими ж були параметри захисного шару і властивостей речовини термічно тонкого тіла. Додалася товщина термічно тонкого тіла: $h_* = 0,005$ м.

Задача прогріву термічно тонкого тіла в загальному випадку вимагає завдання ще температури середовища з іншого (не гарячого) боку тіла та коефіцієнта тепловіддачі α_2 у цю сторону. У випадку на рис. 2.12 вибрано

варіант $\alpha_2 = 0$, який відповідає відсутності відводу тепла від термічно тонкого тіла, що призводить до максимально можливого його нагрівання.

Порівняння двох нижніх ліній на рис. 2.12 наглядно демонструє захисну дію покриття.

2.5 Висновки

1. Отримано аналітичне рішення задачі нестационарної теплопровідності по знаходженню температури поверхні термічно товстого тіла при нагріванні крізь плоский шар інертного теплопоглинаючого матеріалу при часах нагрівання, що значно перевищують характерний час прогріву захисного шару. Показано, що у цьому випадку нанесення захисного покриття відповідає збільшенню термічного опору тепловіддачі на величину термічного опору теплопровідності захисного шару.

2. Вперше 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 металевої поверхні неметалевим покриттям) та малих критеріях Біо, яке забезпечує одержання аналітичних прогностичних оцінок для критичних значень параметрів пожежної безпеки (межі вогнестійкості, рівня температури гарячого середовища), виходячи із критичного рівня температури поверхні захищеного тіла.

3. Вперше 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 убують з часом. Отримано формули розрахунку всіх доданків цього ряду і показано, що основною відмінністю даної задачі, від відомої ситуації однобічного 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.

4. Отримано аналітичне співвідношення залежності від часу температури ТТТ, при часах нагрівання, що значно перевищують характерний час прогріву захисного шару. У цьому випадку закони зміни температури ТТТ із нанесеним покриттям і без нього аналогічні. Формально, нанесення покриття приводить до збільшення термічного опору теплопередачі на величину термічного опору теплопровідності захисного шару і до відповідного росту теплоємності системи.

5. Проведено порівняння теплозахисної дії однорідного і випадкового-неоднорідного покриття. Показано, що урахування неоднорідності товщини покриття суттєве при сумісному виконанні двох умов: 1) не малій величині варіацій товщини покриття (σ) у порівнянні з її середнім значенням (a); 2) не малим значенням варіаційного критерію Біо ($Bi = \alpha \cdot \sigma / \lambda \geq 1$, де λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття, α - коефіцієнт тепловіддачі) задачі теплообміну покриття із середовищем.

6. Створені комп'ютерні програми, на базі яких проведено моделювання нагрівання термічно товстих і термічно тонких тіл, захищених довільним шаром поглинаючого покриття, в умовах пожежі у приміщенні, яка задається інтегральною моделлю.

РОЗДІЛ 3

ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ВІДБИВАЮЧИМИ ЕКРАНАМИ

У даному розділі буде досліджене питання про захист поверхонь тіл від теплового впливу пожежі за допомогою одного або декількох термічно тонких оптично непрозорих відбиваючих екранів з повітряними або теплопровідними оптично тонкими прошарками. Також буде розглянута модель теплозахисної дії напівважкого теплозахисного костюма в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні.

3.1. Моделювання захисної дії одиничного відбиваючого екрану відокремленого від поверхні захисту повітряним прошарком [42]

Надзвичайні ситуації, що є наслідком пожеж, часто, супроводжуються наявністю потерпілих, які не можуть самостійно евакуюватися з місця загоряння. Для евакуації таких потерпілих пожежорятувальні підрозділи оснащені відповідними засобами порятунку. Одним із недоліків наявних засобів порятунку є відсутність вогнезахисного покриття, що здатне знизити рівень впливу небезпечних факторів пожежі, таких як відкрите полум'я або тепловий потік, на тіло потерпілого. У даному пункті роботи побудована математична модель для розрахунку захисної дії теплоізоляційної накидки, призначеної для захисту потерпілого від впливу високотемпературних джерел енергії.

Питання використання вогнезахисних волокон і текстильних полотен теоретично досліджувалось багатьма вітчизняними й закордонними вченими [236-238]. Однак аналіз використання ефективних засобів захисту потерпілих в умовах пожежі від небезпечних теплових факторів, особливо в комбінації з існуючими засобами евакуації, відсутній. У зв'язку із цим розробка математичної моделі розрахунку захисної дії теплоізоляційної накидки, призначеної для захисту потерпілих в умовах пожежі, є актуальною. Дану накидку планується використати в комплексі із засобами евакуації потерпілих.

У роботі припускається, що накидка, що представляє собою спеціальну тканину, поводить себе подібно відбиваючому тепловому екрану, тобто є оптично непрозорим термічно тонким тілом. Стаючи на шляху поширення теплового випромінювання, накидка екранує прямий променистий тепловий потік від полум'я в напрямку тіла постраждалого (рис. 3.1).

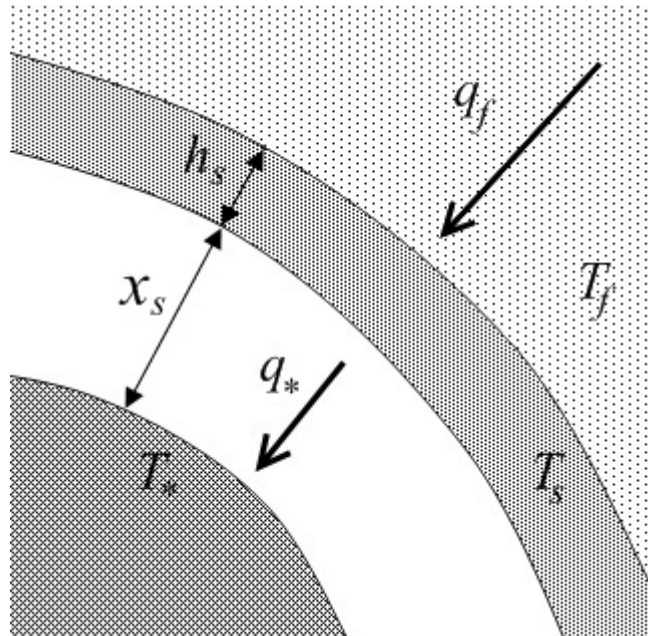


Рис. 3.1 Схема задачі термічного захисту тіла від теплового впливу полум'я

Під впливом цього потоку, накидка нагрівається, стаючи джерелом власного теплового випромінювання, яке далі все одне потрапляє на потерпілого. Безпека зберігається, якщо питомий результуючий потік тепла від накидки на тіло q_* потерпілого не перевищує відповідного критичного значення q_{cr} ($q_{cr} = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$), інакше говорячи, критерій безпеки має вигляд нерівності

$$q_* \leq q_{cr}. \quad (3.1)$$

Для визначення максимально припустимого значення температури накидки (перетворюючого вираз (3.1) у рівність) необхідно визначитися із залежністю питомого потоку q_* від температур. Внаслідок непрозорості накидки відсутня пряма залежність величини q_* від температури полум'я T_f . Величина q_* визначається температурами накидки T_s й тіла потерпілого T_* . Відразу відзначимо, що аж до настання неприйнятної ситуації зміна температури поверхні тіла потерпілого є незначною. У зв'язку із цим будемо вважати цю температуру постійною (приблизно рівною $T_* \approx 40 + 273$, К).

Тепловий потік від накидки до потерпілого має дві складові: радіаційну і конвекційну, тобто

$$q_* = q_{*,r} + q_{*,con}. \quad (3.2)$$

де $q_{*,r}$ і $q_{*,con}$ - відповідно величина щільності радіаційного і конвекційного теплових потоків, Вт·м⁻².

Величину цих теплових потоків будемо оцінювати за формулами, що описують передачу тепла у плоскому зазорі між двома поверхнями. Якщо середовище у зазорі оптично прозоре, то щільність радіаційної складової теплового потоку описує співвідношення [125]

$$q_r(T_1, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2) = \varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \sigma \cdot [T_1^4 - T_2^4], \quad (3.3)$$

де ε_1, T_1 і ε_2, T_2 – відповідно, ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності), абсолютні температури гарячої та холодної поверхонь теплообміну. В записі співвідношення (3.3) введена окрема позначка зведеного ступеня чорноти системи двох паралельних нескінчених площин

$$\varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = (\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1)^{-1}. \quad (3.4)$$

З використанням формули (3.3), щільність радіаційної складової теплового потоку $q_{*,r}$ приймає вигляд

$$q_{*,r} = q_r(T_s, T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*), \quad (3.5)$$

де ε_* й ε_s'' – ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) поверхні тіла потерпілого й внутрішньої поверхні накидки, відповідно.

Якщо конвекційний теплоперенос викликано вільною конвекцією повітря у плоскому зазорі, адекватну оцінку величини відповідного питомого теплового потоку дає вираз (дивись [125]):

$$q_{con}(T_1, T_2, x) = \varepsilon_{con} \cdot \frac{\lambda_a}{x} \cdot (T_1 - T_2), \quad (3.6)$$

де T_1 і T_2 – відповідно, абсолютні температури гарячої та холодної поверхонь теплообміну; x - характерна відстань (товщина зазору) між поверхнями теплообміну, м; λ_a – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт·м⁻¹·К⁻¹; індекс «a» тут і далі вказує на те, що відповідна характеристика повітря визначається при його середній температурі $T_a = \frac{T_1 + T_2}{2}$.

Множник ε_{con} відображає обумовлене конвекцією повітря зростання теплопереносу у порівнянні із звичайною теплопровідністю. Величина ε_{con} визначається із критеріального рівняння

$$\varepsilon_{con} = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)_a^{0,25}, \quad (3.7)$$

у якому вираз у дужках являє собою добуток критеріїв Грасгофа (Gr) і Прандтля (Pr)

$$(Gr \cdot Pr)_a = \frac{g \cdot (T' - T'') \cdot x^3}{T_a \cdot \nu_a^2} \cdot Pr_a, \quad (3.8)$$

де $g = 9,8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ – прискорення вільного падіння; ν_a – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Відзначимо, що наведені значення множника і ступені в критеріальному рівнянні (3.7) мають на увазі виконання обмеження

$$10^3 < (Gr \cdot Pr)_a < 10^{10}.$$

При $0 < (Gr \cdot Pr)_a < 10^3$ (згідно з [125]) $\epsilon_{con} = 1$.

У відповідності до сказаного конвекційний теплоперенос в зазорі між накидкою і тілом потерпілого дає вираз (дивись (3.6))

$$q_{*,con} = q_{con}(T_s, T_*, x_s), \quad (3.9)$$

де x_s – товщина зазору між накидкою й тілом постраждалого, м.

Залежності питомого потоку q_* від температури накладки $t_s, ^\circ\text{C}$, при різних значеннях ступеня чорноти її внутрішньої поверхні ϵ_s'' і різних значеннях відстані x_s між накидкою й тілом потерпілого представлені на рис. 3.2. Аналіз цих графіків, з урахуванням того, що радіаційна складова теплового потоку $q_{*,r}$ (див. формулу (3.5)) не залежить від x_s , а конвекційна складова $q_{*,con}$ (див. формулу (3.9)) не залежить від ϵ_s'' , показує, що в розглянутому інтервалі температур основний внесок у теплоперенос від накладки до тіла потерпілого при значеннях $\epsilon_s'' \sim 1$ вносить променистий механізм теплопередачі. При $\epsilon_s'' \ll 1$ домінує конвекційний механізм.

Для визначення граничної безпечної для об'єкта захисту температури накидки $t_{s,cr} = T_{s,cr} - 273,^{\circ}\text{C}$ необхідно вирішити граничний варіант рівняння (3.1)

$$q_*(T_{s,cr}, T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*, x_s) = q_{cr}. \quad (3.10)$$

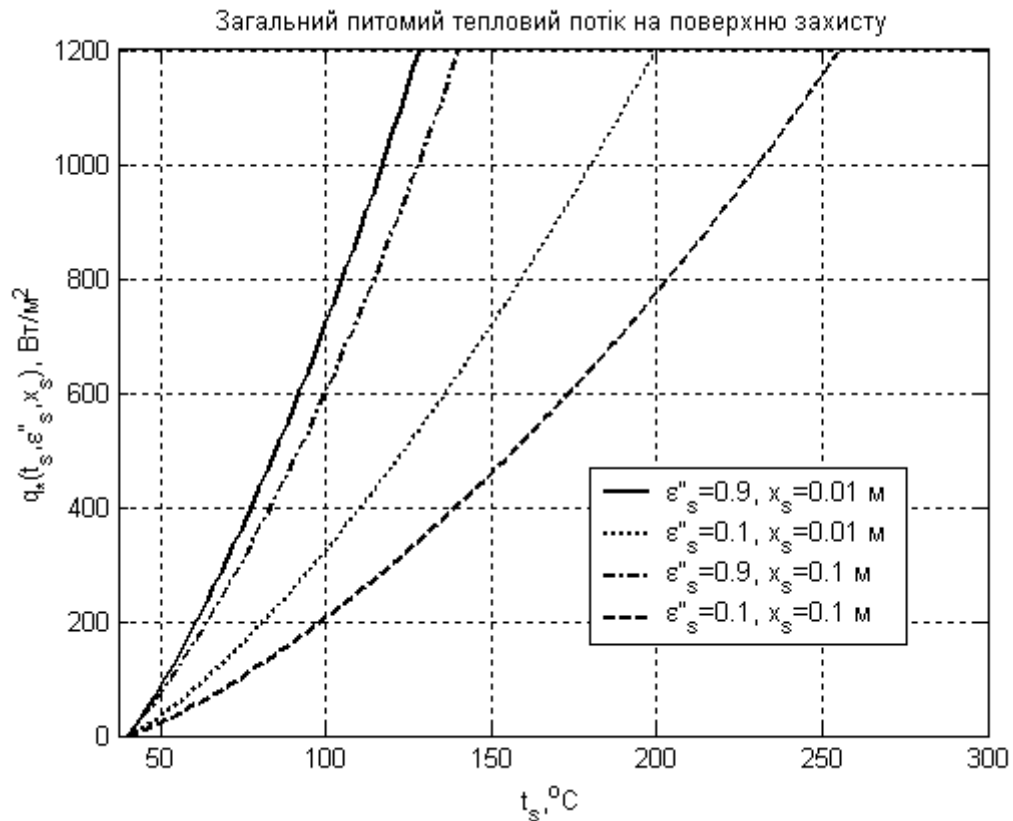


Рис. 3.2. Графіки залежності повного питомого потоку $q_*(t_s, \varepsilon_s'', \varepsilon_*, x_s)$, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$, між накидкою й тілом постраждалого від температури накидки $t_s, ^{\circ}\text{C}$, при $\varepsilon_* = 0,9$ і відповідних значеннях ступеня чорноти накидки ε_s'' і відстані від неї до тіла постраждалого x_s , м

Графіки рис. 3.2 показують, що при рівні критичного питомого потоку $q_{cr} \approx 1200 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ і $\varepsilon_* = 0,9$ критичні температури екрануючої накидки дорівнює $t_{s,cr} = 130^{\circ}\text{C}$ при $\varepsilon_s'' = 0,9$ і $x_s = 0,01$, дорівнює $t_{s,cr} = 140^{\circ}\text{C}$ при $\varepsilon_s'' = 0,9$ і

$x_s = 0,1$ м, дорівнює $t_{s,cr} = 200^\circ\text{C}$ при $\varepsilon_s'' = 0,1$ і $x_s = 0,01$ м, дорівнює $t_{s,cr} = 255^\circ\text{C}$ при $\varepsilon_s'' = 0,1$ і $x_s = 0,1$ м.

Отримані значення величини $t_{s,cr}$ вказують на необхідність урахувати не тільки теплозахисну дію накладки, але й здатність її матеріалу без руйнування переносити досить високу власну температуру. При низьких припустимих значеннях температур матеріалу накладки $t_{ss,cr}$ в якості $t_{s,cr}$ необхідно приймати $t_{ss,cr}$.

Для визначення часу захисної дії накладки (часу її нагрівання до температури $T_{s,cr} = t_{s,cr} + 273$, К) розглянемо рівняння теплового балансу

$$\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_s}{d\tau} = q_f - q_*, \quad (3.11)$$

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

$$q_f = q_{f,r}(T_f, T_s, \varepsilon_f, \varepsilon_s') \equiv \varepsilon_f \cdot \varepsilon_s' \cdot \sigma \cdot [T_f^4 - T_s^4], \quad (3.12)$$

де ε_f й ε_s' – ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) полум'я і зовнішньої поверхні накладки, відповідно; T_f – абсолютна температура полум'я, К. У зв'язку з тим, що максимально можлива безпечна абсолютна температура накладки $T_{s,cr}$ в рази менше температури полум'я T_f , залежність потоку q_f від температури накладки можна спростити, взявши

$$q_f = \varepsilon_f \cdot \varepsilon_s' \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_{s,0}^4), \quad (3.13)$$

де $T_{s,0} \equiv T_s(0)$ - абсолютна початкова температура накидки, К. Тут і далі у розділі приймемо $T_{s,0} \approx T_*$.

З такою же точністю в рівнянні (3.10) можна знехтувати тепловим потоком від накидки до потерпілого q_* в порівнянні з потоком від полум'я до накидки q_f . У результаті рівняння (3.11) спроститься і з урахуванням формули (3.13) прийме вигляд

$$\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_{s, \text{simple}}}{d\tau} = \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_{s,0}^4). \quad (3.14)$$

де $T_{s, \text{simple}}(\tau)$ - абсолютна температура накидки, отримана при описаному вище спрощені рівнянь, К.

Інтегруючи рівняння (3.14), отримуємо залежність

$$T_{s, \text{simple}}(\tau) = T_{s,0} + \gamma \cdot \tau, \text{ К}, \quad (3.15)$$

де введено допоміжний параметр γ , який є швидкістю зміни температури у часі. Він дорівнює

$$\gamma \equiv \frac{\varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_{s,0}^4)}{\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot h_s}, \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (3.16)$$

Використовуючи формулу (3.15) можна оцінити час нагрівання накидки τ_{cr} до критичної температури $T_{s,cr}$. Він дорівнює

$$\tau_{cr} = \gamma^{-1} \cdot \Delta T_{s,cr}, \quad (3.17)$$

де $\Delta T_{s,cr} = T_{s,cr} - T_{s,0}$.

Співвідношення (3.17), (3.16) (за умови знаходження з рівняння (3.10) температур $T_{s,cr}$) рішають задачу знаходження часу захисної дії накладки τ_{cr} .

Якщо мати на меті збільшення часу τ_{cr} слід враховувати, що у потрібному напрямку діє зменшення параметру γ (3.16) і збільшення $T_{s,cr}$. Зменшення γ можливо як при збільшенні теплоємності одиниці площі покриття $c_p'' = \rho_s \cdot c_{p,s} \cdot h_s$, так і при зменшенні відносної випромінювальної здатності зовнішньої поверхні покриття ε_s' . Шлях збільшення c_p'' за рахунок збільшення величини $\rho_s \cdot h_s$ є тупиковим, бо тоді збільшується вага покриття. Єдиною можливістю є пошук підходящого матеріалу. Зменшення ε_s' можливо за рахунок додаткового напилювання відповідного металу.

На збільшення величини $T_{s,cr}$ (при фіксованому значенні q_{cr}) згідно із рівнянням (3.10) (із врахуванням залежностей (3.5) і (3.9)) спрямовано зменшення ступенів чорноти ε_s'' і ε_* та збільшення товщини прошарку x_s . Відмітимо, що вплив величин ε_s'' і ε_* на величину $T_{s,cr}$ є суттєвим, бо величина променистого потоку у прошарку майже лінійно залежить від ε_s'' і ε_* . Залежність $T_{s,cr}$ від x_s є слабкою, бо згідно із співвідношеннями (3.6) - (3.8) конвекційна складова загального теплового потоку на поверхню захисту пропорційна $(x_s)^{-0,25}$.

Коректність проведених спрощень наочно ілюструють графіки, наведені на рисунках 3.3 і 3.4, на яких зображено залежність від часу температури накладки і питомі теплові потоки у описі без спрощень рівняння (3.11) ($t_{s,real}$) і за максимальним спрощенням, якому відповідає рівняння (3.14) ($t_{s,simple}$). Дані графіки побудовані при $\rho_s = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p,s} = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$, $h_s = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon_s' = \varepsilon_s'' = 0,2$, $\varepsilon_* = 0,9$, $T_f = 1000 + 273 \text{ К}$, $x_s = 0,01 \text{ м}$ і $x_s = 0,1 \text{ м}$. З цих графіків витікає, що до $\tau = 50 \text{ с}$ описи нагрівання накладки за точною і спрощеною моделлю візуально практично не різняться. У випадку

$q_{cr} \approx 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ і $x_s = 0,01$ критична температура екрануючої накладки дорівнює $t_{s,cr} = 182^\circ\text{C}$ (вона досягається по точній моделі за $\tau_{cr} = 37$ с, по спрощеній моделі за $\tau_{cr} = 36$ с). У випадку $q_{cr} \approx 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ і $x_s = 0,1$ критична температура екрануючої накладки дорівнює $t_{s,cr} = 219^\circ\text{C}$ (вона досягається по точній моделі за $\tau_{cr} = 47$ с, по спрощеній моделі за $\tau_{cr} = 45$ с).

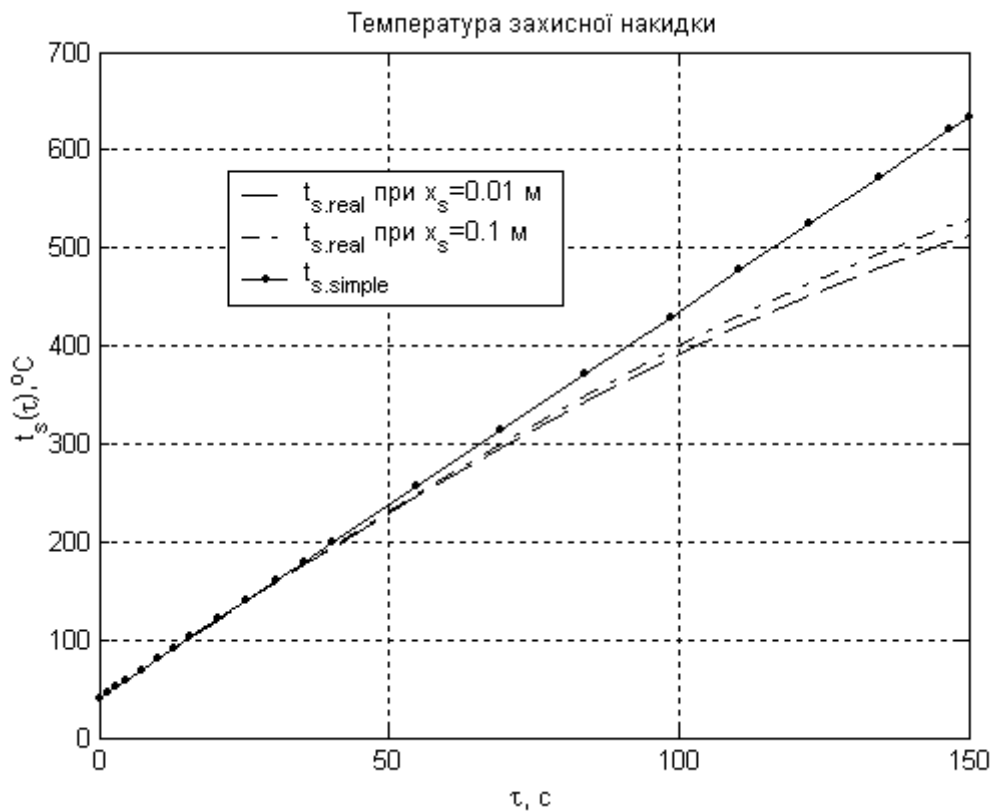


Рис. 3.3 Графіки залежності температури захисної накладки t_s від часу τ теплового впливу у випадках спрощеного (*simple*) і не спрощеного (*real*) описів

Відзначимо, що в ході наведеного аналізу припускалося, що зміна температури накладки в межах її товщини нехтовно мала. Дана ситуація реалізується при малості критерію Біо Bi задачі теплообміну між накладкою й полум'ям

$$Bi = \frac{\alpha_{rad} \cdot h_s}{\lambda_s} \ll 1,$$

де λ_s – коефіцієнт теплопровідності матеріалу накладки, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; α_{rad} – коефіцієнт радіаційної тепловіддачі від полум'я до поверхні накладки, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Останній коефіцієнт, відповідно до залежності (3.10), дорівнює

$$\alpha_{rad} = \frac{\partial q_f}{\partial T_f} = 4 \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot T_f^3.$$

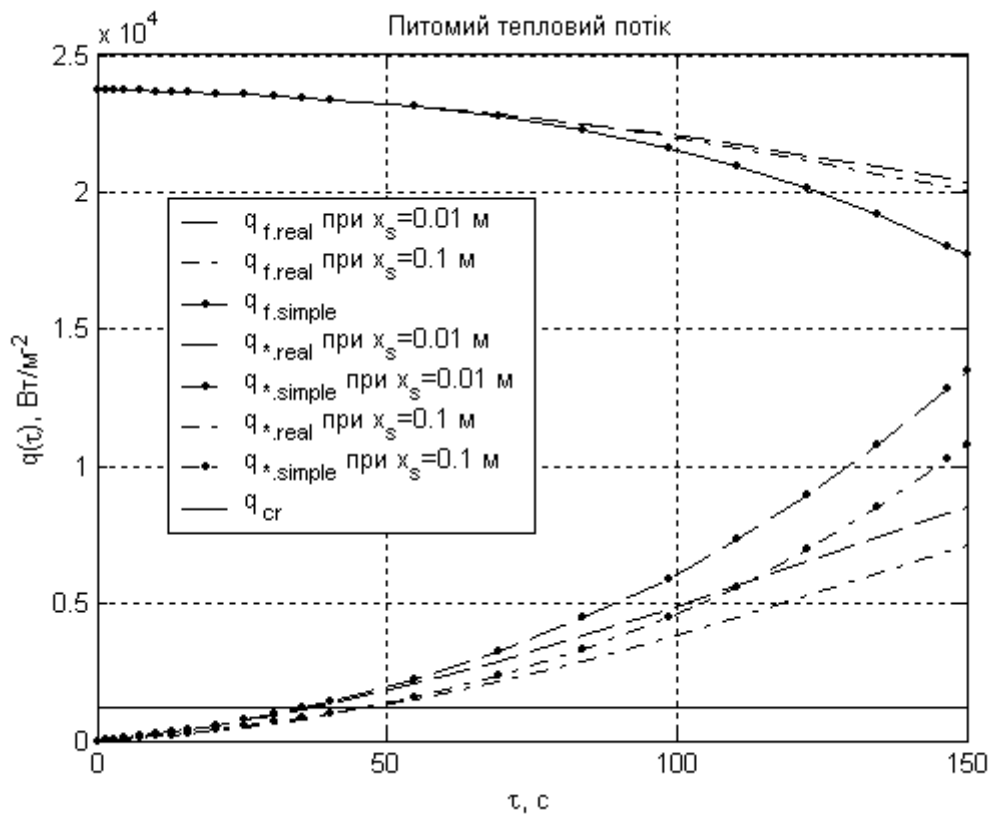


Рис. 3.4 Графіки залежності питомих теплових потоків на накидку q_f і на об'єкт q_* в залежності від часу τ теплового впливу у випадках спрощеного (*simple*) і не спрощеного (*real*) описів

Таким чином, приведений опис є коректним при виконанні умови

$$Bi = \frac{4 \cdot \varepsilon_f \cdot \varepsilon'_s \cdot \sigma \cdot T_f^3 \cdot h_s}{\lambda_s} \ll 1. \quad (3.18)$$

Нагадаємо, що в описі також задіяне додаткове припущення про оптичну непрозорість накладки, що не дозволяє робити накидку занадто тонкою.

Наведемо чисельну оцінку. При $\rho_s = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p,s} = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$, $h_s = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon'_s = 0,2$, $T_f = 1000 + 273 \text{ К}$, $\lambda_s = 0,8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ з формули (3.16) отримуємо $\gamma = 4,0 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$. Якщо далі скористатися значенням $t_{s,cr} = 182^\circ\text{C}$ (яке відповідає $x_s = 0,01 \text{ м}$), то у відповідності до співвідношення (3.17) $\tau_{cr} = (182 - 40)/4,0 \approx 36 \text{ с}$. Якщо взяти $t_{s,cr} = 219^\circ\text{C}$ (яке відповідає $x_s = 0,1 \text{ м}$), то із співвідношення (3.17) витікає $\tau_{cr} = (219 - 40)/4,0 \approx 45 \text{ с}$. Параметр Біо (см. (3.18)) при цьому приймає допустиму величину $Bi = 0,3$.

Зі співвідношень (3.16) і (3.18) витікає, що з вільних параметрів цих формул в однаковому напрямку (убік зменшення і γ і Bi) діє тільки ступінь чорноти зовнішньої поверхні накладки ε'_s , який необхідно робити мінімальним. Можливим способом реалізації даної властивості є нанесення на зовнішню поверхню накладки відповідного металізованого покриття.

У подальших теоретичних дослідженнях захисної дії накладки напрошуються два варіанти: 1) не тонкої накладки (для якої не виконується умова (3.17)); 2) двох - і більше шарової накладки, що діє, як багат шаровий екран. Перший варіант з теоретичного боку виводить на задачі попереднього розділу, а з практичного боку мало прийнятний із-за збільшення ваги системи. Другий варіант буде розглядатися у наступних пунктах цього розділу.

3.2 Моделювання захисної дії двошарового відбиваючого екрану із поділяючими повітряними прошарками

У попередньому пункті даного розділу було показано, що час захисної дії одношарового покриття, яке діє як відбиваючий екран, визначається часом

нагрівання цього екрану до небезпечного рівня температури $t_{s,cr}$. Збільшення часу нагрівання за рахунок збільшення товщини екрану обмежено тою обставиною, що пропорційно товщині наростає вага екрану, що є негативним чинником. Одним із запропонованих рішень проблеми є застосування двошарового екрану.

У даному пункті дисертації досліджується розглянута у роботі [43] теплозахисна дія двошарового екрану, що складається із двох оптично непрозорих, але термічно тонких шарів, розділених газовим (повітряним) прошарком.

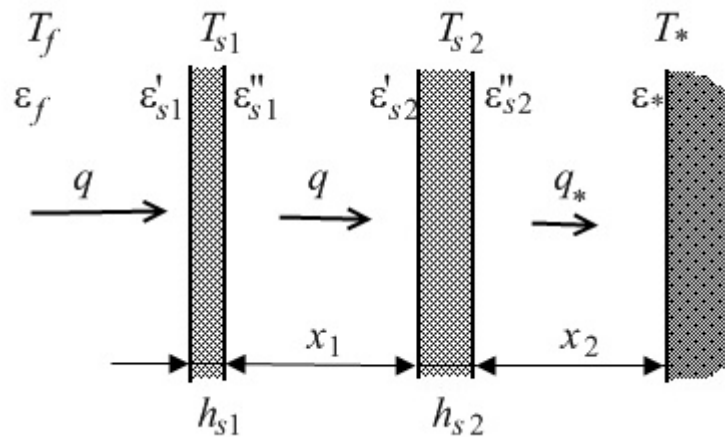


Рис. 3.5 Схема задачі термічного захисту тіла за допомогою двошарового екрану

Схема розташування екрану зображена на рис.3.5, на якому об'єктам відповідають індекси: « f » - полум'я; « $s1$ » - гарячий шар; « $s2$ » - холодний шар; « $*$ » - підзахисна поверхня. Використовувані величини позначені: T_{s1} і T_{s2} - абсолютна температура відповідних шарів, К; h_{s1} і h_{s2} - товщина відповідного шару, м; x_1 і x_2 - товщина відповідного повітряного прошарку, м; ϵ'_{s1} , ϵ''_{s1} і ϵ'_{s2} , ϵ''_{s2} - ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) зовнішньої (') і внутрішньої (") поверхонь першого і другого шарів; ϵ_f - ступінь чорноти полум'я; ϵ_* - ступінь чорноти підзахисної поверхні.

При порівняннях двошарових екранів з одношаровими припускається, що товщина відбиваючого шару одношарового екрану h_{sum} дорівнює сумі товщин шарів двошарового екрану, тобто $h_{sum} = h_{s1} + h_{s2}$.

Як і у роботі [42] критерій безпеки має вид (3.1). Припускається, що ситуація безпечна, якщо питомий результуючий потік тепла від нагрітого екрану до тіла потерпілого q_* не перевищує відповідного критичного значення q_{cr} ($q_{cr} = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). Даний критерій накладає вимогу на температуру t_{s2} ($^{\circ}\text{C}$) внутрішнього шару екрана: інакше кажучи, критерій безпеки має вигляд:

$$t_{s2} \leq t_{s,cr} \quad (3.19)$$

де $t_{s,cr}$ – критична температура внутрішнього шару екрана, що відповідає критичному значенню q_{cr} . У роботі [42] показано (дивись також рис. 3.2), що залежно від значень ступенів чорноти об'єктів і відстаней між ними при $q_{cr} = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, величина $t_{s,cr}$ лежить у діапазоні від 130 до 255 $^{\circ}\text{C}$.

Нагадаємо, що аж до настання неприйнятної ситуації зміна температури поверхні підзахисного тіла є незначною. У зв'язку із цим будемо вважати цю температуру постійною (приблизно рівною $T_* \approx 40 + 273, \text{ K}$).

Питомі теплові потоки (q) між шарами екрану і від екрану до поверхні захисту мають дві складові - радіаційну (q_r) і конвекційну (q_{con}):

$$q = q_r + q_{con} \quad (3.20)$$

Внесок радіаційної і конвекційної складової в результуючий тепловий потік оцінюється за формулами (3.3) і (3.6) із підстановкою відповідних параметрів.

Для визначення часу захисної дії екрану (часу нагрівання його внутрішнього шару до температури $T_{s,cr} = t_{s,cr} + 273, \text{ K}$) розглядається систему

рівнянь теплового балансу, яка є системою звичайних диференціальних рівнянь щодо часу τ :

$$\rho_{s1} \cdot c_{ps1} \cdot h_{s1} \cdot \frac{dT_{s1}}{d\tau} = q_{f.r}(T_f, T_{s1}, \varepsilon_f, \varepsilon'_{s1}) - q_r(T_{s1}, T_{s2}, \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) - q_{con}(T_{s1}, T_{s2}, x_1), \quad (3.21)$$

$$\rho_{s2} \cdot c_{ps2} \cdot h_{s2} \cdot \frac{dT_{s2}}{d\tau} = q_r(T_{s1}, T_{s2}, \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) + q_{con}(T_{s1}, T_{s2}, x_1) - q_r(T_{s2}, T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*) - q_{con}(T_{s2}, T_*, x_2), \quad (3.22)$$

де ρ_{s1} , ρ_{s2} , c_{ps1} , c_{ps2} - густини і питомі масові ізобарні теплоємності матеріалу відповідних шарів екрану; всі інші параметри описані вище: так величина $q_{f.r}(T_f, T_1, \varepsilon_f, \varepsilon'_1)$, що задається формулою (3.12), є щільністю променистого теплового потоку від гарячого середовища на першу екрануючу поверхню.

Відзначимо, що у випадку одношарового екрану система з рівнянь (3.21), (3.22) замінюється на рівняння (3.11), яке у позначках даного пункту має вигляд

$$\rho_{sum} \cdot c_{psum} \cdot h_{sum} \cdot \frac{dT_{sum}}{d\tau} = q_{f.r}(T_f, T_{sum}, \varepsilon_f, \varepsilon'_{sum}) - q_r(T_{sum}, T_*, \varepsilon''_{sum}, \varepsilon_*) - q_c(T_{sum}, T_*, x_{sum}), \quad (3.23)$$

де індексом «sum» позначені відповідні характеристики одношарового екрана.

Система рівнянь (3.21), (3.22) є математичною моделлю, що описує захисну дію двошарового екрану. Як початкова умова до неї бралася рівність початкових значень температур шарів температурі поверхні захисту: $T_{s1}(0) = T_*$, $T_{s2}(0) = T_*$.

Дана система, а також не залежне від неї рівняння (3.23), вирішувалися чисельно з використанням середовища Matlab. Тексти написаних автором даної дисертації комп'ютерних програм, які відносяться до підрозділів 3.2 - 3.6 наведені у додатку Г.

Результати одного з типових випадків представлені на рис. 3.6. та рис.3.7.

У варіанті, що демонструється на ньому, прийнято, що

$$\rho_{s1} = \rho_{s2} = \rho_{sum} = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad c_{ps1} = c_{ps2} = c_{psum} = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1},$$

$$h_{s1} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad h_{s2} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad h_{sum} = h_{s1} + h_{s2} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad x_1 = 0,01 \text{ м}, \quad x_2 = 0,05 \text{ м},$$

$$x_{sum} = x_1 + x_2 = 0,06 \text{ м}, \quad \varepsilon_f = 0,8, \quad \varepsilon'_{s1} = \varepsilon''_{s1} = \varepsilon'_{s2} = \varepsilon''_{s2} = 0,2, \quad \varepsilon_* = 0,9,$$

$$T_f = 1000 + 273 \text{ К}, \quad T_* = 40 + 273 \text{ К}.$$

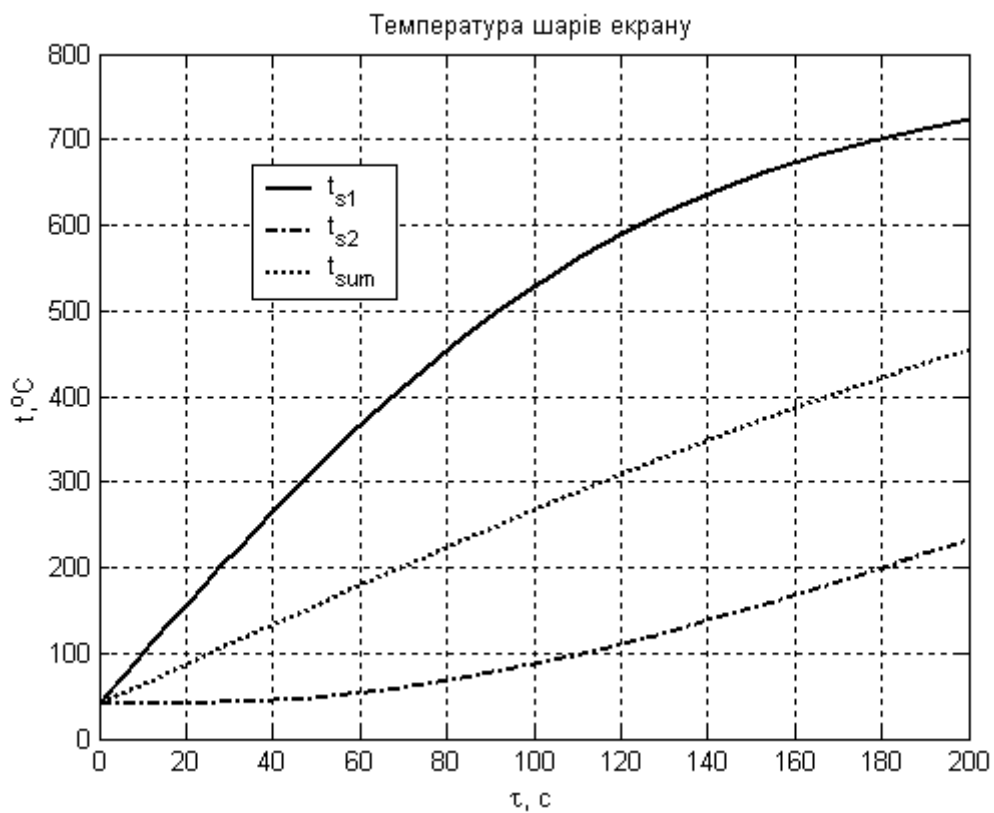


Рис. 3.6 Графіки залежності температур ($t_{s1}(\tau)$ і $t_{s2}(\tau)$) шарів двошарового екрану від часу захисної дії τ . Кривими зображено графік часової залежності температури (t_{sum}) одношарового екрану, що має сумарні товщини відбиваючого шару та повітряного прошарку: $h_{sum} = h_{s1} + h_{s2}$,

$$x_{sum} = x_1 + x_2$$

Порівняння температурних кривих $t_{s1}(\tau)$ і $t_{s2}(\tau)$ рис. 3.6 показує, що двошаровий екран може у рази збільшувати час захисної дії. Більш прямо цю

обставину демонструє рис. 3.7, з якого витікає, час захисної дії двошарового екрану складає $\tau_{cr} \approx 186$ с, а час захисної дії одношарового екрану сумарної товщини $\tau_{cr} \approx 75$ с.

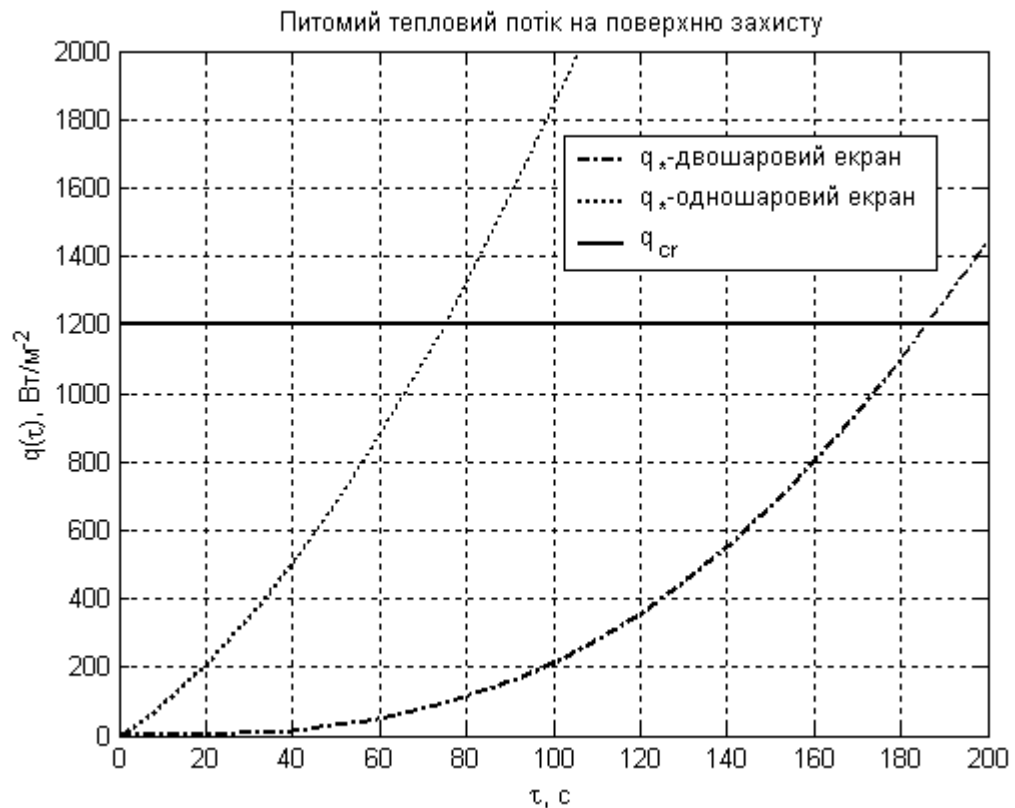


Рис. 3.7 Графіки залежності результуючого питомого теплового потоку $q_*(\tau)$, що потрапляє на захищену поверхню, від часу захисної дії τ . Крапками зображено графік, що відповідає одношаровому екрану, що має сумарні товщини відбиваючого шару та повітряного прошарку: $h_{sum} = h_{s1} + h_{s2}$,

$$\chi_{sum} = \chi_1 + \chi_2$$

Крива $t_{s1}(\tau)$ показує, що для реалізації захисної дії матеріал зовнішнього шару екрану повинен витримувати температуру в декілька сотень градусів Цельсія. Звідси з'являється додаткова вимога, що при визначенні часу захисної дії двошарового екрану необхідно крім умови (3.19) відслідковувати виконання умови

$$t_{s1} \leq t_{s,cr,1}, \quad (3.24)$$

де $t_{s,cr,1}$ - максимальна температура, до досягнення якої матеріал зовнішнього шару екрану зберігає захисні властивості.

Зміна співвідношення товщини шарів екрану (при незмінності величини $h_{sum} = h_{s1} + h_{s2}$) протилежним образом впливає на зміну захисних часів, обумовлених співвідношеннями (3.19) і (3.24). Дана обставина вказує на необхідність вирішувати задачу по оптимізації співвідношення товщини шарів екрану при незмінній сумарній товщині. Це питання буде розглянуто у наступному підрозділі даного розділу.

Відмітимо ще одну обставину: розглянута система (3.21), (3.22) має прийнятне приблизне аналітичне рішення. Справа у тому, що на початковій стадії нагрівання (і тільки на ній) результуючий тепловий потік, що падає на кожен із відбиваючих випромінювання шарів, значно перевищує результуючий потік, що уходить на наступний шар. Це дозволяє, знехтувавши відповідними доданками, спростити систему рівнянь (3.21), (3.22). Результат має вигляд

$$\rho_{s1} \cdot c_{ps1} \cdot h_{s1} \cdot \frac{dT_{s1, simple}}{d\tau} = q_{f,r}(T_f, T_*, \epsilon_f, \epsilon'_{s1}), \quad (3.25)$$

$$\rho_{s2} \cdot c_{ps2} \cdot h_{s2} \cdot \frac{dT_{s2, simple}}{d\tau} = q_r(T_{s1, simple}, T_*, \epsilon''_{s1}, \epsilon'_{s2}) + q_{con}(T_{s1, simple}, T_*, x_1), \quad (3.26)$$

де $T_{s1, simple}(\tau)$, $T_{s2, simple}(\tau)$ - абсолютні температури відповідних шарів екрану, отримані при описаному вище спрощенні рівнянь, К.

Відмітимо, що визначаючий умову безпеки питомий потік тепла від другого шару на поверхню захисту в даному наближенні розраховується за формулою

$$q_{*, simple}(\tau) = q_r(T_{s2, simple}(\tau), T_*, \epsilon''_{s2}, \epsilon_*) + q_{con}(T_{s2, simple}(\tau), T_*, x_2). \quad (3.27)$$

Нагадаємо, що такий самий питомий потік без спрощень розраховується за аналогічною формулою, в якій замість спрощених стають не спрощені залежності:

$$q_*(\tau) = q_r(T_{s2}(\tau), T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*) + q_{con}(T_{s2}(\tau), T_*, x_2). \quad (3.28)$$

Рішення рівняння (3.25), згідно із співвідношенням (3.12) має вигляд

$$T_{s1.simple}(\tau) = T_* + \int_0^\tau \frac{q_{f.r}(T_f, T_*, \varepsilon_f, \varepsilon'_{s1})}{\rho_{s1} \cdot c_{p.s1} \cdot h_{s1}} d\tau', \text{ К}, \quad (3.29)$$

що після взяття інтегралу (3.29) дає вираз

$$T_{s1.simple}(\tau) = T_* + \gamma_1 \cdot \tau, \text{ К}, \quad (3.30)$$

де

$$\gamma_1 \equiv \frac{\varepsilon_f \cdot \varepsilon'_{s1} \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_*^4)}{\rho_{s1} \cdot c_{p.s1} \cdot h_{s1}}, \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (3.31)$$

(Нагадаємо, що вважається, що початкове значення абсолютної температури шарів екрану співпадає із абсолютною температурою поверхні захисту T_* , К.)

Рішення рівняння (3.26), згідно із співвідношеннями (3.5), (3.6), має вигляд

$$T_{s2.simple}(\tau) = T_* + \int_0^\tau \frac{q_r(T_{s1.simple}(\tau'), T_*, \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) + q_{con}(T_{s1.simple}(\tau'), T_*, x_1)}{\rho_{s2} \cdot c_{p.s2} \cdot h_{s2}} d\tau', \text{ К}. \quad (3.32)$$

де у підінтегральні функції залежність $T_{s1.simple}(\tau)$ підставляється у вигляді (3.29).

Перший із підінтегральних доданків (q_r) формули (3.32), згідно із визначенням (3.3) зводиться до поліному по цілим (від першої до четвертої) ступеням τ . Якщо у другому підінтегральному доданку (q_{con}) формули (3.32) значення коефіцієнтів в'язкості і об'ємного розширення повітря взяти при фіксованій температурі (наприклад, 200°C), то інтегрування цього доданку (згідно із формулами (3.6) - (3.8)) зведеться до інтегрування $\tau^{1,25}$.

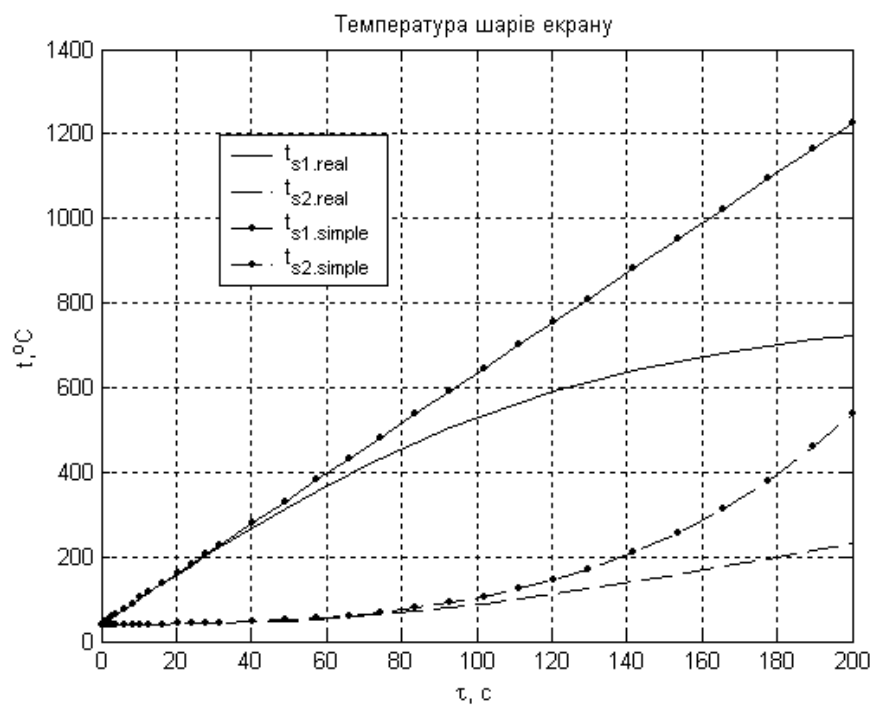


Рис. 3.8 Графіки залежності температур зовнішнього t_{s1} та внутрішнього t_{s2} шарів двошарової захисної накладки від часу τ теплового впливу у випадках спрощеного (*simple*) і не спрощеного (*real*) описів

Ступінь близькості результатів не спрощеної і спрощеної моделей наочно показують графіки, зображені на рис. 3.8, рис. 3.9 та рис. 3.10. При їх побудові використовувались чисельні значення параметрів двошарової накладки такі ж, як і при побудові залежностей рис. 3.6, рис. 3.7.

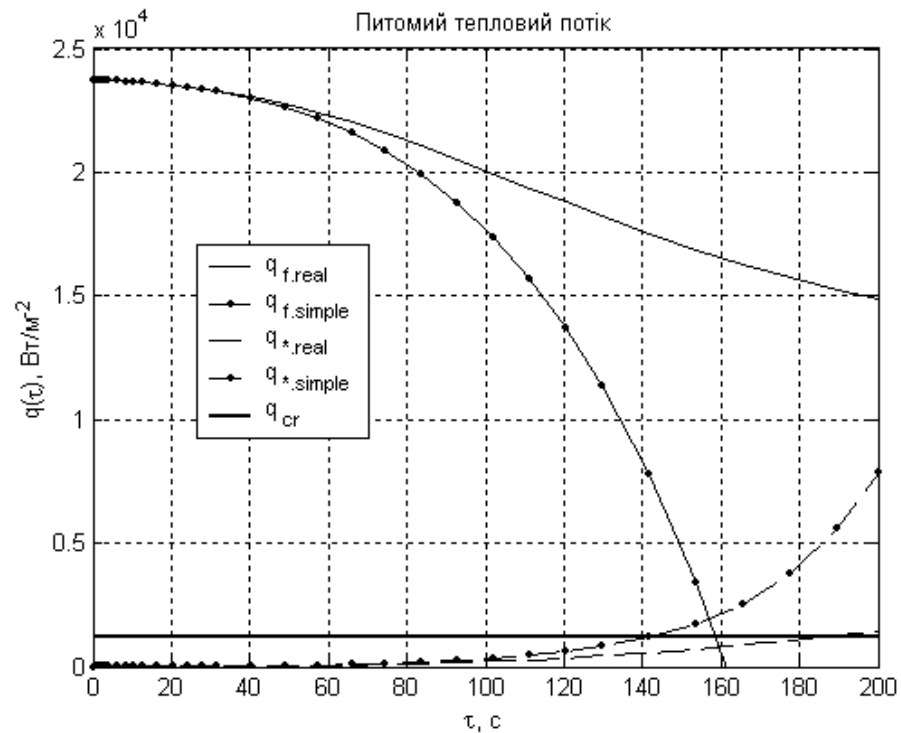


Рис. 3.9 Графіки залежності питомих теплових потоків на зовнішній відбиваючий шар екрану (q_f) та на об'єкт захисту (q_*) в залежності від часу τ теплового впливу у випадках спрощеного (*simple*) і не спрощеного (*real*) описів

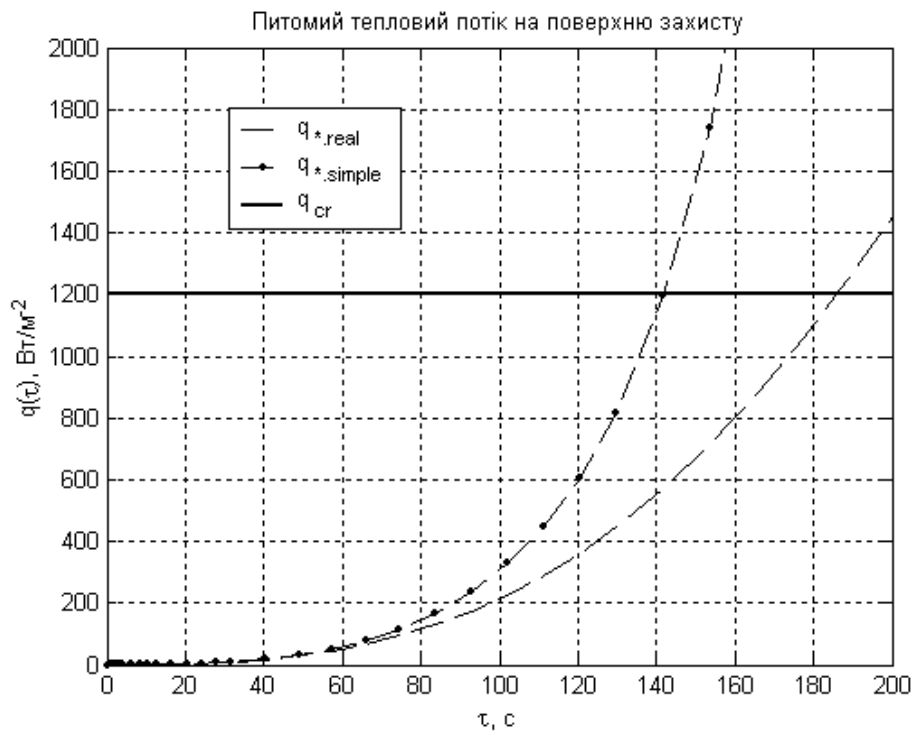


Рис. 3.10 Збільшений фрагмент графіків з рис. 3.9

3.3 Вибір оптимального співвідношення товщини шарів двошарового вогнезахисного екрану із повітряними прошарками

У попередньому пункті розділу було показано, що двошаровий екран, сумарна товщина шарів якого не перевищує товщини аналогічного одношарового екрану, може в рази збільшити час вогнезахисної дії.

У зв'язку з тим, що під час теплозахисту зовнішній шар екрану нагрівається значно сильніше внутрішнього шару, існує дві критичні температури - температура втрати захисних властивостей зовнішнім шаром $t_{s,cr.1}$ і температура внутрішнього шару $t_{s,cr.2}$, при якому він небезпечний для об'єкта захисту. Швидкості зростання температури шарів екрану залежать від товщини цих шарів. У зв'язку зі сказаним, існує оптимальне співвідношення товщини шарів двошарового екрану, яке забезпечує максимальний час вогнезахисту при фіксованій сумарній товщині шарів й обмеженнях на температури внутрішнього й зовнішнього шару. Пошуку даного оптимуму присвячений даний пункт розділу. Ця задача вперше розглядалася у роботі [45].

Взята за основу математична модель нагрівання двошарового екрану викладена в пункті 3.2. Просторова схема задачі зображена на рис. 3.5.

Необхідною умовою безпеки є вимога, щоб питомий результуючий потік тепла від екрану, що нагрівся, до тіла потерпілого не перевищував відповідного критичного значення q_{cr} ($q_{cr} = 1200 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$). Даний критерій накладає обмеження на температуру $t_2(^{\circ}\text{C})$ внутрішнього шару екрану. Відповідна умова безпеки має вигляд (3.19). Для спільності позначень перепишемо її у вигляді

$$t_{s2} \leq t_{s,cr.2}, \quad (3.33)$$

де $t_{s,cr.2} = t_{s,cr}$ – критичне значення температури внутрішнього шару екрану, що відповідає критичному значенню q_{cr} . Нагадаємо, що залежно від значень

ступенів чорності об'єктів і відстаней між ними, величина $t_{s.cr.2}$ лежить у діапазоні від 130 до 255°C.

Для забезпечення безпеки крім умови (3.33) необхідно виконувати умову (3.24).

Загальним часом захисної дії є час, у перебігу якого одночасно виконуються обидві умови ((3.24) і (3.33)). У зв'язку із цим тривалість інтервалу вогнезахисту $\tau_{cr.tot}$ дорівнює

$$\tau_{cr.tot} = \min[\tau_{cr.1}(h_{s1}, t_{s.cr.1}), \tau_{cr.2}(h_{s2}, t_{s.cr.2})] - \quad (3.34)$$

мінімальному із часів нагрівання шарів екрану до відповідних критичних температур. Відповідно до умов (3.24) і (3.33) часи $\tau_{cr.1}$ і $\tau_{cr.2}$ є рішеннями рівнянь

$$t_{s1}(\tau, h_{s1}) = t_{s.cr.1} \quad (3.35)$$

і

$$t_{s2}(\tau, h_{s2}) = t_{s.cr.2}. \quad (3.36)$$

При фіксації сумарної товщини шарів ($h_{sum} = h_{s1} + h_{s2} = \text{const}$) часи $\tau_{cr.1}$ й $\tau_{cr.2}$, а разом з ними й час (3.34) стають функціями товщини одного (наприклад, внутрішнього) шару. Характерний вигляд таких залежностей при різних значеннях температур і значеннях параметрів (крім товщини), узятих із приклада рисунка 3.6, представлений на рисунку 3.11. На ньому часам $\tau_{cr.2}$ відповідає набір дуг, часам $\tau_{cr.1}$ відповідають лінії, які віялом виходять із правого нижнього кута. Нанесені лінії є ізотермами (відповідні значення температур по шкалі Цельсія проставлені поруч із хрестиками).

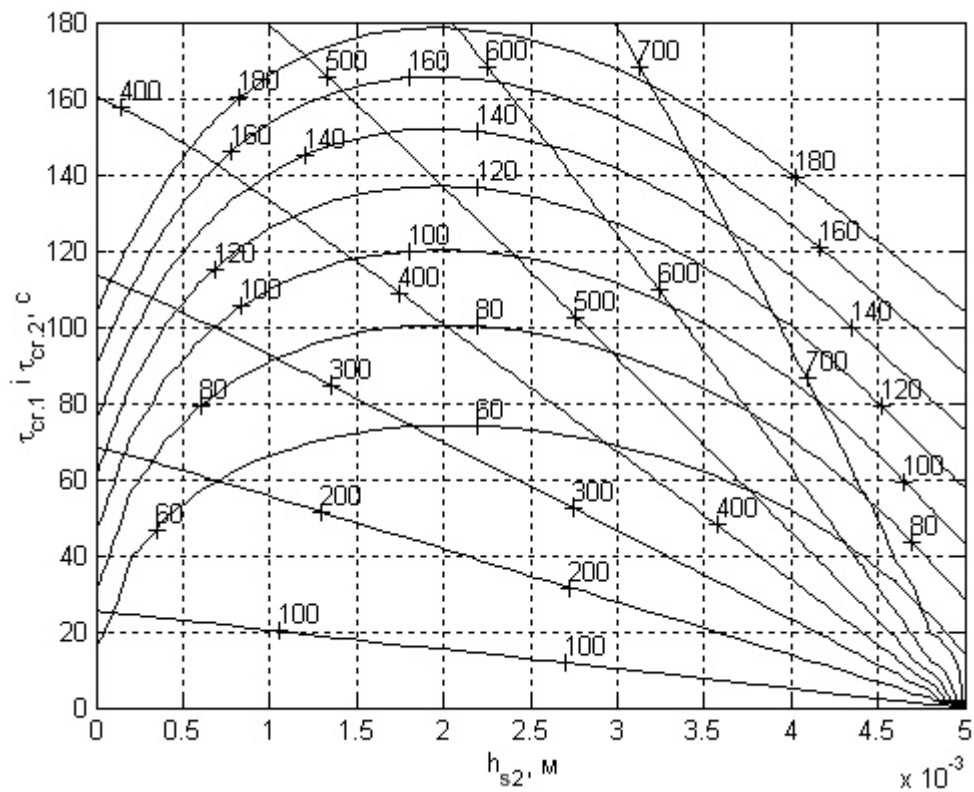


Рис. 3.11 Графіки залежності критичних часів від товщини внутрішнього шару при різних значеннях критичних температур відповідних шарів.

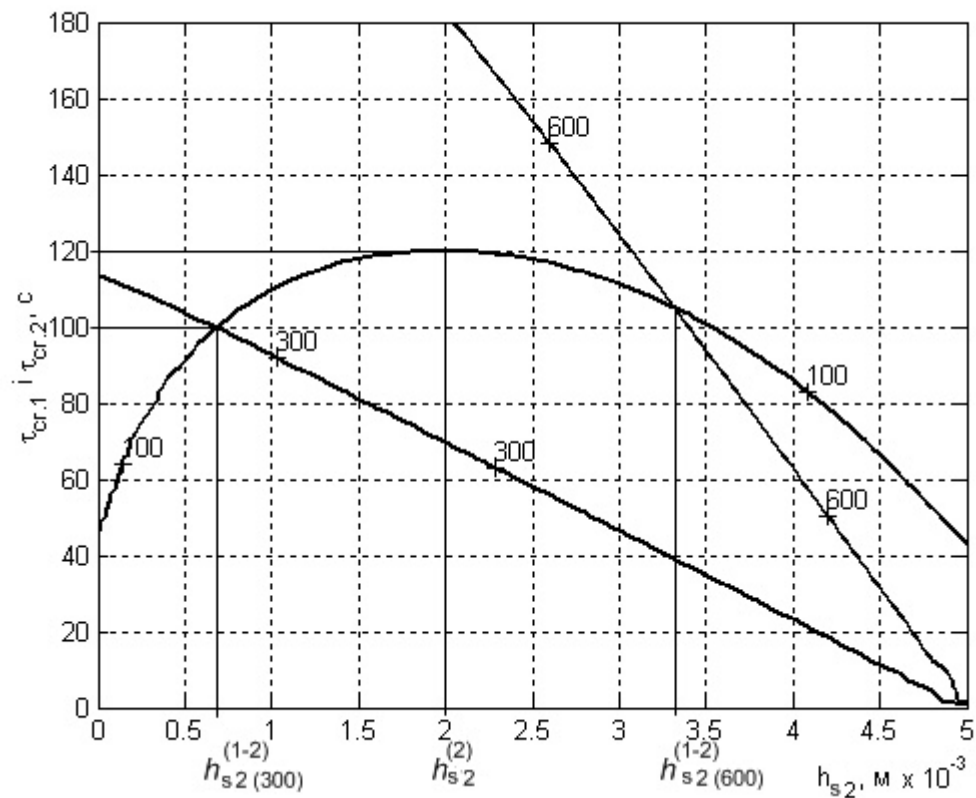


Рис. 3.12 Фрагмент рисунка 3.11.

На рис. 3.12 часу $\tau_{cr,2}$ відповідає дуга ізотерми $t_{s,cr,2}=100^\circ\text{C}$, часу $\tau_{cr,1}$ відповідають ізотерми $t_{s,cr,1}=300^\circ\text{C}$ і $t_{s,cr,1}=600^\circ\text{C}$, які променями виходять із правого нижнього кута. У відповідності до цього точці екстремуму відповідає перетинання ліній $\tau_{cr,1}(h_{sum}-h_{s2}, t_{s,cr,1})$ і $\tau_{cr,2}(h_{s2}, t_{s,cr,2})$ (наприклад, при $t_{s,cr,2}=100^\circ\text{C}$ і $t_{s,cr,1}=600^\circ\text{C}$ (відповідно до рис. 3.12) $h_{s2}^{(1-2)} = h_{s2(600)}^{(1-2)} \approx 3,3$ ì і $\tau_{cr,1} = \tau_{cr,2} \approx 104$ с, а при $t_{s,cr,2}=100^\circ\text{C}$ і $t_{s,cr,1}=300^\circ\text{C}$ $h_{s2}^{(1-2)} = h_{s2(300)}^{(1-2)} \approx 0,7$ ì і $\tau_{cr,1} = \tau_{cr,2} \approx 100$ с).

Як впливає з структури залежностей $\tau_{cr,1}$ і $\tau_{cr,2}$ від товщини внутрішнього шару h_{s2} , що представлені на рис. 3.11 і рис. 3.12, при фіксованих величинах критичних температур $t_{s,cr,1}$ і $t_{s,cr,2}$ максимальний час вогнезахисту (3.34) реалізується при мінімальній із товщин $h_{s2}^{(2)}$ й $h_{s2}^{(1-2)}$:

$$h_{s2}^* = \min(h_{s2}^{(1-2)}, h_{s2}^{(2)}). \quad (3.38)$$

Відповідний максимальний час дорівнює $\tau_{\max} = \tau_{cr,2}(h_{s2}^*)$.

Наприклад, при $t_{s,cr,2}=100^\circ\text{C}$ і $t_{s,cr,1}=600^\circ\text{C}$ (відповідно до рис. 3.12) $h_{s2}^* = h_{s2}^{(2)} \approx 2,0$ ì і $\tau_{\max} \approx 120$ с, а при $t_{s,cr,2}=100^\circ\text{C}$ і $t_{s,cr,1}=300^\circ\text{C}$ виходить $h_{s2}^* = h_{s2}^{(1-2)} \approx 0,7$ ì і $\tau_{\max} \approx 100$ с.

Відзначимо, що дійсним параметром, що визначає час зміни температури шару екрану, є не товщина шару h_s , а теплоємність одиниці площі, яка дорівнює $c''_{ps} = \rho_s \cdot c_{ps} \cdot h_s$. Цю обставину необхідно враховувати, якщо вирішувати задачу підбора оптимальної товщини шарів, які зроблені з різних матеріалів.

3.4 Моделювання захисної дії одиничного відбиваючого екрану відокремленого від поверхні захисту теплопровідним оптично тонким прошарком

У попередніх пунктах розділу досліджувалася дія відбиваючих екранів, відокремлених від поверхонь захисту повітряними прошарками [42,43]. Однією із проблем, яка може виникати при використанні таких систем, є можливість торкання відбиваючих шарів між собою або із поверхнею захисту. У першому варіанті ефект захисту зменшується (два екрани ведуть себе як один із сумарною товщиною), у другому варіанті крім послаблення захисту ще додається можливість термічного пошкодження поверхні захисту. Можливим рішенням проблеми є заповнення прошарків захисними матеріалами.

Дослідимо процес термічного захисту у випадку одношарового екрану, прошарок якого заповнено оптично тонким матеріалом, наприклад, бавовняною тканиною (на рис. 3.1 таким матеріалом заповнено прошарок товщиною x_s). Основною відмінністю опису досліджуваної ситуації від ситуації екрану із повітряним прошарком [42] є необхідність врахування замість конвекційного потоку тепла крізь повітряний прошарок перенос тепла теплопровідністю крізь матеріал прошарку. В додаток до цього треба врахувати відмінність розповсюдження променистого потоку крізь діатермічне середовище, яким можна вважати повітря, і крізь взаємодіюче із випроміненням середовище матеріалу наповнювача. Така зміна приводить до ускладнення опису явища: до звичайного диференційного рівняння залежності температури екрану від часу додається рівняння у частинних похідних, що описує поле температур у матеріалі прошарку. Схема задачі зображена на рис. 3.13.

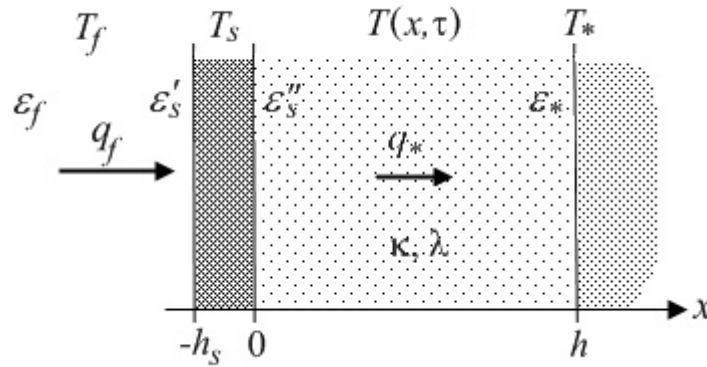


Рис. 3.13 Схема задачі термічного захисту тіла від теплового впливу полум'я

На ньому області $x < -h_s$ відповідає гаряче середовище (наприклад, полум'я) із абсолютною температурою T_f і ступенем чорноти ε_f . Значенням $-h_s \leq x \leq 0$ відповідає оптично непрозорий термічно тонкий відбиваючий екран, який має абсолютну температуру $T_s(\tau)$, К. Поверхні екрану мають відповідні ступені чорноти ε'_s та ε''_s . В області $0 \leq x \leq h$ розташовано заповнювач, який характеризується нестационарним полем температур $T(x, \tau)$, К. У області $x \geq h$ знаходиться тіло, поверхня якого має сталу абсолютну температуру T_* і ступінь чорноти ε_* . Матеріал прошарку має коефіцієнт теплопровідності λ , Вт·м⁻¹·К⁻¹. Взаємодію матеріалу із променистим потоком відображає коефіцієнт поглинання променистого потоку κ , м⁻¹.

Щільність потоку тепла q_λ , яке теплопровідністю передається у заповнювачі, розраховується за рівнянням Фур'є:

$$q_\lambda(x, \tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (3.39)$$

При визначенні променистої складової теплового потоку будемо вважати матеріал у прошарку оптично тонким. Це означає, що виконується співвідношення

$$\kappa \cdot l \ll 1, \quad (3.40)$$

де l - відстань між непрозорими поверхнями, які обмежують пряме розповсюдження променів теплового випромінювання (у випадку, зображеному на рис. 3.13, $l = h$).

Описана ситуація, щодо променистого теплового потоку у площинному зазорі, давно досліджена. Вдале викладення її дано у книзі [239]. Відповідно до неї променистий потік між двома нескінченими паралельними площинами, які мають температури T_1 та T_2 і ступені чорноти ε_1 та ε_2 , відповідно, (дивись рис. 3.14) у першому незникаючому наближенні по малому параметру ($\kappa \cdot l$) співпадає із потоком крізь оптично прозоре середовище і тому не залежить від відстані x . У наближенні сірого тіла і дифузійного власного випромінювання та дифузійного відбиття зовнішнього випромінювання оточуючими поверхнями величина щільності результуючого променистого теплового потоку у прошарку розраховується за формулою (3.3).

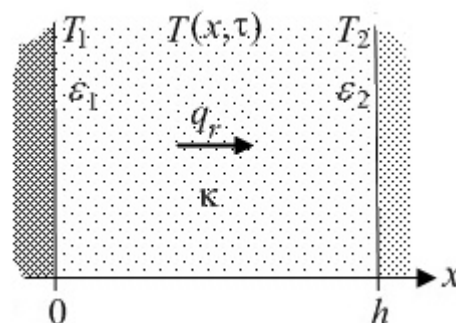


Рис. 3.14 Схема задачі розповсюдження теплового променистого потоку у площинному прошарку

Дивергенція щільності променистого потоку тепла, яка при площинній симетрії зводиться до похідної по координаті x , у першому неznикаючому наближенні по параметру $(\kappa \cdot l)$ дорівнює

$$\frac{\partial q_r}{\partial x}(T_1, T, T_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \kappa) = -2 \cdot \kappa \cdot \sigma \cdot \left\{ \varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \left[\frac{T_1^4}{\varepsilon_{II}(\varepsilon_2, \varepsilon_2)} + \frac{T_2^4}{\varepsilon_{II}(\varepsilon_1, \varepsilon_1)} \right] - 2 \cdot T^4 \right\}. \quad (3.41)$$

У формулі (3.41) доданки у квадратних дужках відповідають поглинанню ефективних променистих потоків від поверхонь, а останній доданок у фігурних дужках описує власне випромінювання середовища. У загальному випадку, при якому залишається вірною формула (3.41), температури обмежуючих поверхонь можуть бути функціями часу $T_1(\tau)$ і $T_2(\tau)$, температура середовища у прошарку є нестационарним полем $T(x, \tau)$, а коефіцієнт поглинання може бути функцією просторової координати $\kappa(x)$. В останньому випадку вигляд обмеження (3.40) дещо ускладнюється:

$$\int_0^h \kappa(x) dx \ll 1. \quad (3.42)$$

Спираючись на надані відомі співвідношення напишемо систему диференціальних рівнянь, яка описує теплозахисну дію даного екрану. За сенсом такі рівняння є рівняннями енергетичного балансу.

Першим напишемо рівняння балансу енергії у відбиваючому шарі екрану. Згідно із позначками рис. 3.13 воно має вигляд

$$c'_{p.s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_s(\tau)}{d\tau} = q_{f.r}(T_f, T_s(\tau), \varepsilon_f, \varepsilon'_s) - q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon''_s, \varepsilon_*) - q_{\lambda}(+0, \tau), \quad (3.43)$$

де $c'_{p,s}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару екрану, Дж·м⁻³·К⁻¹; величина $q_{f,r}(T_f, T_1, \varepsilon_f, \varepsilon'_1)$, що задається формулою (3.12), є щільністю променистого теплового потоку від гарячого середовища безпосередньо на відбиваючий шар екрану.

Ліва частина рівняння (3.43) дає швидкість зміни у часі ентальпії одиниці площі відбиваючого шару. Другий доданок правої частини рівняння ($q_r(T_s, T_*, \varepsilon''_s, \varepsilon_*)$) задає щільність результуючого променистого потоку, що йде від відбиваючого шару. Останній доданок правої частини ($q_\lambda(+0)$) відповідає тепловому потоку, що покидає відбиваючий шар екрану внаслідок теплопровідності матеріалу, що заповнює прошарок. Щільність результуючого потоку тепла, що виходить із відбиваючого шару в напрямку поверхні захисту, дорівнює

$$q_*|_{x=+0} = q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon''_s, \varepsilon_*) + q_\lambda(+0, \tau).$$

Друге рівняння описує баланс енергії у середовищі заповнювача. Це варіант рівняння нестационарної теплопровідності із нелінійними джерелами. Воно діє у межах $0 \leq x \leq h$ і має вигляд

$$c'_p \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_s(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon''_s, \varepsilon_*, \kappa), \quad (3.44)$$

де c'_p - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу, що наповнює прошарок, Дж·м⁻³·К⁻¹, а просторова похідна від щільності променистого потоку розраховується згідно із співвідношенням (3.41).

Граничними умовами до рівняння (3.44) є неперервність температури:

$$T(0, \tau) = T_s(\tau), \quad (3.45)$$

$$T(h, \tau) = T_*. \quad (3.46)$$

У якості початкових умов до рівнянь (3.43), (3.44) бралися співвідношення

$$T(x, 0) = T_s(0) = T_*. \quad (3.47)$$

Нагадуємо, що гранична умова (3.46) виходить із уявлення про те, що до моменту отримання незворотних наслідків організм людини, відводячи надлишкове тепло, підтримує стає значення температури поверхні T_* . Така ситуація різко змінюється, коли організм перестає справлятися із зовнішнім тепловим потоком, тобто існує критичний рівень щільності теплового потоку q_{cr} , перевищення якого є небезпечним. У зв'язку із цим умова безпеки у даній задачі має вигляд

$$q_*|_{x=h-0} = [q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*) + q_\lambda(h-0, \tau)] \leq q_{cr}. \quad (3.48)$$

Ще одне зауваження, щодо умови пожежної безпеки. Через те, що екрануючий шар буде нагрітися до сотень градусів, необхідно відстежувати, щоб він не перегрівся, тобто необхідно, як і у випадку екранів із повітряними прошарками, дотримуватись умови (3.24). Однак в даному випадку умова може бути складніша до виконання, бо критична температура t_{cr1} буде мінімальною із можливих температур не тільки екрануючого шару, але і матеріалу прошарку, який знаходиться у безпосередньому контакті із зовнішнім екрануючим шаром.

Система рівнянь (3.43), (3.44) із умовами (3.45)-(3.47) вирішувалася чисельно з використанням середовища Matlab. Результати двох типових випадків представлені на рис. 3.15 та рис. 3.16.

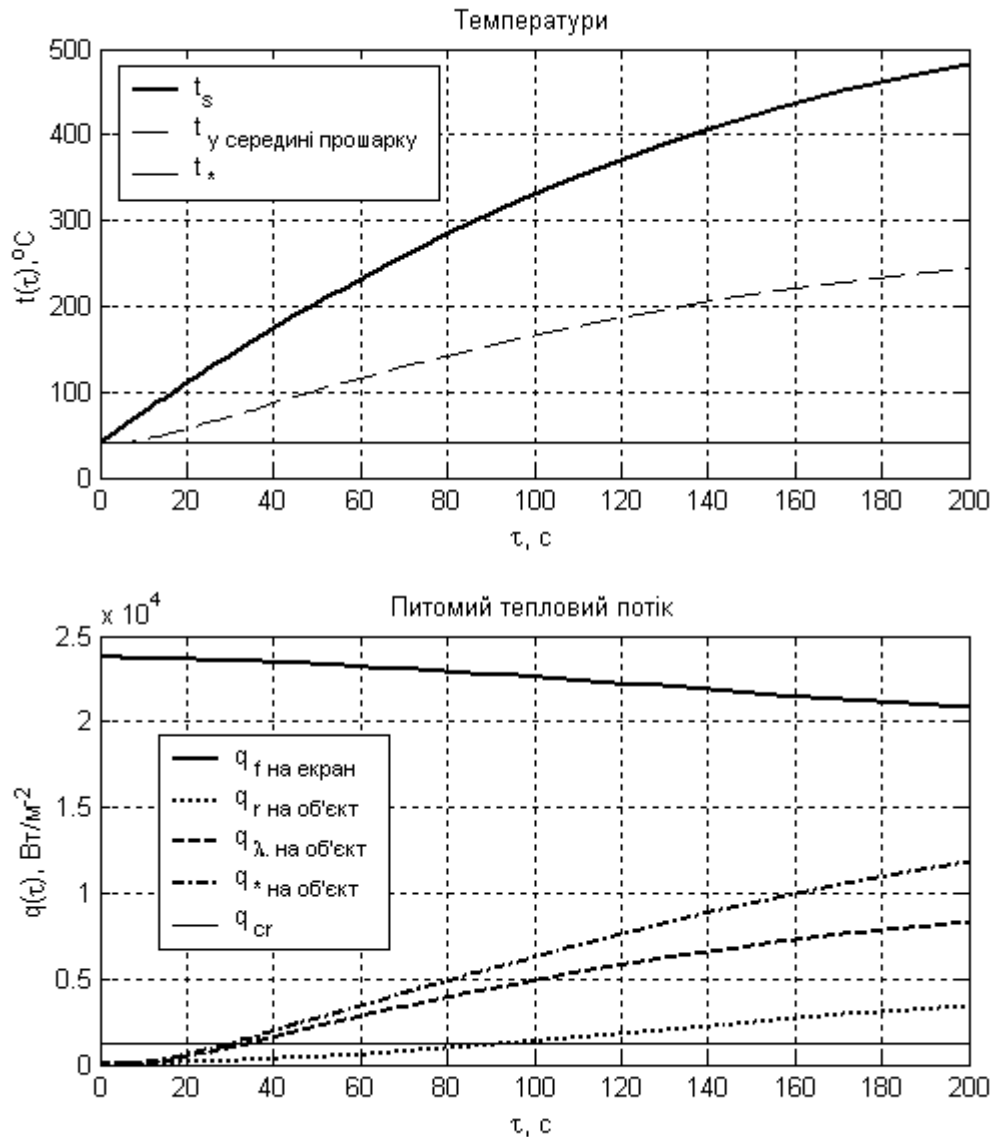


Рис. 3.15 Графіки залежності температур і питомих теплових потоків від часу теплового впливу τ у одношаровому відбиваючому екрані із товщиною відбиваючого шару $h_s = 3 \cdot 10^{-3}$ м і теплопровідним оптично тонким прошарком товщиною $h = 1 \cdot 10^{-2}$ м

У варіанті, що демонструється на рис. 3.15 та рис. 3.16, прийнято, що $\rho_s = 2 \cdot 10^3$ кг·м⁻³, $\rho = 1 \cdot 10^2$ кг·м⁻³, $\lambda = 0,2$ Вт·м⁻¹·К⁻¹, $c_{ps} = 1 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $c_p = 2 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $h_s = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\kappa = 20$ м⁻¹, $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon'_s = \varepsilon''_s = 0,2$, $\varepsilon_* = 0,9$, $T_f = 1000 + 273$ К, $T_* = 40 + 273$ К. Тут c_p і ρ - відповідно, питома масова

ізобарна теплоємність і густина матеріалу, що наповнює прошарок, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$ і $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Їх добуток дорівнює поверхневій щільності теплоємності: $c'_p = \rho \cdot c_p$. Різниця даних рис. 3.15 та рис. 3.16 у тому, що товщина прошарку у варіанті з рис. 3.15 складає $h = 1 \cdot 10^{-2}$ м, а у варіанті з рис. 3.16 вона вдвічі більша, тобто $h = 2 \cdot 10^{-2}$ м.

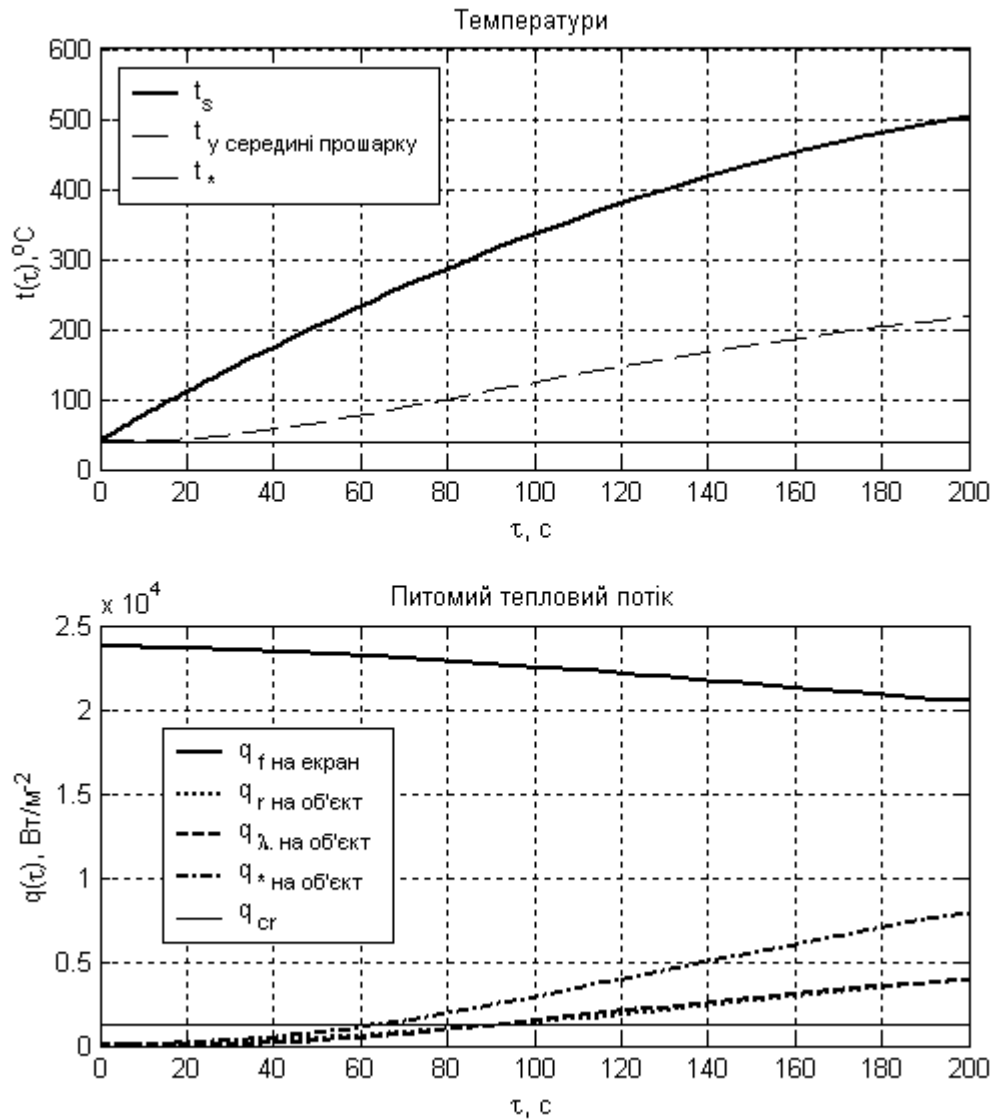


Рис. 3.16 Графіки залежності температур і питомих теплових потоків від часу теплового впливу τ у одношаровому відбиваючому екрані із товщиною відбиваючого шару $h_s = 3 \cdot 10^{-3}$ м і теплопровідним оптично тонким прошарком товщиною $h = 2 \cdot 10^{-2}$ м

З графіків питомих теплових потоків виходить, що у варіанті рис. 3.15 час захисту τ_{cr} (який визначається вимогою (3.48)) складає $\tau_{cr} \approx 29$ с, а у варіанті рис. 3.16 час захисту дорівнює $\tau_{cr} \approx 62$ с.

Дослідження залежності часу захисної дії τ_{cr} від параметрів екрану показало, що до помітного збільшення величини τ_{cr} приводить зменшення ступенів чорноти будь-якої із поверхонь, збільшення поверхневої теплоємності відбиваючого шару $c''_{p.s}$ ($c''_{p.s} = \rho_s \cdot c_{p.s} \cdot h_s$), збільшення об'ємної теплоємності матеріалу прошарку c'_p ($c'_p = \rho \cdot c_p$). До найбільш суттєвого збільшення часу τ_{cr} приводить зменшення коефіцієнта теплопровідності матеріалу прошарку λ і збільшення товщини прошарку h .

Із порівняння графіків потоків рис. 3.15 і рис. 3.16 із рис.3.4 (які описують екрани з однаковими відбиваючими шарами) витікає, що в розглянутій області дії параметрів екранів захисна дія екрану з повітряним прошарком є кращою ніж екрану із теплопровідним прошарком товщиною 1 см, але гіршою за дію екрану із теплопровідним прошарком товщиною 2 см.

Зрозуміло, що шлях надмірного збільшення густини відбиваючого шару ρ_s , та товщин шару і прошарку (h_s і h) є хибним через пропорційне збільшення ваги складових елементів екрану. Через це виникає питання про захисну дію двошарового екрану. Однією із задач може бути порівняння захисної дії одношарового екрану з дією двошарового екрану, із двічі тоншими розмірами відповідних шарів.

3.5 Моделювання захисної дії двошарового відбиваючого екрану із поділяючими теплопровідними оптично тонкими прошарками

У попередньому пункті даного розділу було підтверджено загальне положення, що час захисної дії одношарового відбиваючого екрану збільшується із зростанням його товщини бо товстіший екран вимагає більшої енергії на нагрівання. Збільшення часу нагрівання за рахунок збільшення товщини екрану обмежено тим, що пропорційно товщині зростає вага екрану,

що є негативним чинником. Можливим рішенням проблеми є застосування двошарового екрану [43].

У даному підрозділі дисертації буде показано, що твердження попереднього абзацу вірно і тоді, коли прошарки між відбиваючими теплове випромінювання непрозорими термічно тонкими шарами заповнені теплопровідним майже прозорим матеріалом [69]. Практична цінність дослідження такої конструкції полягає у більш легкому її реалізації у порівнянні із розглянутими у пункті 3.2 екранами із повітряними прошарками.

Досліджується теплозахисна дія двошарового екрану, що складається із двох оптично непрозорих термічно тонких шарів, з одного боку яких прикріплені шари із теплоізоляційного матеріалу. Взаємодія цього матеріалу із тепловим випромінюванням вважається слабкою, так що шари теплоізоляції розглядаються, як оптично тонкі.

Схема розташування екрану зображена на рис.3.17. На ньому об'єктам відповідають індекси: « f » - полум'я; « s_1 » - гарячий відбиваючий шар; « s_2 » - холодний відбиваючий шар; «*» - підзахисна поверхня. Використовувані величини позначені: T_{s_1} і T_{s_2} - абсолютна температура відповідних шарів, К; h_{s_1} і h_{s_2} - товщина відповідного відбиваючого шару, м; h_1 і h_2 - товщина відповідного теплоізоляційного прошарку, м; $\kappa_1, \kappa_2, \rho_1, \rho_2, \lambda_1, \lambda_2, c_{p1}, c_{p2}$ - коефіцієнти поглинання променистого потоку, м^{-1} , густини, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$, коефіцієнти теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, питомі масові ізобарні теплоємності, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, матеріалу першого і другого прошарків, відповідно; $\varepsilon'_{s_1}, \varepsilon''_{s_1}$ і $\varepsilon'_{s_2}, \varepsilon''_{s_2}$ - ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) зовнішньої (') і внутрішньої (") поверхонь першого і другого відбиваючих шарів; ε_f - ступінь чорноти полум'я; ε_* - ступінь чорноти підзахисної поверхні (дивись рисунок 3.17).

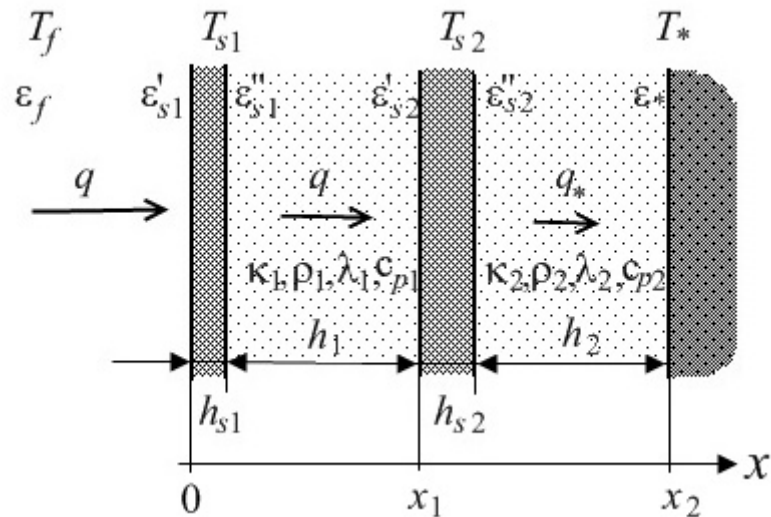


Рис. 3.17 Схема задачі термічного захисту тіла за допомогою двошарового відбиваючого екрану із теплопровідними оптично тонкими прошарками

Система рівнянь, яка описує переніс тепла крізь екран, є рівняннями енергетичного балансу. Через те, що другий відбиваючий шар є непрозорим, можна окремо розглядати процеси розповсюдження енергії між відбиваючими шарами і від другого шару до поверхні, яка підлягає захисту. Через те, що прошарки між непрозорими поверхнями вважаються теплопровідними і оптично тонкими, опис даної системи двошарового екрану в цілому зводиться до двократного опису одношарових екранів із теплопровідними і оптично тонкими прошарками. Така конструкція розглянута у попередньому пункті даного розділу. Зв'язок описів одношарових екранів, які є складовими двошарового екрану, здійснюється рівнянням енергетичного балансу спільного для обох підсистем другого відбиваючого шару.

Перейдемо до опису двошарового екрану.

Вимогу оптичної тонкості обох прошарків можна записати одним співвідношенням

$$(\kappa_1 \cdot h_1 + \kappa_2 \cdot h_2) \ll 1, \quad (3.49)$$

де κ_1, κ_2 і h_1, h_2 - коефіцієнти поглинання променистого потоку, м^{-1} , і товщини відповідних теплоізоляційних прошарків (тут і далі дивись схему з рис. 3.17).

Питомий тепловий потік, який теплопровідністю передається крізь прошарки, задовольняє рівнянню Фур'є:

$$q_{\lambda 1}(x, \tau) = -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad h_{s1} \leq x \leq x_1, \quad (3.50)$$

$$q_{\lambda 2}(x, \tau) = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (x_1 + h_{s1}) \leq x \leq x_2, \quad (3.51)$$

де $T(x, \tau)$ - нестационарне поле абсолютної температури матеріалу у прошарках, К; λ_1 і λ_2 - коефіцієнт теплопровідності матеріалу відповідно першого і другого прошарку, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Першим напишемо рівняння балансу енергії у першому відбиваючому шарі екрану. Згідно із позначками рис. 3.17 воно має вигляд

$$c'_{p.s1} \cdot h_{s1} \cdot \frac{dT_{s1}(\tau)}{d\tau} = q_{f.r}(T_f, T_{s1}(\tau), \varepsilon_f, \varepsilon'_{s1}) - q_r(T_{s1}(\tau), T_{s2}(\tau), \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) - q_{\lambda 1}(h_{s1} + 0, \tau), \quad (3.52)$$

де $c'_{p.s1}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару першого екрану, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$; величина $q_{f.r}(T_f, T_{s1}, \varepsilon_f, \varepsilon'_{s1})$, що задається формулою (3.12), є щільністю променистого теплового потоку від гарячого середовища безпосередньо на зовнішній відбиваючий шар екрану.

Ліва частина рівняння (3.52) задає швидкість зміни у часі ентальпії одиниці площі першого відбиваючого шару. Другий доданок правої частини рівняння ($q_r(T_{s1}, T_{s2}, \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2})$), який розраховується за співвідношенням (3.3), у

головному (нульовому) по малому параметру $(\kappa_1 \cdot h_1)$ наближенні задає щільність результуючого променистого потоку, що йде від першого відбиваючого шару до другого. Останній доданок правої частини рівняння (3.52) $(q_{\lambda 1}(h_1 + 0))$ відповідає тепловому потоку, що покидає перший відбиваючий шар екрану внаслідок теплопровідності матеріалу, що заповнює прошарок.

Другим рівнянням напишемо рівняння балансу енергії у другому відбиваючому шарі екрану. Згідно із позначками рис. 3.17 воно має вигляд

$$\begin{aligned} c'_{p.s2} \cdot h_{s2} \cdot \frac{dT_{s2}(\tau)}{d\tau} = & q_r(T_{s1}(\tau), T_{s2}(\tau), \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}) + q_{\lambda 1}(x_1 - 0, \tau) \\ & - q_r(T_{s2}(\tau), T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*) - q_{\lambda 2}(x_1 + h_{s2} + 0, \tau), \end{aligned} \quad (3.53)$$

де $c'_{p.s2}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару другого екрану, Дж·м⁻³·К⁻¹; величина $q_r(T_{s2}, T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*)$, яка розраховується за співвідношенням (3.3), у головному (нульовому) по малому параметру $(\kappa_2 \cdot h_2)$ наближенні задає щільність результуючого променистого потоку, що йде від другого відбиваючого шару до поверхні захисту.

Ліва частина рівняння (3.53) задає швидкість зміни у часі ентальпії одиниці площі другого відбиваючого шару. Доданки $q_{\lambda 1}(x_1 - 0)$ і $q_{\lambda 2}(x_1 + h_2 + 0)$ правої частини рівняння (3.53) описують питомий тепловий потік, що, відповідно, потрапляє на другий відбиваючий шар і покидає його внаслідок теплопровідності матеріалів, що заповнюють відповідні прошарки.

Третє рівняння описує баланс енергії у середовищі заповнювача першого прошарку. Це варіант рівняння нестационарної теплопровідності із нелінійними джерелами. Воно діє у межах $h_1 \leq x \leq x_1$ і має вигляд

$$c'_{p1} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_{s1}(\tau), T(x, \tau), T_{s2}(\tau), \varepsilon''_{s1}, \varepsilon'_{s2}, \kappa_1), \quad (3.54)$$

де $c'_{p1} = \rho_1 \cdot c_{p1}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу, що наповнює перший прошарок, Дж·м⁻³·К⁻¹, а просторова похідна від щільності променистого потоку розраховується згідно із співвідношенням (3.41).

Четверте рівняння описує баланс енергії у середовищі заповнювача другого прошарку. Цей варіант рівняння нестационарної теплопровідності діє у межах $x_1 + h_2 \leq x \leq x_2$ і має вигляд

$$c'_{p2} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_{s2}(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*, \kappa_2), \quad (3.55)$$

де $c'_{p2} = \rho_2 \cdot c_{p2}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу, що наповнює другий прошарок, Дж·м⁻³·К⁻¹, а просторова похідна від щільності променистого потоку розраховується згідно із співвідношенням (3.41).

Граничними умовами до рівнянь (3.54), (3.55) є неперервність температури на границях прошарків:

$$T(h_1, \tau) = T_{s1}(\tau), \quad (3.56)$$

$$T(x_1, \tau) = T_{s2}(\tau), \quad (3.57)$$

$$T(x_1 + h_2, \tau) = T_{s2}(\tau), \quad (3.58)$$

$$T(x_2, \tau) = T_*. \quad (3.59)$$

У якості початкових умов до рівнянь (3.52)-(3.55) бралися співвідношення

$$T(x, 0) = T_{s1}(0) = T_{s2}(0) = T_*. \quad (3.60)$$

Нагадуємо, що гранична умова (3.59) виходить із уявлення про те, що до моменту отримання незворотних наслідків організм людини, відводячи надлишкове тепло, підтримує стає значення температури поверхні T_* . Така ситуація різко змінюється, коли організм перестає справлятися із зовнішнім тепловим потоком, тобто існує критичний рівень щільності теплового потоку q_{cr} , перевищення якого є небезпечним. У зв'язку із цим умова пожежної безпеки у даній задачі має вигляд

$$q^*|_{x=x_2-0} = [q_r(T_{s2}(\tau), T_*, \varepsilon''_{s2}, \varepsilon_*) + q_{\lambda 2}(x_2 - 0, \tau)] \leq q_{cr}. \quad (3.61)$$

Система рівнянь (3.52)-(3.55) із умовами (3.56)-(3.60) вирішувалися чисельно з використанням середовища Matlab. Результати одного з типових випадків представлені на рис. 3.18. та на рис.3.19, який є збільшеним фрагментом графіків з рис. 3.18.

У варіанті, що демонструється на рис. 3.18. та на рис.3.19, прийнято, що $\rho_{s1} = \rho_{s2} = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p.s1} = c_{p.s2} = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho_1 = \rho_2 = 1 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p1} = c_{p2} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\kappa_1 = \kappa_2 = 20 \text{ м}^{-1}$, $h_{s1} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_{s2} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_1 = 0,01 \text{ м}$, $h_2 = 0,01 \text{ м}$, $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon'_{s1} = \varepsilon''_{s1} = \varepsilon'_{s2} = \varepsilon''_{s2} = 0,2$, $\varepsilon_* = 0,9$, $T_f = 1000 + 273 \text{ К}$, $T_* = 40 + 273 \text{ К}$

Отримані результати природно порівнювати із результатами, одношарового екрану, відображеними на рис. 3.16. Цей одношаровий екран має такі ж властивості матеріалів і товщину відбиваючого шару, що дорівнює сумарній товщині відбиваючих шарів двошарового екрану, а також товщину прошарку, що дорівнює сумарній товщині прошарків двошарового екрану.

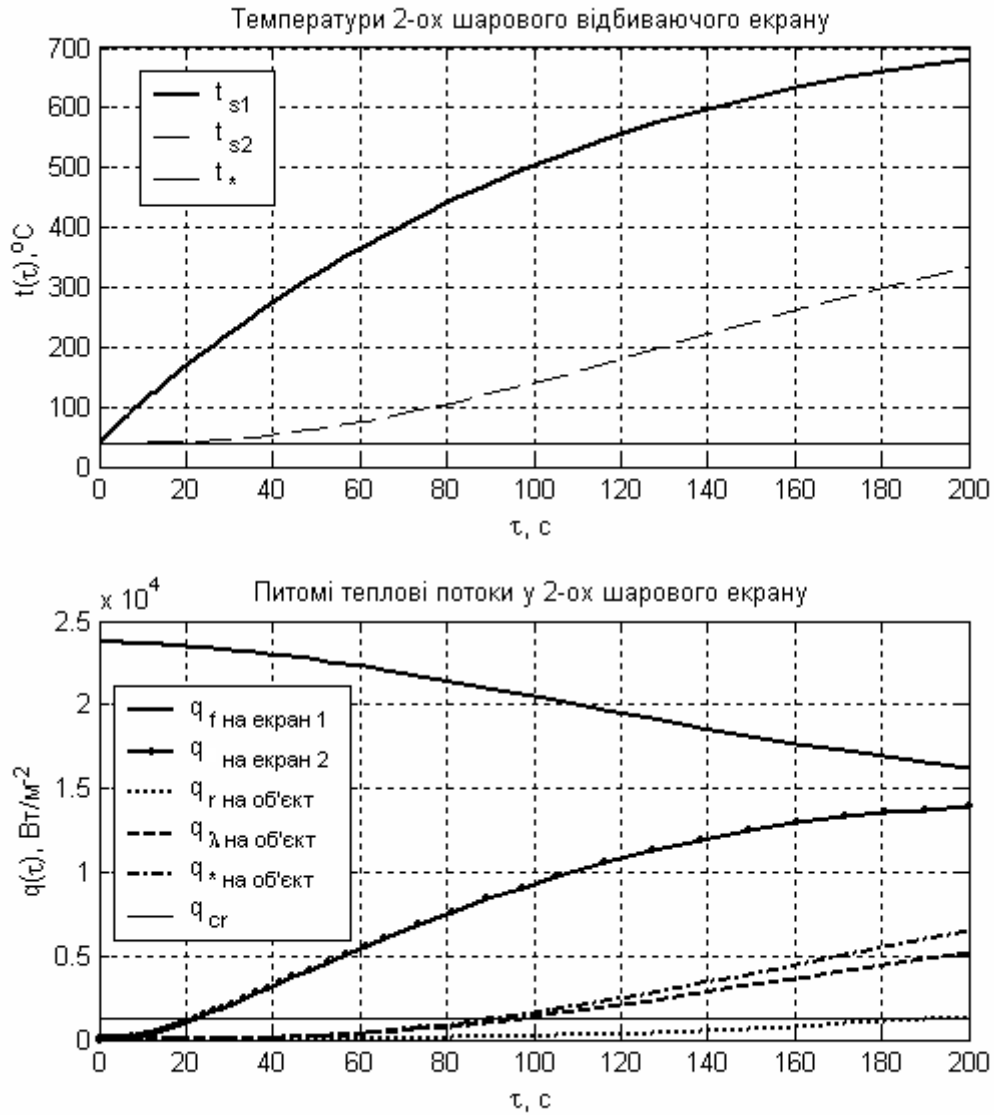


Рис. 3.18 Графіки залежності температур і питомих теплових потоків від часу теплового впливу τ у двошаровому відбиваючому екрані із сумарною товщиною відбиваючих шарів $h_{s1} + h_{s2} = 3 \cdot 10^{-3}$ м і теплопровідними оптично тонкими прошарками сумарною товщиною $h_1 + h_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ м

Згідно із рис.3.19 час захисної дії двошарового екрану складає $\tau_{cr} \approx 89$ с, що майже в півтори рази перевищує час ($\tau_{cr} \approx 62$ с) відповідного одношарового екрану.

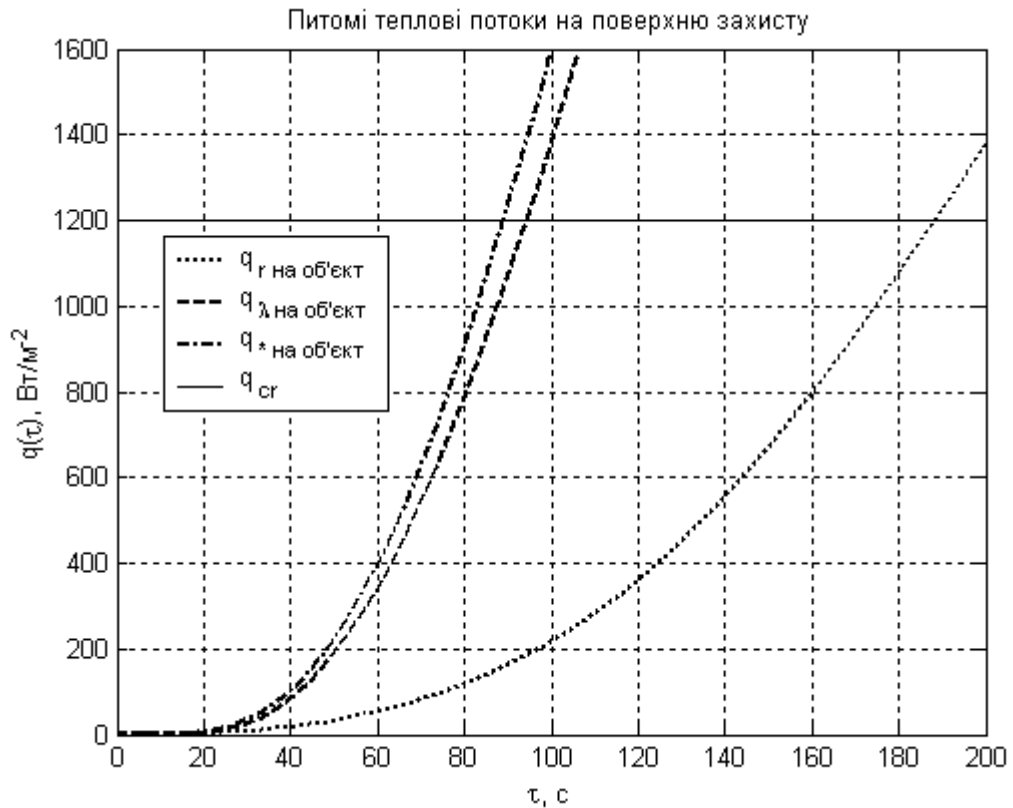


Рис. 3.19 Графіки залежності питомих теплових потоків від часу теплового впливу τ у двохшаровому відбиваючому екрані із сумарною товщиною відбиваючих шарів $h_{s1} + h_{s2} = 3 \cdot 10^{-3}$ м і теплопровідними оптично тонкими прошарками сумарною товщиною $h_1 + h_2 = 2 \cdot 10^{-2}$ м (збільшений фрагмент графіка з рис. 3.18)

Проведені на моделі числові експерименти показали, що при фіксованому значенні суми товщин відбиваючих шарів ($h_{s1} + h_{s2} = \text{const}$) і при фіксованому значенні суми товщин прошарків ($h_1 + h_2 = \text{const}$) існує співвідношення товщини відбиваючих шарів і співвідношення товщин прошарків, при якому реалізується максимальне значення часу захисту об'єкту (цей час визначається вимогою (3.61)).

Наприклад, у випадку значень параметрів, які відповідають рис. 3.18, у якому $h_{s1} + h_{s2} = 3,00 \cdot 10^{-3}$ м, а $h_1 + h_2 = 2,00 \cdot 10^{-2}$ м, максимальне значення часу

захисту τ_{cr2} реалізується при $h_{s1} = 1,98 \cdot 10^{-3}$ м і $h_1 = 0,81 \cdot 10^{-2}$ м. Воно становить $\tau_{cr2} = 92,6$ с.

Як і в випадку екранів із повітряними прошарками крива $t_{s1}(\tau)$ показує, що для реалізації захисної дії матеріал зовнішнього шару екрану повинен витримувати температуру в декілька сотень градусів Цельсія. Звідси з'являється додаткова вимога, що при визначенні часу захисної дії двошарового екрану необхідно крім умови (3.61) на тепловий потік, якій можна надати вигляд умови на (3.19) температуру внутрішнього відбиваючого шару, відслідковувати виконання умови

$$t_{s1} \leq t_{s,cr.1}, \quad (3.24)$$

де $t_{s,cr.1}$ - максимальна температура, до досягнення якої матеріал зовнішнього шару екрану зберігає захисні властивості.

Остання обставина перетворює задачу пошуку оптимального співвідношення товщин екрануючих шарів і співвідношення товщин прошарків на оптимізаційну задачу із обмеженнями. Через велику кількість параметрів, значення яких не задані, але повинні враховуватися, вона не розглядалася.

3.6 Моделювання теплозахисної дії напівважкого теплозахисного костюма

У даному пункті буде розглянуто модель захисної дії напівважкого теплозахисного костюмів. Пакет матеріалів і тканин, які використовуються при створенні таких костюмів має не менш ніж два шари: тепло відбиваючий матеріал верха та внутрішній шар [240]. Внутрішній шар може складатися з двох шарів, один з яких (ближчий до зовнішнього шару) витримує більш високі температури. Саме таку ситуацію ми будемо розглядати.

Якщо врахувати, що костюм надівається на одягнену людину і між теплозахисним костюмом і одягом існує повітряний прошарок, стає необхідним

розглядати п'ятишарову систему (три шари костюма + повітряний прошарок + одяг). Схематичне відображення такої системи показано на рис. 3.20.

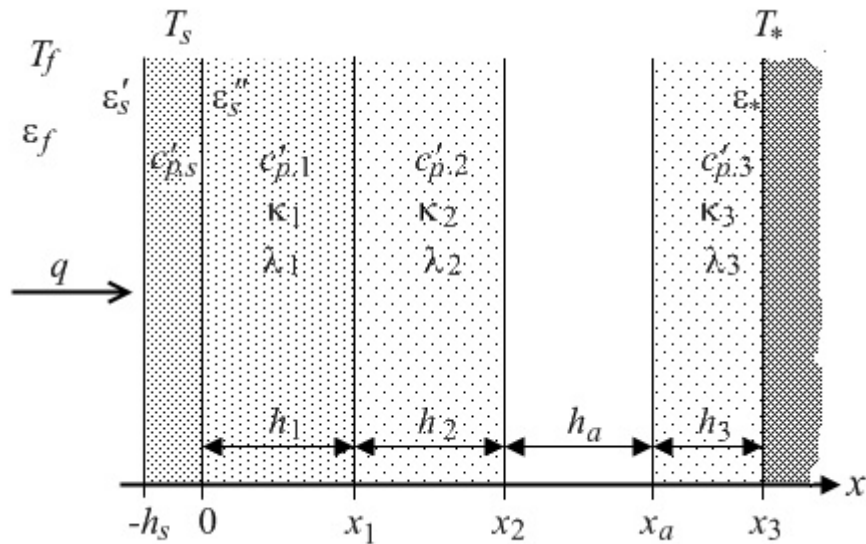


Рис. 3.20 Схема задачі термічного захисту тіла за допомогою напівважкого вогнезахисного костюму

Об'єктам рис. 3.20 відповідають індекси: «f» - полум'я; «s» - відбиваючий шар; «*» - підзахисна поверхня. Використовувані величини позначені: T_s - абсолютна температура відбиваючого шару, К; h_s - товщина відбиваючого шару, м; $c'_{p,s}$ - питомі об'ємні ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару, Дж·м⁻³·К⁻¹; h_1 , h_2 , h_a і h_3 - товщини відповідних теплоізоляційних прошарків, товщина повітряного прошарку і товщина одягу, м; k_1 , k_2 , k_3 , λ_1 , λ_2 , λ_a , λ_3 , c'_{p1} , c'_{p2} , c'_{p3} - коефіцієнти поглинання променистого потоку, м⁻¹, коефіцієнти теплопровідності, Вт·м⁻¹·К⁻¹, питомі об'ємні ізобарні теплоємності, Дж·м⁻³·К⁻¹, речовин та матеріалів відповідних прошарків, відповідно; ϵ'_s , ϵ''_s - ступені чорноти (відносні випромінювальні здатності) зовнішньої (') і внутрішньої (") поверхні відбиваючого шару; ϵ_f - ступінь чорноти полум'я; ϵ_* - ступінь чорноти підзахисної поверхні.

При розгляді зовнішній шар буде розглядатися як термічно тонкий і оптично непрозорий [63]. Термічна тонкість дозволить описувати цей шар єдиною температурою $T_s(\tau)$, К.

У всіх матеріальних прошарках буде враховуватись передача тепла теплопровідністю. Це означає врахування в співвідношеннях енергетичного балансу теплопровідного питомого теплового потоку. Останній задовольняє рівнянню Фур'є:

$$q_{\lambda 1}(x, \tau) = -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad 0 \leq x \leq x_1, \quad (3.62)$$

$$q_{\lambda 2}(x, \tau) = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad x_1 \leq x \leq x_2, \quad (3.63)$$

$$q_{\lambda 3}(x, \tau) = -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad x_a \leq x \leq x_3, \quad (3.64)$$

де $T(x, \tau)$ - нестаціонарне поле абсолютної температури матеріалу у прошарках, К; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу відповідних прошарків, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

При передачі тепла крізь повітряний прошарок крім променистого механізму буде враховуватись передача тепла внаслідок вільної конвекції. Відповідний питомий тепловий потік буде описуватись співвідношенням (3.6).

Будемо вважати, що обидва внутрішні шари теплозахисного костюму а також одяг людини є оптично тонкими. Ці вимоги можна записати одним співвідношенням

$$(\kappa_1 \cdot h_1 + \kappa_2 \cdot h_2 + \kappa_3 \cdot h_3) \ll 1, \quad (3.65)$$

де $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ і h_1, h_2, h_3 - коефіцієнти поглинання променистого потоку, м^{-1} , і товщини відповідних прошарків (тут і далі дивись схему з рис. 3.20).

Виконання вимоги (3.65) (разом із оптичною прозорістю повітряного прошарку) дозволяє в основному наближенні по малому параметру $(\kappa_1 \cdot h_1 + \kappa_2 \cdot h_2 + \kappa_3 \cdot h_3)$ описувати щільність променистого теплового потоку у внутрішньому просторі $(0 \leq x \leq x_3)$ формулою (3.3), дійсною, для прозорого середовища між паралельними площинами:

$$q_r = q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*). \quad (3.66)$$

Важлива у співвідношеннях енергетичного балансу у матеріальних прошарках дивергенція щільності променистого потоку у основному наближенні по малому параметру $(\kappa_1 \cdot h_1 + \kappa_2 \cdot h_2 + \kappa_3 \cdot h_3)$ описується формулою (3.41) [239]:

$$\frac{\partial q_r}{\partial x} = \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_s(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*, \kappa_i), \quad (3.67)$$

де індекс « i » ($i = 1, 2, 3$) у коефіцієнті поглинання променистого потоку κ_i відповідає прошарку.

Система рівнянь, яка описує переніс тепла від зовнішнього джерела енергії до шкіри людини, є рівняннями енергетичного балансу. Перейдемо до її написання.

Першим напишемо рівняння балансу енергії у відбиваючому шарі. Згідно із позначками рис. 3.20 воно має вигляд

$$c'_{p,s} \cdot h_s \cdot \frac{dT_s(\tau)}{d\tau} = q_{f,r}(T_f, T_s(\tau), \varepsilon_f, \varepsilon'_s) - q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*) - q_{\lambda 1}(+0, \tau), \quad (3.68)$$

де $c'_{p,s}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу відбиваючого шару, Дж·м⁻³·К⁻¹; величина $q_{f,r}(T_f, T_s, \varepsilon_f, \varepsilon'_s)$, що задається формулою (3.12), є

щільністю променистого теплового потоку від гарячого середовища безпосередньо на зовнішній відбиваючий шар.

Ліва частина рівняння (3.68) задає швидкість зміни у часі ентальпії одиниці площі відбиваючого шару. Другий доданок правої частини рівняння ($q_r(T_s, T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*)$), який розраховується за співвідношенням (3.3), задає щільність результуючого променистого потоку, що йде від відбиваючого шару до поверхні захисту. Останній доданок правої частини рівняння (3.68) ($q_{\lambda 1}(+0, \tau)$) відповідає тепловому потоку, що покидає відбиваючий шар внаслідок теплопровідності матеріалу, що заповнює перший прошарок.

Друге рівняння описує баланс енергії у середовищі заповнювача першого прошарку. Це варіант рівняння нестационарної теплопровідності із нелінійними джерелами. Воно діє у межах $0 \leq x \leq x_1$ і має вигляд

$$c'_{p1} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_1 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_s(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*, \kappa_1), \quad (3.69)$$

де c'_{p1} - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу, що наповнює перший прошарок, Дж·м⁻³·К⁻¹, а просторова похідна від щільності променистого потоку розраховується згідно із співвідношенням (3.41).

Третє рівняння описує баланс енергії у середовищі заповнювача другого прошарку. Цей варіант рівняння нестационарної теплопровідності діє у межах $x_1 \leq x \leq x_2$ і має вигляд

$$c'_{p2} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_2 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_s(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*, \kappa_2), \quad (3.70)$$

де c'_{p2} - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу, що наповнює другий прошарок, Дж·м⁻³·К⁻¹, а просторова похідна від щільності променистого потоку розраховується згідно із співвідношенням (3.41).

Четверте рівняння описує баланс енергії у середовищі заповнювача третього прошарку (одягу). Цей варіант рівняння нестационарної теплопровідності діє у межах $x_a \leq x \leq x_3$ і має вигляд

$$c'_{p3} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_3 \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x}(T_s(\tau), T(x, \tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*, \kappa_3), \quad (3.71)$$

де c'_{p3} - питома об'ємна ізобарна теплоємність матеріалу, що складає третій прошарок, Дж·м⁻³·К⁻¹, а просторова похідна від щільності променистого потоку розраховується згідно із співвідношенням (3.41).

Граничні умови до рівнянь (3.69) - (3.71) є наслідком неперервності температури і теплових потоків. Вони мають наступний вигляд:

при $x = 0$

$$T(+0, \tau) = T_s(\tau); \quad (3.72)$$

при $x = x_1$

$$T(x_1 - 0, \tau) = T(x_1 + 0, \tau), \quad (3.73)$$

$$q_{\lambda 1}(x_1 - 0, \tau) = q_{\lambda 2}(x_1 + 0, \tau), \quad (3.74)$$

при $x = x_2$

$$q_{\lambda 2}(x_2 - 0, \tau) = q_{con}(T(x_2 - 0, \tau), T(x_a + 0, \tau), h_a), \quad (3.75)$$

при $x = x_a$

$$q_{\lambda 3}(x_a + 0, \tau) = q_{con}(T(x_2 - 0, \tau), T(x_a + 0, \tau), h_a), \quad (3.76)$$

при $x = x_3$

$$T(x_3 - 0, \tau) = T_*. \quad (3.77)$$

Відмітимо, що при написанні умов (3.74)-(3.76), що пов'язують теплові потоки, в обох частинах рівностей скорочувалася загальна у прошарках (незалежна від просторової змінної «х») промениста складова (3.66).

У якості початкових умов до рівнянь (3.68)-(3.71) бралися співвідношення

$$T(x,0) = T_s(0) = T_*. \quad (3.78)$$

Нагадуємо, що гранична умова (3.77) виходить із уявлення про те, що до моменту отримання незворотних наслідків організм людини, відводячи надлишкове тепло, підтримує стале значення температури поверхні T_* . Така ситуація різко змінюється, коли організм перестає справлятися із зовнішнім тепловим потоком, тобто існує критичний рівень щільності теплового потоку q_{cr} , перевищення якого є небезпечним. У зв'язку із цим умова безпеки у даній задачі має вигляд

$$q_*|_{x=x_3-0} = [q_r(T_s(\tau), T_*, \varepsilon_s'', \varepsilon_*) + q_{\lambda 3}(x_3 - 0, \tau)] \leq q_{cr}. \quad (3.79)$$

Система рівнянь (3.68)-(3.71) із умовами (3.72)-(3.78) вирішувалися чисельно з використанням середовища Matlab. Результати одного з типових випадків представлені на рис. 3.21. та на рис.3.22, який є збільшеним фрагментом графіків з рис. 3.21.

У варіанті, що демонструється на рис. 3.21 (рис.3.22), прийнято, що $\rho_s = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p,s} = 1 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho_1 = 2 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $\rho_2 = \rho_3 = 1 \cdot 10^2 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p1} = c_{p2} = c_{p3} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = 0,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\kappa_1 = \kappa_2 = \kappa_3 = 20 \text{ м}^{-1}$, $h_s = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $h_2 = 0,01 \text{ м}$, $h_a = 0,03 \text{ м}$, $h_3 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon'_s = \varepsilon''_s = 0,2$, $\varepsilon_* = 0,9$, $T_f = 1000 + 273 \text{ К}$, $T_* = 40 + 273 \text{ К}$.

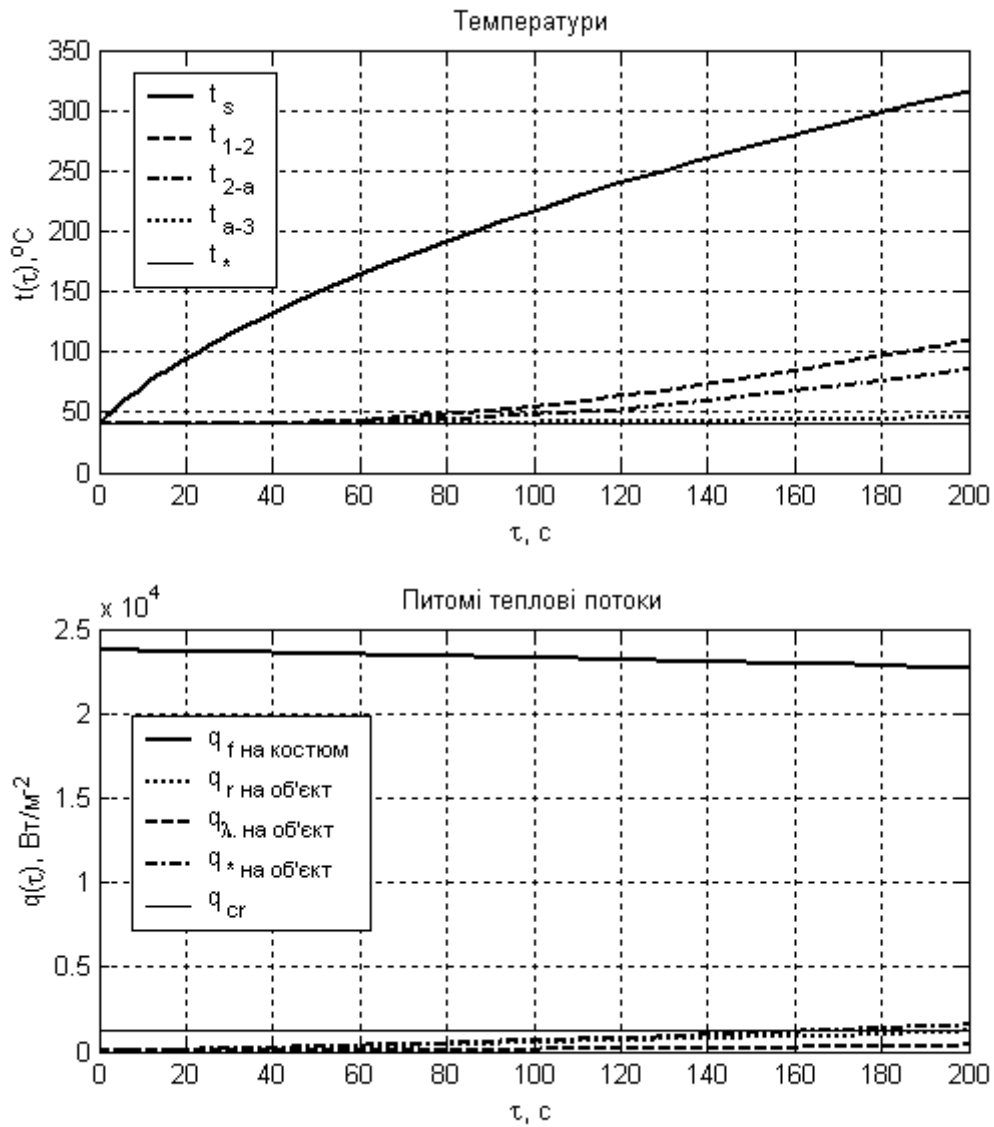


Рис. 3.21 Графіки залежності температур і питомих теплових потоків від часу теплового впливу τ у системі із теплозахисного костюма (що складається із відбиваючого термічно тонкого оптично непрозорого шару і двох теплопровідних оптично тонких шарів), повітряного прошарку і теплопровідного оптично тонкого шару одягу. Символами t_{1-2} , t_{2-a} , t_{a-3} позначено температуру на границях відповідних шарів

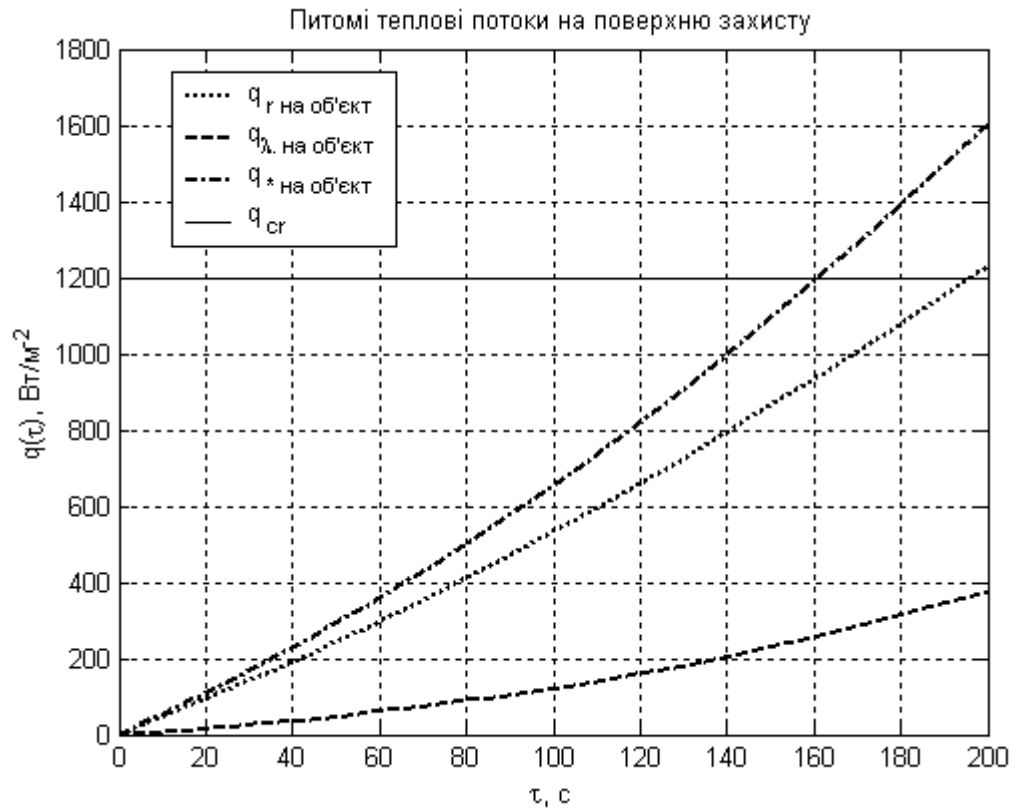


Рис. 3.22 Графіки залежності питомих теплових потоків від часу теплового впливу τ у системі із теплозахисного костюма (що складається із відбиваючого термічно тонкого оптично непрозорого шару і двох теплопровідних оптично тонких шарів), повітряного прошарку і теплопровідного оптично тонкого шару одягу (збільшений фрагмент графіка з рис. 3.21)

Згідно із рис.3.22 час захисної дії даного вогнезахисного костюма у заданій ситуації складає $\tau_{cr} \approx 161$ с.

Числові експерименти на моделі показують, що найбільш суттєво на час захисту впливають всі ступені чорноти, а також товщина відбиваючого шару.

Крива $t_s(\tau)$ показує, що для реалізації захисної дії матеріал відбиваючого шару костюма повинен витримувати температуру в декілька сотень градусів Цельсія. Внаслідок неперервності поля температур ця вимога повинна враховуватися і для першого теплоізоляційного шару.

3.7 Комп'ютерне моделювання дії відбиваючих екранів при пожежі у приміщенні

У даному підрозділі будуть наведені результати комп'ютерного моделювання дії теплозахисного відбиваючого покриття при пожежі у приміщенні на прикладі типових варіантів[29, 57, 66]. Буде продемонстрована дія одношарового і двошарового відбиваючих екранів у випадку повітряних прошарків, а також дії напівважкого теплозахисного костюма.

Всі результати є рішеннями відповідних систем диференціальних рівнянь, що утворюють математичну модель явища [57]. Відповідні моделі, які описують дію відбиваючих покриттів при пожежі у приміщенні, отримані об'єднанням двох систем рівнянь. Перша описує еволюцію відбиваючого покриття під дією гарячого середовища із заданою температурою T_f , друга – середню температуру газового середовища T_m при пожежі у приміщенні. При об'єднанні систем в першу підсистему замість T_f підставляється $T_m(\tau)$ із другої підсистеми. Рівняння другої підсистеми (пожежі у приміщенні) наведені у підрозділі 2.4., рівняння першої підсистеми – у відповідних підрозділах даного розділу. В описі природнім чином з'являється додатковий часовий параметр τ_{in} – момент вводу тіла (разом із його захистом) у приміщення, с.

Відмітимо наступну обставину, що може спростити моделювання. Введення захисних покриттів не впливає на розвиток пожежі у приміщенні. Це означає, що можна спочатку окремо, промодельовавши пожежу у приміщенні, отримати залежність $T_m(\tau)$, а потім в якості заданої функції часу підставляти її у систему, що моделює захисну дію покриттів.

Всі результати були отримані за допомогою комп'ютерних програм, написаних автором у середовищі Matlab [66]. Тексти цих програм, що пов'язані з даним розділом, наведені у додатках Г і Г' даної дисертації.

На рис. 3.23 і рис. 3.24 наведено результати моделювання дії одношарового і двошарового відбиваючих екранів із повітряними прошарками при пожежі у приміщенні.

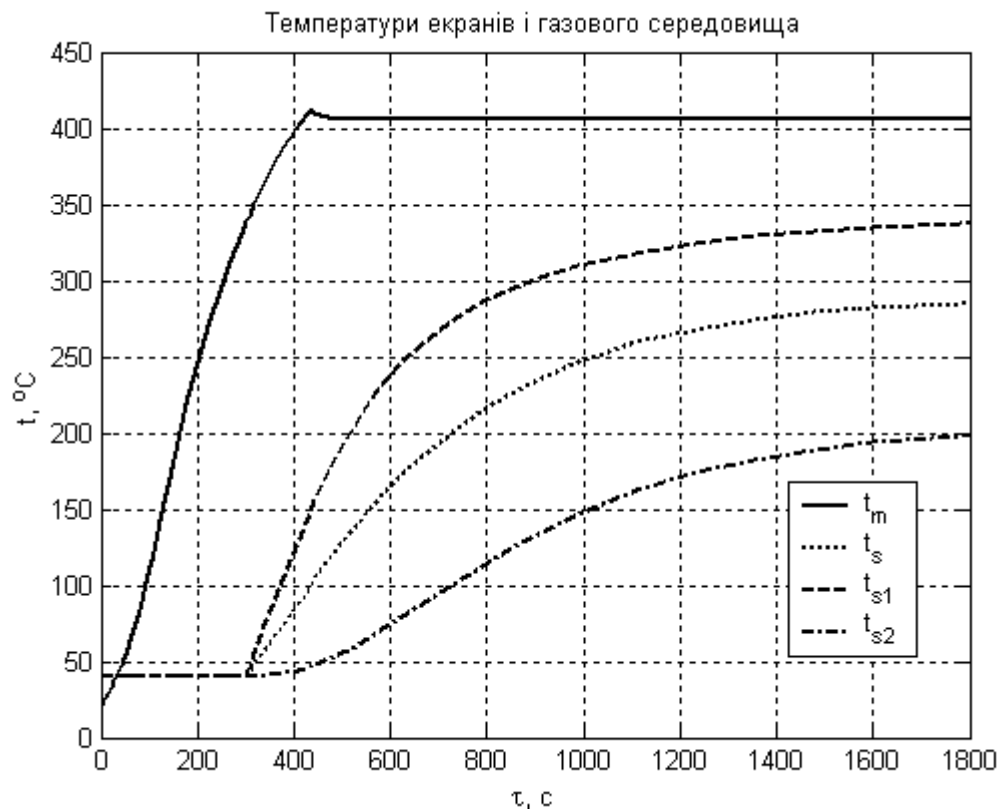


Рис. 3.23 Графіки залежності температур від часу пожежі при використанні одно- і двошарових захисних екранів із повітряними прошарками: t_m - середня температура газового середовища у приміщенні; t_s - температура відбиваючого шару одношарового екрану; t_{s1} і t_{s2} - відповідно, температури зовнішнього і внутрішнього відбиваючих шарів двошарового екрану

Товщини відбиваючого шару і повітряного прошарку одношарового екрану, зображеного на рис. 3.1, дорівнюють $h_s = 5 \cdot 10^{-3}$ м і $x_s = 5 \cdot 10^{-2}$ м, відповідно. Товщини відбиваючих шарів і повітряних прошарків двошарового екрану, зображеного на рис. 3.5, дорівнюють, відповідно, $h_{s1} = h_{s2} = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м і $x_1 = x_2 = 2,5 \cdot 10^{-2}$ м. Всі інші параметри співпадають із наведеними у роз'ясненнях до рис. 3.6. Така ситуація забезпечує однокові вагу і об'єм одношарового і двошарового екранів.

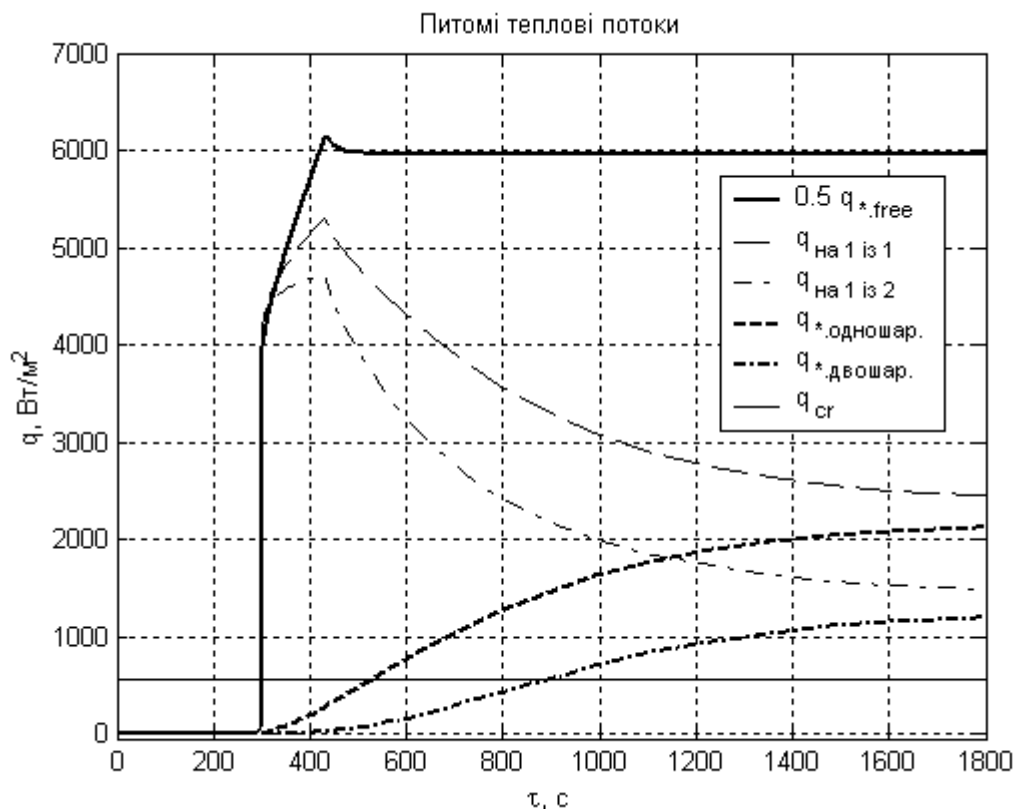


Рис. 3.24 Графіки залежності питомих теплових потоків від часу пожежі при використанні одно- і двошарових захисних екранів із повітряними прошарками

Чисельні значення параметрів, що задають характеристики пожежі у приміщенні, тут, як і в подальшому, співпадають із значеннями, наведеними у поясненнях до рис. 2.11. Об'єкт захисту потрапляє у приміщення в момент $\tau_{in} = 300 \text{ с}$ від початку пожежі.

Із графіків на рис. 3.23 витікає, що критичне значення температури (90°C) найближчих до об'єкту захисту поверхонь досягається у випадку одношарового екрану приблизно через 110 с, а у випадку двошарового екрану приблизно через 380 с після попадання у небезпечну зону.

На рис. 3.24 символами позначені лінії результуючих питомих теплових потоків, що падають: 1) $q_{*,free}$ - на незахищену поверхню; 2) $q_{\text{на } 1 \text{ із } 1}$ на відбиваючий шар одношарового екрану; 3) $q_{\text{на } 1 \text{ із } 2}$ - на 1-ий відбиваючий шар двошарового екрану; 4) $q_{*,одношар.}$ - на поверхню захисту одношарового екрану;

5) $q_{*, \text{двошар.}}$ - на поверхню захисту двошарового екрану; q_{cr} - критичний рівень питомого потоку.

Із графіків на рис. 3.24 витікає, що критичне значення питомого теплового потоку ($q_{cr} = 560 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) на поверхню захисту досягається у випадку одношарового екрану приблизно через 225 с, а у випадку двошарового екрану приблизно через 590 с після попадання у небезпечну зону.

Наведені числа показують, що з боку часів захисту двошаровий захисний екран у разі ефективніший за одношаровий.

Наступним об'єктом, захисна дія якого в умовах пожежі у приміщенні буде промодельована, є напівважкий теплозахисний костюм. Система рівнянь, яка описує його нагрівання, наведена у підрозділі 3.6. Чисельні значення параметрів костюму співпадають із тими, що використовуються у варіанті, представленому на рис. 3.21. Час потрапляння у приміщення, як і у попередніх випадках, дорівнює $t_{in} = 300 \text{ с}$.

На рис. 3.25 представлені графіки залежності температур від часу пожежі у системі, що складається із зовнішнього газового середовища, напівважкого теплозахисного костюму і покритої одягом поверхні, яку він захищає (дивись рис. 3.20). На графіку нанесені наступні лінії: t_m - середня температура газового середовища у приміщенні; t_s - температура зовнішнього (відбиваючого) шару костюму; t_{1-2} , t_{2-a} , t_{a-3} - відповідно, температури на границях 1-го і 2-го, 2-го і повітряного, повітряного і 3-го (одягу) прошарків; t_* - температура поверхні захисту (шкіри людини).

Із графіків витікає, що небезпечна температура ($t_{2-a} = 90^\circ\text{C}$) досягається лише через 1650 с після попадання у небезпечне середовище пожежі у приміщенні.

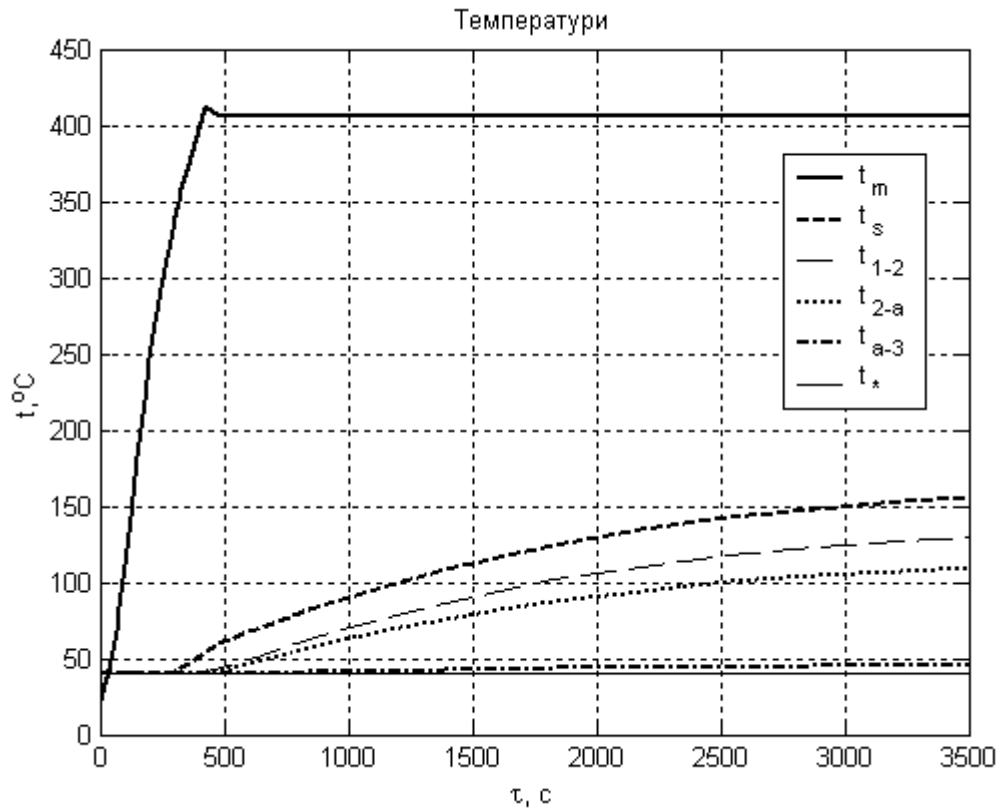


Рис. 3.25 Графіки залежності температур від часу пожежі при використанні напівважкого теплозахисного костюму

На рис. 3.26 представлені графіки залежності питомих теплових потоків від часу пожежі у системі, що складається із зовнішнього газового середовища, напівважкого теплозахисного костюму і покритої одягом поверхні, яку він захищає. Символами позначені лінії результуючих питомих теплових потоків:

- 1) $0,1 \cdot q_{*,free}$ - десята частина питомого теплового потоку, який падає на незахищену поверхню;
- 2) q_* - питомий тепловий потік на захищену напівважким теплозахисним костюмом та одягом поверхню захисту (шкіру людини);
- 3) q_{cr} - критичний рівень потоку.

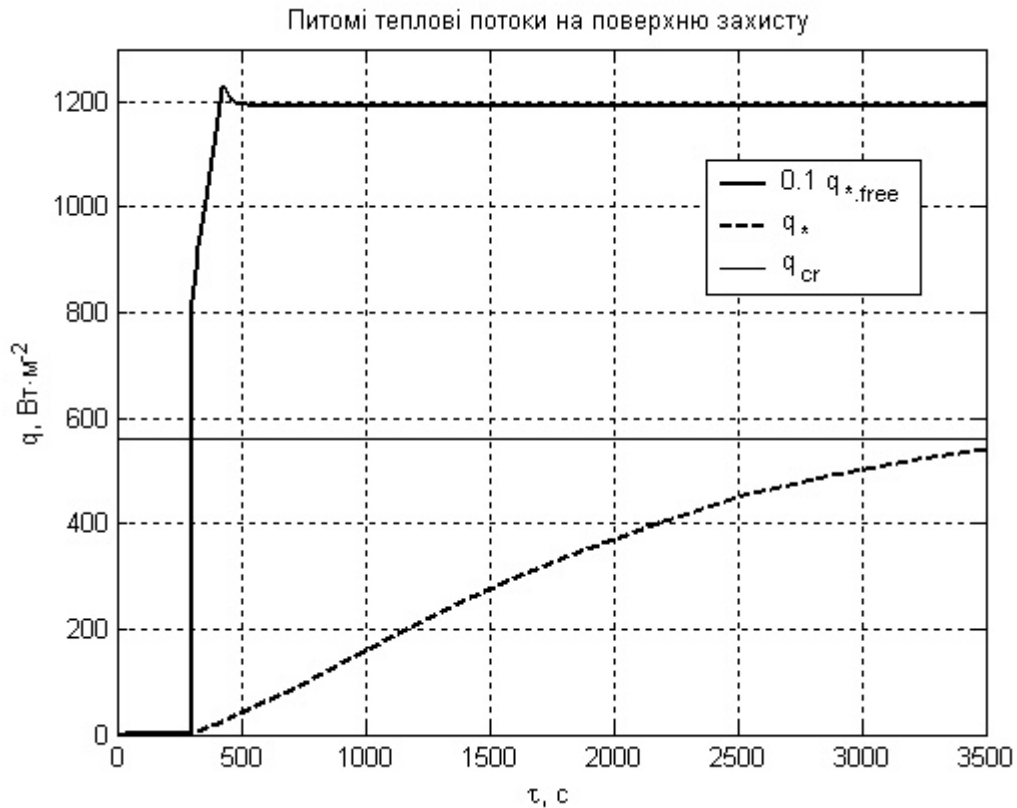


Рис. 3.26 Графіки залежності питомих теплових потоків від часу пожежі при використанні напівважкого теплозахисного костюму

Через те, що величина $q_* < q_{cr} = 560 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, що відповідає умові безпеки при довготривалому тепловому опроміненню незахищеної людини, ситуація формально безпечна. Однак у людини, захищеної теплозахисним костюмом, відсутній відвід тепла у зовнішнє середовище, що ставить питання про спроможність організму утилізувати такий потік тепла довготривалий час (більш ніж 15 хвилин). Ця обставина вимагає відповідних медико-біологічних досліджень щодо визначення реального значення q_{cr} для даної ситуації.

3.8 Висновки

1. Вперше побудовано математичний опис захисної дії одношарового тепловідбиваючого екрану із повітряним прошарком, особливістю якого є те, що він зводиться до звичайного диференційного рівняння залежності температури екрану від часу, для рішення якого в умовах сталого теплового

впливу та при пожежі у приміщенні розроблено алгоритми та побудовані відповідні комп'ютерні програми, а також побудовано аналітичне спрощене рішення задачі прогріву такого екрану та вказана область застосування цього рішення. Показано, що найбільше час захисту екрану збільшується із зменшенням ступенів чорноти обох поверхонь екрану, у той час як із збільшенням товщини повітряного прошарку захист покращується не суттєво, зокрема при зростанні ширини повітряного прошарку від 0,01 м до 0,1 м час захисту зростає лише на 20%.

2. Вперше побудовано математичний опис захисної дії двошарового тепловідбиваючого екрану із повітряними прошарками, особливістю якого є те, що він зводиться до системи звичайних диференціальних рівнянь залежності температур шарів екрану 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 побудовано аналітичне спрощене рішення задачі прогріву такого екранів та вказана область застосування цього рішення. Показано, що час захисної дії двошарового екрану у $\sim 1,5$ -2 рази перевищує час захисту відповідним одношаровим екраном сумарної товщини.

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

4. Побудовано математичний опис захисної дії одношарового відбиваючого теплозахисного екрану з теплопровідним прошарком, особливістю якого є врахування внутрішнього променистого теплового потоку у наближенні оптично тонкого прошарку, а також розроблені алгоритми і відповідні комп'ютерні програми, що вирішують систему рівнянь опису в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні. Показано, що найбільше час захисту екрану збільшується із зменшенням ступенів чорноти

обох поверхонь відбиваючого шару та при збільшенні товщини теплопровідного прошарку, зокрема при зростанні товщини цього прошарку від 1 см до 2 см час захисту зростає більш ніж у 2 рази.

5. Побудовано математичний опис захисної дії двошарових відбиваючих теплозахисних екранів з теплопровідними прошарками, особливістю якого є врахування внутрішнього променистого теплового потоку у наближенні оптично тонких прошарків, а також розроблені алгоритми і відповідні комп'ютерні програми, що вирішують системи рівнянь опису в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні. Показано, що час захисної дії двошарового екрану у $\sim 1,5$ рази перевищує час захисту відповідним одношаровим екраном сумарної товщини.

6. Побудовано математичну модель захисної дії напівважкого теплозахисного костюма, особливістю якої є врахування крім зовнішнього термічно тонкого оптично непрозорого відбиваючого шару ще двох теплопровідних оптично тонких прошарків, повітряного прошарку між костюмом і людиною, і додатковий прошарку одягу, який діє як теплопровідний оптично тонкий шар, а також розроблені алгоритми і побудовані комп'ютерні програми, що вирішують системи рівнянь моделі в умовах сталого теплового впливу та при пожежі у приміщенні.

РОЗДІЛ 4

ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ ТІЛ ПОКРИТТЯМ, ЩО СПУЧУЄТЬСЯ

У даному розділі буде досліджене питання про захист поверхонь тіл від теплового впливу пожежі за допомогою покриття, що спучується. Буде розроблена математична модель прогрівання відповідного вогнезахисного покриття [35] та варіанти застосування цієї моделі [36, 37].

4.1 Математична модель вогнезахисних покриттів, що спучуються

Одним з поширених способів захисту поверхонь тіл від теплового впливу пожежі є нанесення теплоізоляційних покриттів. У даному підрозділі буде викладена побудована автором математичної модель, що відображає функціонування теплоізоляційного матеріалу, здатного спучуватися.

У зв'язку з великим практичним значенням розглянутій проблемі присвячена значна кількість як експериментальних, так і теоретичних робіт [138, 180]. Як правило, експерименти охоплюють обидві стадії процесу теплозахисту - і спучування покриття й подальший теплоперенос у пористому матеріалі, що утвориться при спучуванні. Теоретичні частини досліджень як правило присвячені окремим етапам теплозахисту. У зв'язку зі складністю опису процесів кількість аналітичних результатів незначна, і охоплюють вони окремі аспекти проблеми (дивись, наприклад [34]). Усе більш широкі теоретичні дослідження проводяться за допомогою чисельного рішення відповідних математичних моделей [144].

Дана робота є спробою описати в рамках єдиного підходу обидві стадії функціонування теплозахисного покриття (і спучування і подальшу дію).

Пропонується модель поведінки покриття, що спучується при нагріванні, яка відповідає наступної послідовності фізичних процесів. Спочатку захисне покриття являє собою суцільну речовину з незначним змістом (або взагалі без) вкраплень газової фази. Нагрівання походить від однієї з поверхонь покриття. У міру підвищення температури покриття маса газової фази

(внаслідок хімічного розпаду або просто фазового переходу) і тиск у ній нарастають. Збільшення температури понад відповідне критичне значення приводить до текучості матеріалу, що реалізує можливість значного збільшення об'єму газового компонента. Початок цього процесу (до стадії істотного об'єднання газових областей) є спучуванням без делокалізації газу. У ході подальшого нагрівання питомий об'єм газових областей може досягти критичного значення, при якому відбувається руйнування стінок між вкрапленнями газу (спучування приводить до делокалізації). У такій області рух газу стає необмеженим. Газ виноситься із системи, знімаючи напругу в даній області. Глибина області делокалізації руху газу слідом за товщиною області прогріву покриття нарастає в напрямку від гарячої поверхні. Описана послідовність процесів відображена у запропонованій математичній моделі.

Основою моделі є погляд на речовину покриття, як на суміш простіших речовин (наприклад: матеріал покриття - трикомпонентна суміш із вихідної речовини й двох продуктів її термічного розпаду, а конденсована й газоподібна фази однієї речовини є різними компонентами суміші). Відповідно до такого погляду склад речовини в точці з радіусом-вектором $\mathbf{r}$, м, у момент часу τ , с, буде задаватися набором масових концентрацій $\rho_i(\mathbf{r}, \tau) \equiv dm_i / dV$, де dm_i – маса i -го компонента, кг, у малому об'ємі dV , м³, покриття; питома об'ємна ізобарна теплоємність речовини покриття може бути представлена у вигляді

$$c'_p = \sum_i \rho_i \cdot c_{p,i}, \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}, \quad (4.1)$$

де $c_{p,i}(T)$ – питома масова ізобарна теплоємність i -го компонента, Дж·кг⁻¹·К⁻¹, при абсолютній температурі $T(\mathbf{r}, \tau)$, К. Сума $\sum_i$ береться по всім n можливим компонентам.

Концентрації $\rho_i(\mathbf{r}, \tau)$ задовольняють рівнянням матеріального балансу

$$\frac{\partial \rho_i(\mathbf{r}, \tau)}{\partial \tau} + \text{div}[\mathbf{w}_i \cdot \rho_i(\mathbf{r}, \tau)] = R_i, \quad (4.2)$$

де $R_i(T, \mathbf{p})$ – 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; векторним символом $\mathbf{p}$ відображено ту обставину, що величина R_i може залежати від декількох із n парціальних густин ρ_j . Явний вид функцій $R_i(T, \mathbf{p})$ вважається відомим.

Величина $\mathbf{w}_i(\mathbf{r}, \tau)$ є усередненою по перерізу покриття середньовитратною швидкістю руху i -го компонента відносно поверхні захисту, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. Усі компоненти, що не є газами, а також газові компоненти в області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 4.1, де x_{del} - координата границі області делокалізації (delocalization) руху газової компоненти) рухаються з однаковою швидкістю, а саме швидкістю остову $\mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau)$:

$$\mathbf{w}_i(\mathbf{r}, \tau) = \mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau).$$

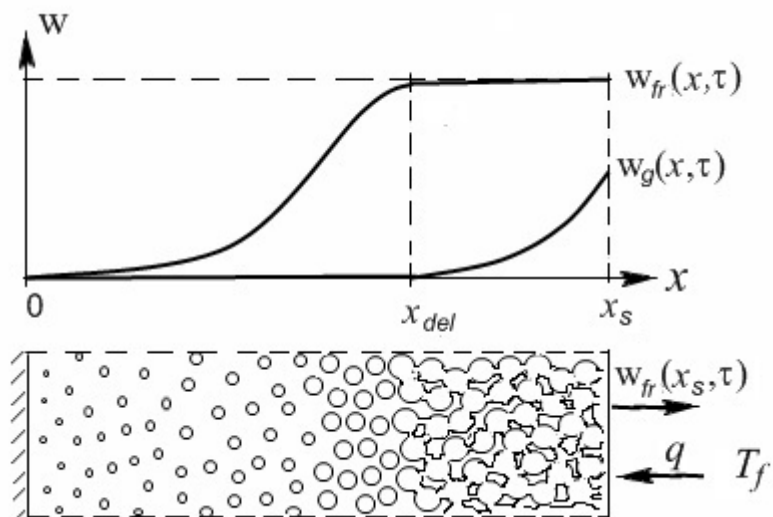


Рис. 4.1 Графіки залежності швидкості остова та швидкості газового компонента покриття від відстані (x) від поверхні захисту, і просторова схема структури покриття, що спучується

При наявності області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1) і нехтуванні взаємною дифузією газів 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 $\mathbf{w}_g(\mathbf{r}, \tau)$ – усереднена по перерізу покриття середньовитратна швидкість руху газу відносно остову, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Система n рівнянь (4.2) доповнюється співвідношенням енергетичного балансу:

$$c'_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{w}_{fr} \cdot \text{grad } T \right) - \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) = - \sum_{j=1}^{n_r} \Delta H_j \cdot R_j - c'_{p.g} \cdot \mathbf{w}_g \cdot \text{grad } T, \quad (4.3)$$

де $\lambda(T, \rho)$ – коефіцієнт теплопровідності покриття, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; $\Delta H_j(T)$ – питомий тепловий ефект j -ої реакції (або фазового перетворення), $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, взятий у розрахунку на одиницю маси j -ої компонента, який є реагентом даної реакції, а R_j – об'ємна щільність швидкості зміни маси цього реагенту, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;

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

$$c'_{p.g} = \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot c_{p,i}, \quad \text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1},$$

де символ $\sum_i^{(g)}$ позначає суму по всіх газових компонентах.

Відзначимо, що у рівнянні (4.3) останній доданок відрізняється від нуля тільки в області делокалізації газових компонентів ($x > x_{del}$ на рис. 4.1). Рівняння (4.3) не враховує внесків в енергобаланс руху кістяка покриття, деформаційних напруг у ньому, взаємної дифузії компонентів газу, в'язкого тертя.

Для вирішення системи $(n+1)$ рівнянь (4.2), (4.3), необхідно знати швидкості остову $\mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau)$ і газу $\mathbf{w}_g(\mathbf{r}, \tau)$.

Для визначення $\mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau)$ розглянемо фіксований малий елемент речовини покриття, що заповнює об'єм dV . Урахувавши те, що швидкість руху поверхонь даного елемента і є $\mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau)$, розглянувши потік вектора $\mathbf{w}_{fr}(\mathbf{r}, \tau)$ крізь ці поверхні, отримаємо необхідне співвідношення

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\mathbf{w}_{fr}) &= \frac{1}{dV} \left[\frac{d}{d\tau} (dV) \right] = \frac{1}{dV} \left[\frac{d}{d\tau} \left(\sum_i dm_i \cdot v_i \right) \right] = \\ &= \sum_i \left(\frac{d^2 m_i}{dV d\tau} \cdot v_i + \frac{dm_i}{dV} \cdot \frac{dv_i}{d\tau} \right) = \sum_i \left(R_i \cdot v_i + \rho_i \cdot \frac{dv_i}{d\tau} \right). \end{aligned} \quad (4.4)$$

Тут $v_i(T, \boldsymbol{\sigma}) \equiv dV_i / dm_i$ - питомий об'єм i -го компонента, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, де dV_i й dm_i - об'єм і маса i -го компонента в об'ємі dV покриття; $\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{r}, \tau)$ - тензор напруг у даній області покриття, Па.

Трансформуємо вираз (4.4) там, де він не малий, а саме в області спучування. Врахуємо, що в області спучування питомі об'єми газових компонентів значно більше, а щільності значно менше, ніж такі ж характеристики конденсованої фази. В результаті отримуємо рівняння:

$$\operatorname{div}(\mathbf{w}_{fr}) = \sum_i^{(g)} \left(R_i \cdot v_i + \rho_i \cdot \frac{dv_i}{d\tau} \right). \quad (4.5)$$

Розглядаючи газові компоненти як ідеальні гази, можна зв'язати їхній

питомий об'єм з іншими параметрами стану:

$$v_i = \frac{R \cdot T}{\mu_i \cdot p}, \quad (4.6)$$

де $R = 8,314 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ – універсальна газова стала; μ_i – молярна маса i -го компонента, $\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$; $p(\mathbf{r}, \tau)$ – тиск газу, Па, який для локалізованої газової фази визначається діагональними компонентами тензора напруг покриття σ у місці вкраплення газової фази.

В області спучування речовина покриття веде себе подібно до рідини. Через це процес спучування тут можна розглядати, як ізобарний, через що для газових компонент, згідно з залежністю (4.6),

$$\frac{dv_i}{d\tau} = \frac{R}{\mu_i \cdot p} \cdot \frac{dT}{d\tau}. \quad (4.7)$$

Використовуючи вираз (4.7), отримуємо, що

$$\begin{aligned} \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot \frac{dv_i}{d\tau} &= \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot v_i \cdot \frac{1}{v_i} \cdot \frac{dv_i}{d\tau} = \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot v_i \cdot \frac{R}{\mu_i \cdot p \cdot v_i} \cdot \frac{dT}{d\tau} = \\ &= \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot v_i \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\tau} = r_V \cdot \frac{1}{T} \cdot \frac{dT}{d\tau}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

де

$$r_V = \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot v_i = \sum_i^{(g)} \frac{dV_i}{dV} \quad (4.9)$$

- об'ємна частка газових включень у загальному об'ємі покриття.

Із рівняння енергетичного балансу (4.3) (із врахуванням того, що в процесі спучування $\mathbf{w}_g(\mathbf{r}, \tau) = 0$) витікає співвідношення

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + \mathbf{w}_{fr} \cdot \text{grad } T = \frac{1}{c'_p} \cdot \left(\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) - \sum_{j=1}^{n_r} \Delta H_j \cdot R_j \right). \quad (4.10)$$

В результаті формула (4.5) набуває кінцевого вигляду

$$\text{div}(\mathbf{w}_{fr}) = \sum_i^{(g)} R_i \cdot v_i + \frac{r_V}{c'_p \cdot T} \cdot \left(\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) - \sum_{j=1}^{n_r} \Delta H_j \cdot R_j \right). \quad (4.11)$$

Визначення тиску локалізованої газової фази вимагає або рішення не розглянутої тут задачі теорії пружності [241], або модельних припущень, що перевіряють експериментально. У даній роботі прийнято, що подібно рідини

$$p = p_0 + \Delta p(T, v), \quad (4.12)$$

де p_0 – тиск у зовнішньому середовищі, Па; $\Delta p(T, v)$ – надлишковий тиск у газових вкрапленнях, Па, який вважається відомим. Цей тиск є функцією, як температури T , так і розміру вкраплень, і отже питомого об'єму речовини покриття $v, \text{м}^3 \text{кг}^{-1}$, який дорівнює

$$v(\mathbf{r}, \tau) = \frac{1}{\sum_i \rho_i(\mathbf{r}, \tau)}. \quad (4.13)$$

Відмітимо, що величина

$$\rho(\mathbf{r}, \tau) = \sum_i \rho_i(\mathbf{r}, \tau) \quad (4.14)$$

є загальною густиною покриття, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Відзначимо, що рівняння (4.11) є головним наближенням в області локалізованої газової фази ($x < x_{del}$ на рис. 4.1). У сусідній області делокалізованої газової фази ($x > x_{del}$) надлишок газів, що утворюється, йде із системи, не беручи участь у спучуванні покриття. Тут рівняння, що визначає швидкість руху остову покриття, в основному наближенні має вигляд

$$\operatorname{div}(\mathbf{w}_{fr}) = 0. \quad (4.15)$$

Рух газу в області делокалізації є течією в'язкої рідини в пористому середовищі. У зв'язку із цим усереднена по перерізу покриття середньовитратна швидкість цього руху задається співвідношенням [242]

$$\mathbf{w}_g = -C_w \cdot k_F \cdot \frac{d_c^2}{\rho_g \cdot \nu_g} \cdot \operatorname{grad} p, \quad (4.16)$$

де C_w – обумовлений структурою пор безрозмірний коефіцієнт порядку одиниці; k_F – частка площі перерізу пор у площі перерізу покриття; d_c – середній діаметр каналу руху, м; ν_g – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; ρ_g – реальна густина газу у каналі руху, яка дорівнює

$$\rho_g \equiv \frac{\sum_i^{(g)} dm_i}{\sum_i^{(g)} dV_i} = \frac{\sum_i^{(g)} \frac{dm_i}{dV}}{\sum_i^{(g)} \frac{dV_i}{dV}} = \frac{\sum_i^{(g)} \frac{dm_i}{dV}}{\sum_i^{(g)} \frac{dV_i}{dm_i} \cdot \frac{dm_i}{dV}} = \frac{\sum_i^{(g)} \rho_i}{\sum_i^{(g)} \nu_i \cdot \rho_i} = \frac{\sum_i^{(g)} \rho_i}{r_V}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (4.17)$$

При записі останнього співвідношення передбачається, що в області делокалізації в каналах опиняється більша частина газової фази. Відзначимо, що серед газових компонентів у порах (при розгляді ситуації повторного прогрівання) варто передбачити повітря.

Відмітимо, що величину w_g , разом із ρ_g , визначається у області делокалізації, у якій спучення вже відбулося. Як правило, у цій області об'єм газової фази значно перевищує об'єм конденсованої складової покриття. Через це там

$$r_V = \sum_i^{(g)} \rho_i \cdot v_i = \sum_i^{(g)} \frac{dV_i}{dV} \approx \sum_i \frac{dV_i}{dV} = 1.$$

Загальний тиск газового середовища у спученому покритті у області делокалізації будемо визначати за рівнянням стану суміші ідеальних газів

$$p = \frac{1}{r_V} \sum_i^{(g)} \frac{\rho_i}{\mu_i} \cdot R \cdot T. \quad (4.18)$$

Як відзначалося вище, поведінки покриття істотно залежить від можливості необмеженого руху газової фази. Ми припускаємо, що гази стають делокалізованими, коли питомий об'єм речовини покриття v перевищує якесь критичне значення $v_{del}(T, \sigma)$. Відповідно до цього уявлення рівняння, що визначає положення границі області делокалізації ($x_{кр}$ на рис. 4.1), має вигляд:

$$v(\mathbf{r}_{del}, \tau) = v_{del}(T(\mathbf{r}_{del}, \tau), \sigma(\mathbf{r}_{del}, \tau)), \quad (4.19)$$

де v визначається співвідношенням (4.13). Іншими словами, рішення рівняння (4.19) ($\mathbf{r}_{del}(\tau)$) є рівнянням руху границі області делокалізації. Відповідно до цього величина

$$\mathbf{w}_{del}(\tau) = \frac{d\mathbf{r}_{del}(\tau)}{d\tau}, \quad (4.20)$$

є швидкістю руху границі області делокалізації, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Задача прогріву покриття, що спучується, зводиться до рішення системи $n+3$ рівнянь (n рівнянь (4.2), рівняння (4.3), рівняння (4.12) і рівняння (4.5)) щодо $n+3$ невідомих: n концентрацій $\rho_i(\mathbf{r}, \tau)$, температури $T(\mathbf{r}, \tau)$, тиску $p(\mathbf{r}, \tau)$ і швидкості руху остову $\mathbf{w}_f(\mathbf{r}, \tau)$. В області локалізації рівняння (4.5) приймає вид (4.11).

У делокалізованій газовій області рівняння (4.5) має простий вигляд (4.15). Крім того у делокалізованій області до невідомих величин додається невідома швидкість руху газу $\mathbf{w}_g(\mathbf{r}, \tau)$ і рівняння (4.16) для її визначення. У цій області тиск задається не загальним співвідношенням (4.12), а формулою (4.18).

Граничними умовами до розглянутої системи рівнянь є неперервність потоків маси компонент й енергії на границях покриття [229]. Нагадаємо, що границя із поверхнею захисту ($x=0$ на рис. 4.1) є нерухомою й непроникною для речовини (тобто відповідні потоки маси дорівнюють нулю), а рух зовнішньої границі (x_s на рис. 4.1) описується рівнянням

$$\frac{d\mathbf{r}_s(\tau)}{d\tau} = \mathbf{w}_f(\mathbf{r}_s(\tau), \tau), \quad \mathbf{r}_s(0) = \mathbf{r}_{s,0}, \quad (4.21)$$

де $\mathbf{r}_{s,0}$ - початкова координата зовнішнього боку покриття. Зовнішня границя покриття проникна тільки для газових компонентів у випадку попадання її в область делокалізації. Умова безперервності потоку енергії на цій границі має вигляд:

$$-\lambda|_s \cdot \frac{\partial T}{\partial n}|_s + [c'_{p,g} \cdot w_g \cdot (T - T_0)]_s = q_{con} + q_r, \quad (4.22)$$

де символом $\partial/\partial n$ позначена складова градієнта по нормалі до поверхні; символ $|_s$ - указує на узяття величин на граничній поверхні; T_0 – температура початку відліку ентальпії, К; q_{con} і q_r – падаючі на поверхню покриття питомі теплові

конвекційний і променистий потоки від зовнішніх джерел, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

У випадку теплообміну із гарячим середовищем питомий конвекційний тепловий потік на границі задається співвідношенням

$$q_{con} = \alpha \cdot [T|_s - T_f], \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (4.23)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі даної поверхні у зовнішнє середовище, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$; T_f – температура середовища, К.

Якщо у процесі прогріву міняється характер локалізації газу в покритті, то рішення також розбивається на дві просторових області (локалізовану і делокалізовану). На границі між цими областями (в одномірному випадку $x = x_{del}$ на рис. 4.1) безперервними є температура, тиск, швидкість руху остова, потоки маси компонент, що у випадку газових компонентів дає додаткове співвідношення

$$[\rho_i \cdot (\mathbf{w}_{fr} - \mathbf{w}_{del})]_{x_{del}-0} = [\rho_i \cdot (\mathbf{w}_g + \mathbf{w}_{fr} - \mathbf{w}_{del})]_{x_{del}+0}, \quad (4.24)$$

де символ $|_{x_{del} \pm 0}$ - указує на узяття величин на відповідній стороні граничної поверхні.

На цій границі неперервність потоку енергії, неперервності потоку маси і нехтування зміною енергії покриття при переході від локалізованих до делокалізованих газових областей приводить до умови неперервності теплового потоку

$$-\left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right]_{x_{del}-0} = -\left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right]_{x_{del}+0}. \quad (4.25)$$

Відразу ж відзначимо, що величина коефіцієнта теплопровідності λ по

різні сторони від границі делокалізації різняться. Дійсно, у випадку значного об'єму газової фази, яка має нехтовно малу теплопровідність, коефіцієнт теплопровідності спученого матеріалу можна оцінити співвідношенням

$$\lambda(\mathbf{r}, \tau) = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\kappa)} \lambda_i \cdot \frac{dV_i}{dV} = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\kappa)} \lambda_i \cdot \frac{dV_i}{dm_i} \cdot \frac{dm_i}{dV} = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\kappa)} \lambda_i \cdot v_i \cdot \rho_i \cdot \quad (4.26)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ої конденсованої фази покриття, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; 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. При переході від локалізованого до делокалізованого стану у співвідношенні (4.26) змінюється множник C_λ . Він зменшується, що відображає зменшення коефіцієнта теплопровідності внаслідок розриву зв'язків у конденсованій (і тому теплопровідній) частині покриття.

Початковою умовою розглянутої задачі природно прийняти однорідний розподіл густин компонент $\rho_i(\mathbf{r}, \tau)$, температури $T(\mathbf{r}, \tau)$ і тиску в покритті, а також нульове значення швидкостей.

4.2 Математичне моделювання вогнезахисної дії покриття, що спучується внаслідок дії одного активного компонента

У попередньому підрозділі була розроблена доволі загальна модель покриття, що спучується [35]. Виникає питання об перевірці адекватності цієї моделі. Одним із шляхів перевірки є використання моделі для опису реальних покриттів із подальшим порівнянням модельних і експериментальних результатів. Модель має досить загальний вигляд, через що дає можливість використання великої кількості допоміжних параметрів. Задача полягає у тому, щоб в рамках моделі описати реальне покритті із використанням мінімальної кількості додаткових припущень.

Покриттям, функціонування якого буде моделюватися, є здатне спучуватися ксерогелеве неорганічне покриття СК-1, протипожежна ефективність якого була підтверджена експериментально [15]. Буде розглянуто простий варіант складу речовини покриття – варіант одного активного (тобто здатного до генерації газу) компонента. Основні результати, представлені у даному підрозділі, були викладені у роботі [36].

Основою моделі є погляд на речовину покриття, як на суміш більш простих речовин, які при нагріванні здатні утворити компоненту в газовій фазі. В області температур, у якій покриття поводить себе подібно до рідини, наявність газового компонента приводить до спучування.

У даному дослідженні припускається кілька додаткових спрощень:

1) склад покриття містить чотири компоненти: одну хімічно інертну конденсовану, яку ми будемо позначати індексом « p » (passive), одну конденсовану активну компоненти, яку ми будемо позначати індексом « a » (active), що при нагріванні ендотермічно розпадається на інертні конденсовану « b » і газову компоненти « $g1$ » (gas 1);

2) на стадії делокалізації газового компонента винос надлишку утворюваних газів проходить настільки швидко, що можна при цьому процесі нехтувати теплообміном між газовим потоком і спученим матеріалом. Дана обставина дозволяє, не визначаючи швидкість руху газового потоку, врахувати пов'язаний з газом тепловий потік від зони утворення газу відносно простою зміною теплоти утворення газу;

3) дерев'яний зразок, на який нанесене покриття, поводить себе як хімічно інертна речовина.

Відповідно до експерименту [15] просторову ситуацію можна розглядати як одновимірну. Істотна просторова координата (x) спрямована по нормалі до поверхні захисту. Ця координата відраховується від границі розділу дерев'яної пластини і захисного покриття убік покриття. Відповідно до такого погляду склад речовини в точці з координатою x , м, у момент часу τ , с, буде задаватися

набором масових парціальних концентрацій $\rho_i(x, \tau) \equiv dm_i / dV$, де dm_i – маса i -го компонента, кг, у малому об'ємі dV , м³, покриття; питома об'ємна ізобарна теплоємність речовини покриття буде представлена у вигляді суми (4.1). При цьому суми виду $\sum_i$ містить 4 доданки ($i = p, a, b, g1$).

В подальшому для опису покриття ми будемо використовувати локальну систему координат, що рухається зі швидкістю остову покриття $w_{fr}(x, \tau)$. В цій системі просторова координата x' матеріальної точки покриття, яка на початку (при $\tau = 0$) мала нерухому координату x , буде мати величину

$$x'(x, \tau) = x + \int_0^\tau w_{fr}(x'(x, \tau''), \tau'') d\tau'', \quad (4.27)$$

а величина об'єму dV елементарного шару покриття, у якому міститься маса dm_i , дорівнюватиме

$$dV = F \cdot dx', \text{ м}^3, \quad (4.28)$$

де F - площа повздовжнього перерізу покриття, м².

Концентрації ρ_i задовольняють рівнянням матеріального балансу (4.2). Запишемо ці рівняння для елементарних мас компонентів $dm_i = \rho_i \cdot dV$, які заповнюють елементарний об'єм величиною dV , що рухається разом із покриттям.

Рівняння, що описує матеріальний баланс активної компоненти, має вигляд

$$\frac{\partial dm_a(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_a, \quad (4.29)$$

де $d\tilde{R}_a = d\tilde{R}_i$ при $i = a$, а $d\tilde{R}_i \equiv R_i \cdot dV$, а R_i – 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.

Відповідно до 1-го спрощення маса пасивного компонента не змінюється, тобто

$$d\tilde{R}_p = 0 \quad (4.30)$$

і

$$dm_p = dm_{p,0} = \text{const}, \quad (4.31)$$

де $dm_{p,0}$ – початкова маса пасивного компонента у об'ємі dV .

Із припущення про те, що реалізується тільки реакція розпаду на два компоненти, і закону збереження маси впливають співвідношення

$$d\tilde{R}_b = -(1 - k_{g1}) \cdot d\tilde{R}_a, \quad (4.32)$$

$$d\tilde{R}_{g1} = -k_{g1} \cdot d\tilde{R}_a, \quad (4.33)$$

де k_{g1} – частка маси активного компонента, що при розпаді переходить у газову фазу.

Рівняння, що описує матеріальний баланс компонента b , співпадає з рівнянням (4.29) (при заміні індексів a на b). З цієї обставини і рівняння (4.32) витікає, що

$$dm_b = dm_{b,0} + (1 - k_{g1})(dm_{a,0} - dm_a), \quad (4.34)$$

де $dm_{a,0}$ і $dm_{b,0}$ – відповідно, початкові маси компонентів a і b у об'ємі dV . (У подальшому будемо вважати, що $dm_{b,0} = 0$.)

Рівняння матеріального балансу газової компоненти має вигляд

$$\frac{\partial dm_{g1}(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_{g1} - \frac{\partial}{\partial x'}(w_{g1} \cdot \rho_{g1}) \cdot dV, \quad (4.35)$$

Нагадаємо, що усі компоненти, що не є газами, а також газові компоненти в області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 4.1), у нерухомій системі координат у заданій точці покриття рухаються з однаковою швидкістю, а саме швидкістю остову w_{fr} . При наявності області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1) газова компонента рухається з швидкістю

$$w_{g1} = w_{fr} + w_g,$$

де w_g – усереднена по перерізу покриття середньовитратна швидкість руху газу відносно остову, $m \cdot s^{-1}$.

З щойно викладеного витікає, що в області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 4.1), де $w_g = 0$, із співвідношень (4.29), (4.33) і (4.35) витікає, що

$$dm_{g1} = dm_{g1.0} + k_{g1} \cdot (dm_{a.0} - dm_a), \quad (4.36)$$

де $dm_{g1.0}$ – початкова маса газового компонента у об'ємі dV . (У подальшому будемо вважати, що $dm_{g1.0} = 0$.)

У даній моделі ми не будемо визначати величину w_g у області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1). Будемо вважати, що вся надлишкова газова компонента дуже швидко виноситься із покриття. Формально це означає, що права частина рівняння (4.35) близька до нуля. В цій області процеси газів будуть розглядатися, як ізобарні при тиску $p = p_0$, де p_0 – тиск зовнішнього середовища.

Функція, що задає швидкість розпаду активного компонента моделюється співвідношенням

$$d\tilde{R}_a(m_a, T) = -dm_a \cdot \sum_{j=1}^3 \frac{k_{a,j}}{\tau_{a,j}} \cdot \exp\left(\frac{T_{a,j}}{T}\right) \cdot del(T - T_{aa,j}, dT_{a,j}), \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.37)$$

де $\tau_{a,j}$, с, й $T_{a,j}, k_{a,j}, T_{aa,j}, dT_{a,j}$, К ($j=1, 2, 3$) – 13 констант моделі; символом $del(z, dz)$ позначена розширена дельта-функція:

$$del(z, dz) \equiv \frac{1}{\pi} \cdot \frac{dz}{z^2 + (dz)^2}.$$

Швидкість розпаду виду (4.37) дозволяє (при відповідному виборі параметрів) отримати особливості у залежності поля температур покриття $T(x, \tau)$ при температурах T_1, T_2, T_3 (особливо при найменшій із них).

Система 4-ох рівнянь (4.29), (4.31), (4.34), (4.35) (або (4.36)) відносно невідомих $dm_a, dm_p, dm_b, dm_{g1}$ доповнюється співвідношенням енергетичного балансу (4.3) відносно невідомого поля температур $T(x', \tau)$. Це рівняння у даному випадку приймає вигляд:

$$c'_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x'} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x'} \right) = -Q_R - \Delta Q_{g.w}, \quad (4.38)$$

де Q_R – загальна об'ємна локальна щільність стоку ентальпії реакції розпаду, Вт·м⁻³, яка дорівнює тепловому ефекту реакції помноженому на її швидкість. Виражаючи тепловий ефект через ентальпії компонентів, отримаємо співвідношення

$$Q_R = [H_a - (1 - k_{g1}) \cdot H_b - k_{g1} \cdot H_{g1}] \cdot R_a, \quad (4.39)$$

де $H_i(T)$ – взята з врахуванням можливих хімічних та фазових перетворень ентальпія i -го компонента, розрахована на одиницю його маси, Дж·кг⁻¹.

Останній доданок у правій частині формули (4.38)

$$\Delta Q_{g.w} = c'_{p.g1} \cdot w_g \cdot \frac{\partial T}{\partial x'}, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4.40)$$

враховує перенос енергії газовим потоком. В області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 4.1), де $w_g = 0$, він дорівнює нулю.

В моделі припускається, що в області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1) утворювана газова компонента виноситься назовні настільки швидко, що не встигає по дорозі обмінятися енергією з покриттям. Разом із собою газ у розрахунку на кожен утворюваний його кілограм уносить $c_{p.g1} \cdot (T - T_0)$ Дж·кг⁻¹ енергії, де T_0 - температура початку підрахунку ентальпії, К. Генерація газу складає $R_{g1} = -k_{g1} \cdot R_a$, кг·м⁻³. Це означає, що в області делокалізації величину $\Delta Q_{g1.w}$ можна замінити на

$$\Delta Q_{g1} = -c_{p.g1} \cdot (T - T_0) \cdot k_{g1} \cdot R_a, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (4.41)$$

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття λ , Вт·м⁻¹·К⁻¹, оцінюється співвідношенням

$$\lambda(x, \tau) = C_\lambda \cdot \sum_i^{(e)} \lambda_i \cdot \frac{dV_i}{dV} = C_\lambda \cdot \frac{[\lambda_a \cdot v_a + \lambda_b \cdot v_b \cdot (1 - k_{g1})] \cdot dm_a + \lambda_p \cdot v_p \cdot dm_p}{dV}, \quad (4.42)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ої конденсованої ($i = p, a, b$) фази

покриття, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; C_λ - безрозмірний множник, який залежить від структури остова і має величину ~ 1 ; символ $\sum_i^{(k)}$ позначає суму по всім конденсованим ($i = p, a, b$) компонентам. При переході від локалізованого до делокалізованого стану у співвідношенні (4.42) змінюється множник C_λ . Він зменшується, що відображає зменшення коефіцієнта теплопровідності внаслідок розриву зв'язків у конденсованій (і тому теплопровідній) частині покриття. Відповідна формула має номер (4.50).

Величини $v_i(T) \equiv dV_i/dm_i$, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, де dV_i й dm_i – об'єм і маса i -го компонента в об'ємі dV покриття, є питомими об'ємами відповідних компонентів. У даній моделі приймається, що питомі об'єми конденсованих компонентів постійні, а питоми об'єм газового компонента у локалізованому стані визначається за формулою

$$v_{g1}(T) = \frac{R \cdot T}{\mu_{g1} \cdot p} \cdot \vartheta(T - T_{g.beg}), \quad (4.43)$$

де μ_{g1} – молярна маса газового компонента, $\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$; p – тиск газу, Па, що для локалізованої газової фази визначається діагональними компонентами тензора напруг покриття в місці вкраплення газової фази. У даній роботі припускається, що $p = \text{const} > p_0$, де p_0 – тиск у зовнішній середовищі, Па.

Функція $\vartheta(z)$ (функція Хевісайда) являє собою сходинку від нуля до одиниці при переході до позитивних значень z . Структура співвідношення (4.43) забезпечує виконання рівняння стану ідеального газу для газового компонента при температурі процесу спучування не менших за $T_{g.beg}$, К.

Загальний об'єм елемента покриття у локалізованому стані розраховується за формулою

$$dV_{loc} = \sum_i dV_i = \sum_i v_i \cdot dm_i = [v_a + (1 - k_{g1}) \cdot v_b + k_{g1} \cdot v_{g1}] \cdot dm_a + v_p \cdot dm_p, \quad (4.44)$$

у якій питомий об'єм газового компонента визначається за формулою (4.43).

У даному варіанті моделі спучування приймається, що для кожного об'єму dV елементарної частинки покриття існує максимально можливе значення dV_{max} , по досягненню якого об'єм dV вже не змінюється. Додатково приймається, що в момент досягнення dV свого максимального значення відбувається перехід газової фази покриття із локалізованого стану у делокалізований.

Максимальний об'єм елемента покриття пов'язаний із максимальним коефіцієнтом спучення $k_{V,max}$ співвідношенням

$$dV_{max} = k_{V,max} \cdot dV_0, \quad (4.45)$$

де dV_0 - початковий (до спучування) об'єм елемента покриття, м³. Останній простим образом пов'язаний із початковою товщиною dx_0 елементарного прошарку покриття: $dV_0 = F \cdot dx_0$.

Знаючи початковий об'єм елемента покриття dV_0 та початковий об'ємний склад речовини покриття, можна визначити початкові значення маси компонентів. Якщо спочатку покриття складається тільки з активної і пасивної компоненти, то

$$dm_{a,0} = \frac{dV_0 \cdot r_{V,a,0}}{v_a}, \quad dm_{p,0} = \frac{dV_0 \cdot r_{V,p,0}}{v_p}, \quad (4.46)$$

де $r_{V,a,0}$ і $r_{V,p,0}$ - відповідно, початкові об'ємні частки активної і пасивної компоненти покриття, при цьому

$$r_{V.a,0} + r_{V.p,0} = 1.$$

Порівняння об'ємів $dV_{\max}$ і dV_{loc} дає критерій стану локалізації газової фази у елементарному об'ємі покриття:

$$\begin{cases} dV_{loc} < dV_{\max} \Rightarrow \text{localized state} \\ dV_{loc} \geq dV_{\max} \Rightarrow \text{delocalized state} \end{cases} \quad (4.47)$$

Правило (4.47) дає можливість загальною формулою записати величину Z , яка у стані локалізації має вигляд Z_{loc} , а у делокалізованому стані записується, як Z_{deloc} :

$$Z = Z_{loc} + (Z_{deloc} - Z_{loc}) \cdot \vartheta(dV_{loc} - dV_{\max}). \quad (4.48)$$

Загальну (щодо факту локалізації) формулу (4.48) можна використати для запису загальної формули розрахунку елементарного об'єму dV , яка охоплює і локалізовані і делокалізовані стани елементів покриття. Це співвідношення має вигляд

$$dV = dV_{loc} + (dV_{\max} - dV_{loc}) \cdot \vartheta(dV_{loc} - dV_{\max}). \quad (4.49)$$

Аналогічно записується множник C_λ у формулі (4.42), яка задає коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття. У відповідності до виразу (4.48)

$$C_\lambda = C_{\lambda.loc} + (C_{\lambda.deloc} - C_{\lambda.loc}) \cdot \vartheta(dV_{loc} - dV_{\max}). \quad (4.50)$$

Граничними умовами до розглянутої системи 5-ти рівнянь (4.29), (4.31),

(4.34), (4.35), (4.38) відносно 5-ти невідомих dm_a , dm_p , dm_b , dm_{g1} , T є відсутність потоків маси конденсованих компонент і безперервність потоків енергії на границях. Нагадаємо, що границя з тілом, яке підлягає захисту, ($x=0$ на рис. 4.2) є нерухомою, а рухома координата зовнішньої границі покриття (x_s) описується рівнянням (4.27), застосованим для зовнішньої границі,

$$x_s(\tau) = L_0 + \int_0^\tau w_{fr}(x_s(\tau'), \tau') d\tau', \quad (4.51)$$

де L_0 - початкова товщина покриття.

Просторова схема прогріву зображена на рис. 4.2, на якій по різному заштриховано дві області: 1) $-L_{tr} \leq x \leq 0$ — дерев'яна підкладка, яку захищають (де L_{tr} - товщина дерев'яної підкладки, м.); 2) $0 \leq x \leq x_s$ - захисне покриття, що спучується.

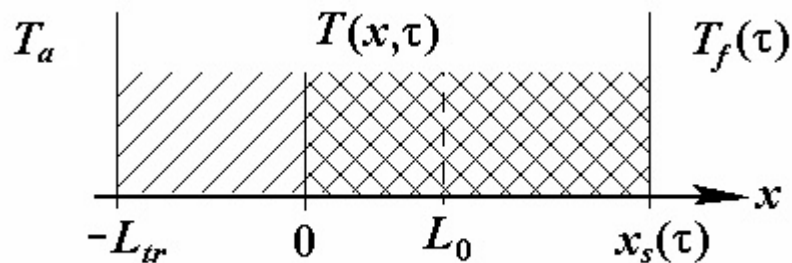


Рис. 4.2 Просторова схема прогріву

Умова безперервності потоку енергії на границі із гарячим середовищем (при $x = x_s$) має вигляд:

$$-\lambda_s \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_s = \alpha(T_f) \cdot (T|_s - T_f), \quad (4.52)$$

де символ $|_s$ - указує на взяття величин на граничній поверхні; α – коефіцієнт тепловіддачі даної поверхні і зовнішнього середовища, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-1}$; T_f – температура середовища (наприклад, полум'я), К.

Прийнята модельна залежність температури середовища від часу має вигляд

$$T_f(\tau) = T_{f,\max} - (T_{f,\max} - T_{f,0}) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_f}\right), \quad (4.53)$$

де $T_{f,0}$ і $T_{f,\max}$ - початкове і максимальне асимптотичне значення температури середовища, відповідно, К; τ_f - характерний час виходу на асимптотичне значення температури, с.

Умова безперервності теплового потоку на границі покриття із дерев'яною пластиною ($x=0$) у даній моделі (інертної деревини) має вигляд:

$$-\left[\lambda_{tr} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right]_{-0} = -\left[\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right]_{+0}, \quad (4.54)$$

де λ_{tr} – коефіцієнт теплопровідності дерева, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$; символ $|_{\pm 0}$ - вказує на взяття величин на відповідному боці граничної поверхні.

Передача тепла в дерев'яній пластині описується звичайним рівнянням нестационарної теплопровідності

$$c'_{p,tr} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{tr} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad -L_{tr} \leq x \leq 0, \quad (4.55)$$

де $c'_{p,tr}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність деревини, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$. Гранична умова к рівнянню (4.53) на границі дерев'яної пластини з повітрям має вигляд

$$-\lambda_{tr} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{-L_{tr}+0} = \alpha(T(-L_{tr})) \cdot [T_a - T(-L_{tr})], \quad (4.56)$$

де T_a – абсолютна температура повітря, К.

Основна математична задача зведена до рішення системи 2-ох диференціальних рівнянь у частинних похідних ((4.29). (4.38)) щодо 2-ох невідомих нестационарних полів: dm_a , T .

Описана система вирішувалася чисельно у середовищі Matlab за допомогою програми, написаною автором на мові середовища. Для розуміння отриманих результатів відмітимо наступне. При рішенні задачі шар покриття із самого початку розбивався на $N=10$ елементарних шарів однокової товщини $dx_0 = L_0 / N$, нумерація яких здійснювалася у напрямку зростання координати x від $i=1$ до $i=N$, починаючи від границі покриття із дерев'яною пластиною (на якій $x=0$). Товщина цих шарів dx_i змінюється з часом, що пов'язано із зміною об'єму шарів $dV_i = F \cdot dx_i$. У подальшому відстежувалася еволюція цих шарів. Середнім параметрам середовища у шарі приписувався номер шару. Приймалося, що значення параметру у середині шару співпадає із середнім по шару. Так просторова координата середині i -го шару $x_i(\tau)$ змінюється згідно із рівнянням (4.27), яке для неї має вигляд

$$x_i(\tau) = x_i(0) + \int_0^\tau w_{fr}(x_i(\tau''), \tau'') d\tau'', \quad (4.57)$$

де $x_i(0) = (i + 0,5) \cdot dx_0$.

При запису рівнянь щодо просторових похідних використовувався метод кінцевих різниць. Після цього при розгляді еволюції параметрів покриття кожне диференціальне рівняння у часткових похідних по просторовій координаті

і часу переходило у систему N звичайних диференціальних рівнянь відносно часу.

Дослідження проводилися при початкових товщинах захисного покриття $L_0 = 1 \div 3$ мм, температурах полум'я $t_f = 850 \div 1150^\circ\text{C}$ і фіксованій товщині дерев'яної пластини $L_{tr} = 15$ мм, які відповідали різним експериментам. У результаті отримувалися й аналізувалися, просторово-часові залежності температури покриття $t_i(\tau)$, C , коефіцієнта спучування $k_{v,i}(\tau)$, коефіцієнта теплопровідності $\lambda_i(\tau)$, масової частки активного компонента $g_i(\tau)$. Отримані модельні залежності підганялися під експериментальні варіюванням вільних параметрів.

На рис. 4.3 наведені типові модельні залежності переміщення верхньої (більш віддаленої) границі елементарних підшарів покриття від часу теплового впливу. Більшим номерам підшарів відповідає більше переміщення. Початкова незмінність переміщень відображає модельне припущення про те, що спучування починається з моменту досягнення матеріалом відповідного підшару критичної температури $T_{g.beg}$ (дивись формулу (4.43)). У даному випадку $T_{g.beg} = 150 + 273$, К. Незмінність переміщень починаючи із якогось моменту відповідає модельному уявленню про існування максимального коефіцієнту спучування.

На рис. 4.4 наведені типові модельні залежності температур полум'я $t_f, ^\circ\text{C}$, зовнішньої поверхні покриття $t_s, ^\circ\text{C}$, оберненої до полум'я захищеної поверхні дерев'яної пластини $t_*, ^\circ\text{C}$, і тієї ж поверхні у відсутності захисту $t_{*,free}, ^\circ\text{C}$. Крім того тонкими лініями нанесені температури відповідних шарів покриття $t_1, t_4, t_7, t_{10}, ^\circ\text{C}$, (у кожен фіксований момент часу меншим значенням індексу i відповідають менші температури).

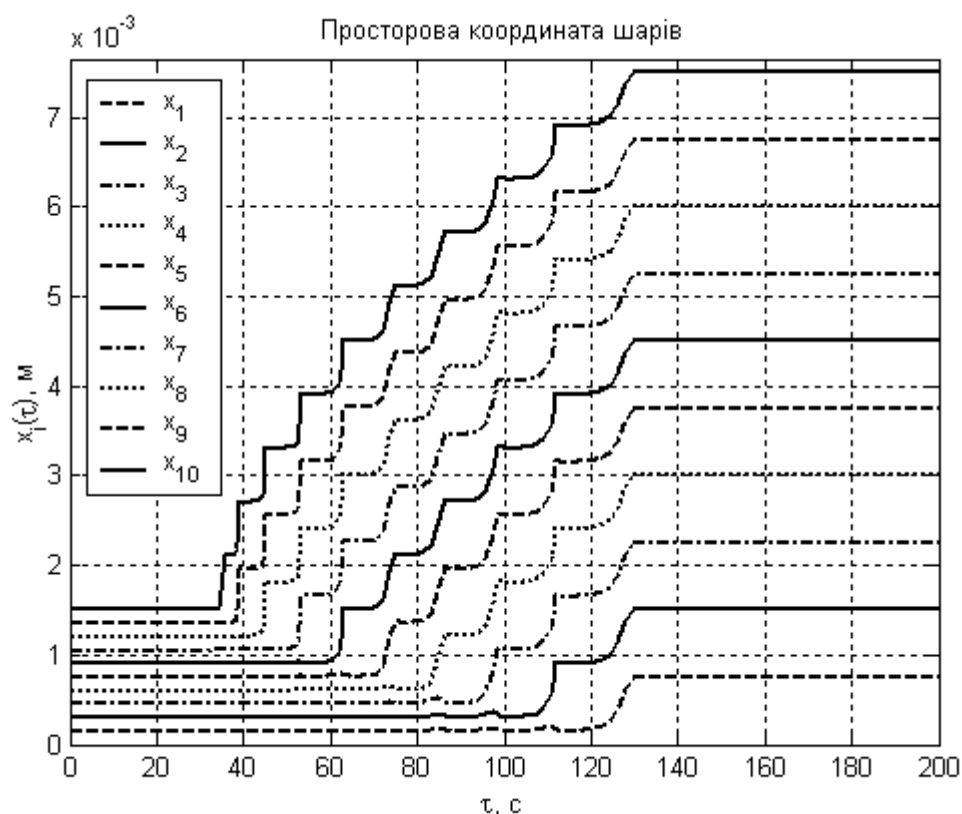


Рис. 4.3 Графіки залежності переміщення верхньої границі елементарних підшарів покриття від часу вогневого впливу

Порівняння температури поверхні деревини із захистом (t_*) і без нього ($t_{*,free}$) на рис. 4.4 характеризує захисну дію покриття. (Слід пам'ятати, що у моделі деревина розглядається як інертна, через що немає сенсу довіряти цим модельним передбачення при модельних температурах деревини вищих за 200°C .)

Горизонтальна ділянка на графіках рис. 4.4 при $t \approx 140^\circ\text{C}$, як показує моделювання, пов'язана скоріше із можливістю спучування при температурах, які починаються з $T_{g,beg} \approx 150 + 273$, К, (дивись (4.43)), ніж із піком реакції розпаду при температурі $T_{aa,1} \approx 100 + 273$, К, (дивись (4.37)).

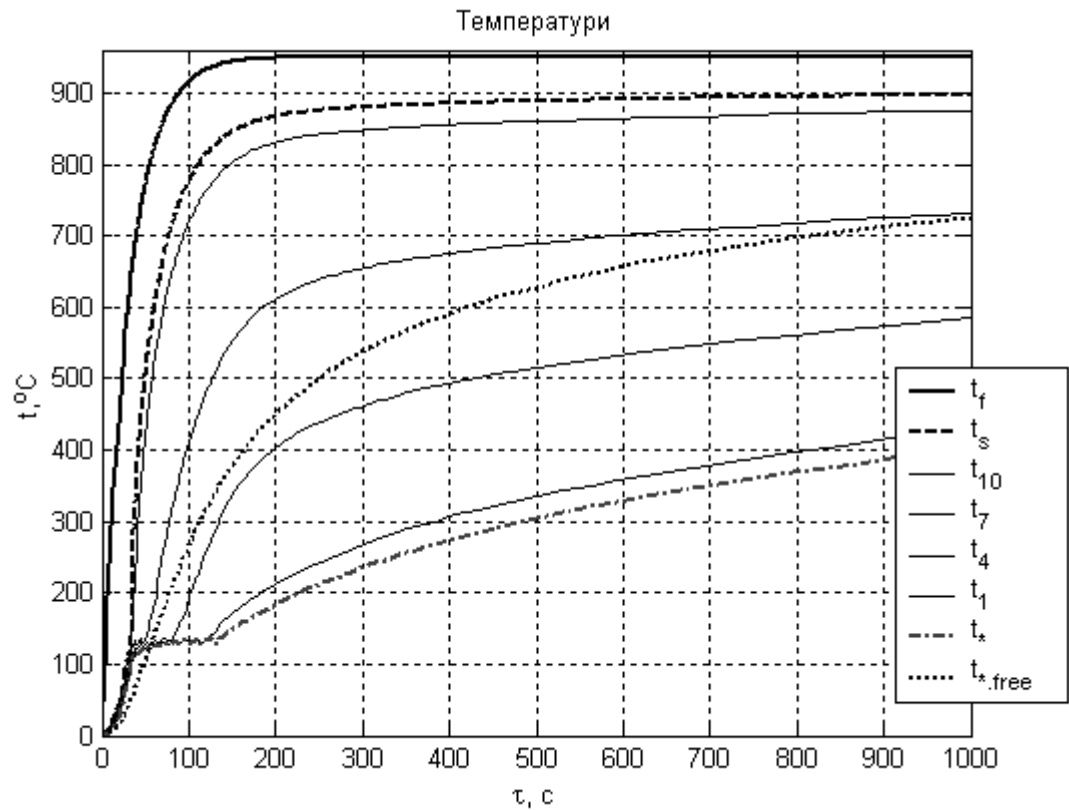


Рис. 4.4 Графіки модельної залежності температур від часу вогневого впливу

На рис. 4.5 наведена типова модельна залежність локального $k_{V,i}(\tau)$ і загального $k_{V,tot}(\tau)$ коефіцієнта спучування. Перший за визначенням дорівнює

$$k_{V,i}(\tau) \equiv \frac{dV_i(\tau)}{dV_0} = \frac{dx_i(\tau)}{dx_0}. \quad (4.58)$$

Коефіцієнт спучування усього покриття за визначенням є

$$k_{V,tot}(\tau) \equiv \frac{V(\tau)}{V_0} = \frac{L(\tau)}{L_0}, \quad (4.59)$$

де $V(\tau)$ і $L(\tau)$ - відповідно, поточні об'єм і товщина покриття. Остання у рамках дискретного опису дорівнює

$$L(\tau) = \sum_{i=1}^N dx_i(\tau). \quad (4.60)$$

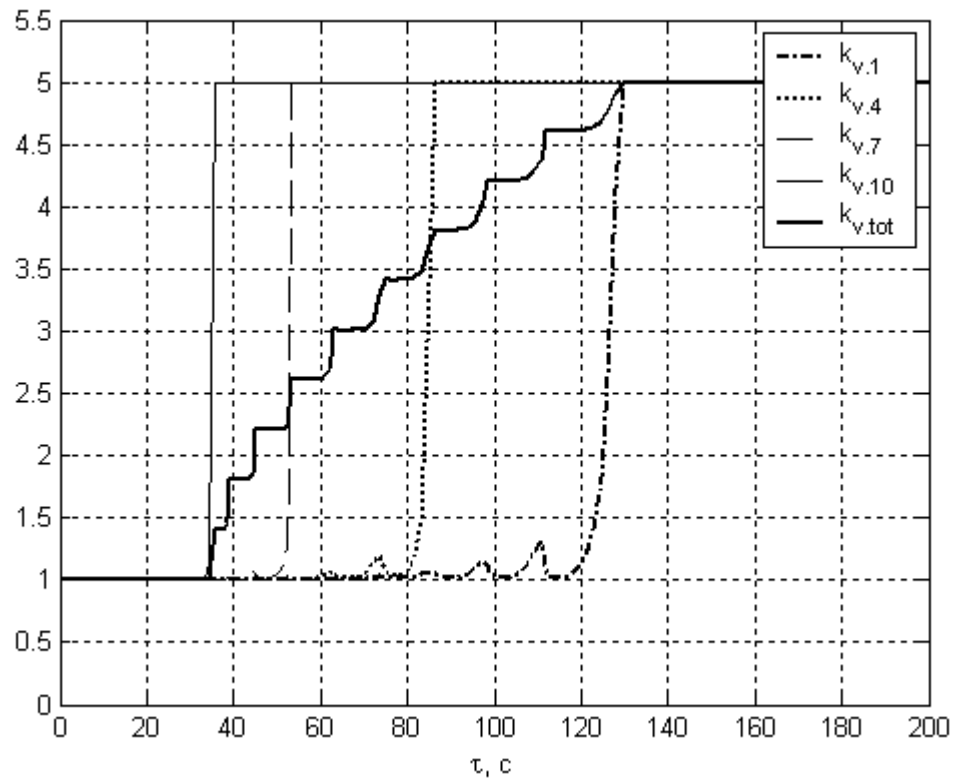


Рис. 4.5 Графіки модельної залежності коефіцієнта спучування захисного покриття від часу теплового впливу

Нескладно перевірити, що

$$k_{V,tot}(\tau) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N k_{V,i}(\tau). \quad (4.61)$$

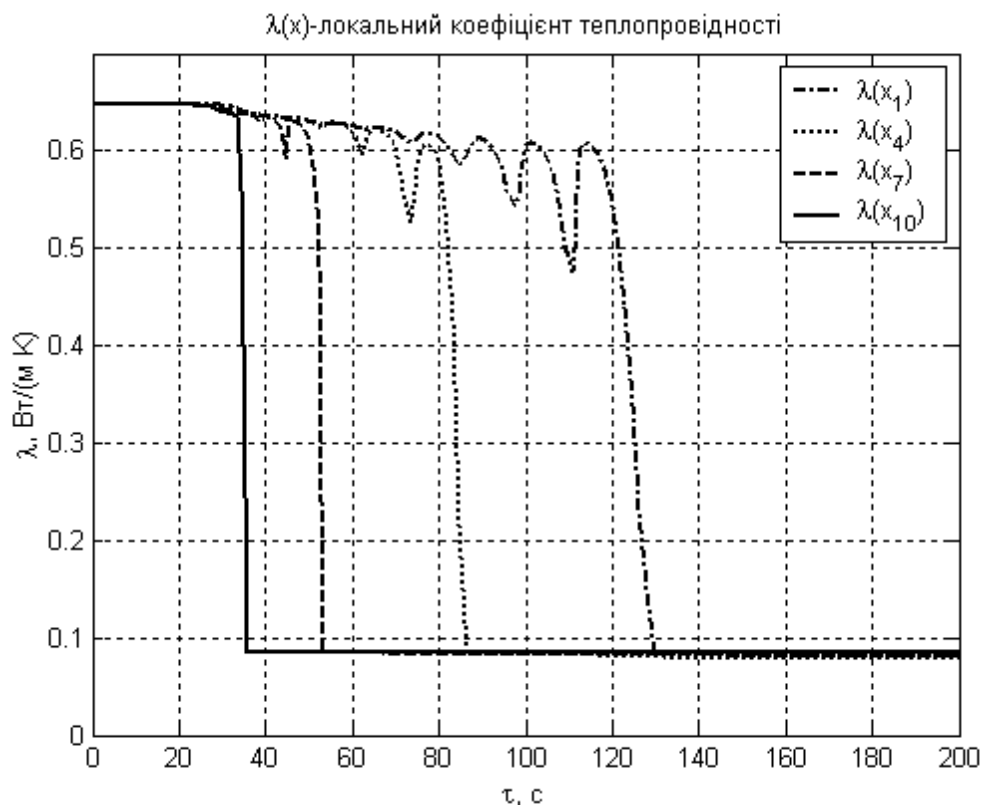


Рис. 4.6 Графіки модельної залежності локального коефіцієнта теплопровідності захисного покриття від часу теплового впливу

На рис. 4.6 наведена типова модельна залежність коефіцієнта теплопровідності $\lambda_i(\tau) \equiv \lambda(x_i(\tau))$ фіксованих елементів захисного покриття в залежності від часу.

На рис. 4.7 наведена модельна залежність відношення маси активного компонента $dm_a(x_i)$ елемента покриття, що має поточну координату $x = x_i(\tau)$, до загальної початкової маси dm_0 елемента покриття в залежності від часу. Дана величина визначається згідно із співвідношенням

$$g_a(x_i) \equiv \frac{dm_a(x_i)}{dm_0}, \quad (4.62)$$

де $dm_0 = dm_{a,0} + dm_{b,0} + dm_{p,0}$, кг.

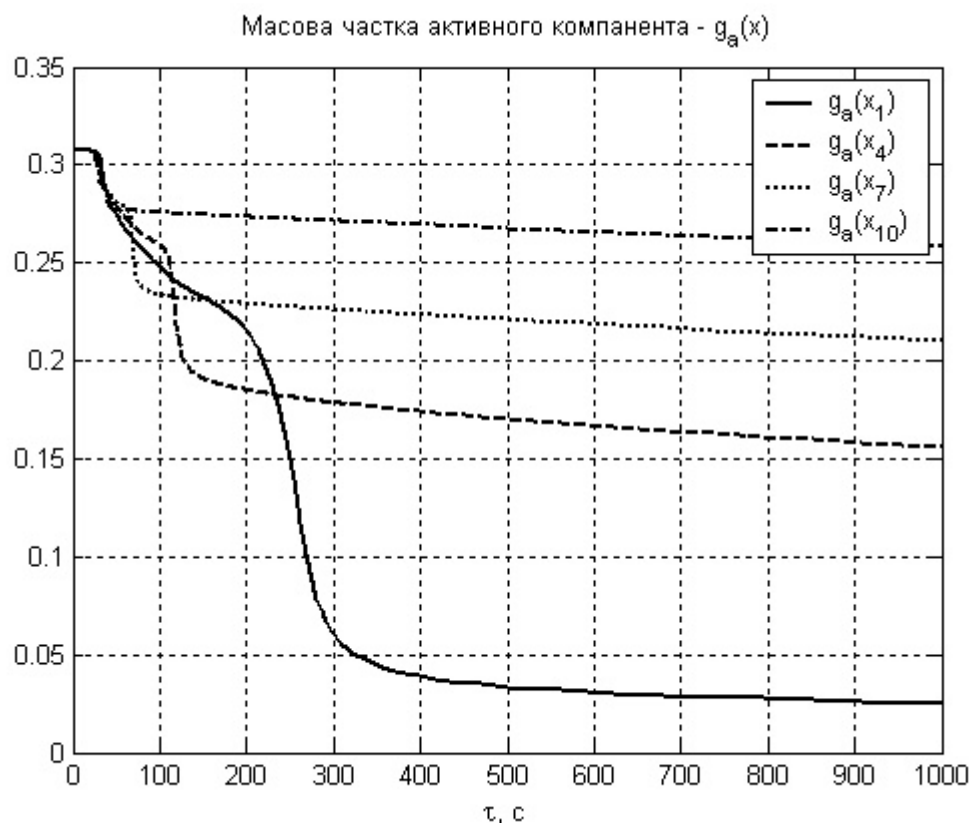


Рис. 4.7 Графіки залежності від часу відношення масової активного компонента до початкової маси у фіксованих елементах захисного

Дещо неочікувана більша величина $g_{a,j}$ у близьких до гарячої поверхні прошарках покриття ніж у віддалених прошарках пов'язана із температурною залежністю швидкості реакції розпаду. Остання має піки швидкості при температурах $T_{aa,1} = 100 + 273$, К, $T_{aa,2} = 250 + 273$, К, $T_{aa,3} = 400 + 273$, К (дивись (4.37)), в той час, як температура гарячих шарів (при температурі гарячого середовища $T_f \approx 950 + 273$, К) має більшу величину. Через це у такій ситуації у близьких до гарячої поверхні прошарках покриття розпад активного компонента йде повільніше, ніж у холодніших внутрішніх прошарках.

На рис. 4.8 наведена модельна залежність загальної відносної втрати маси захисного покриття від часу теплового впливу. Дана величина дорівнює відношенню $\Delta m_{tot}/m_0$, де $\Delta m_{tot}(\tau)$ - загальна втрата маси покриття за час

теплого впливу, кг: m_0 - початкова величина маси покриття, кг. Величина $\Delta m_{tot}(\tau)$ розраховується, як сума втрат маси усіма елементарними шарами покриття. У шарах з локалізованою газовою фазою ці втрати відсутні. У шарах із делокалізованою газовою фазою загальні втрати маси дорівнюють втратам маси газової фази.

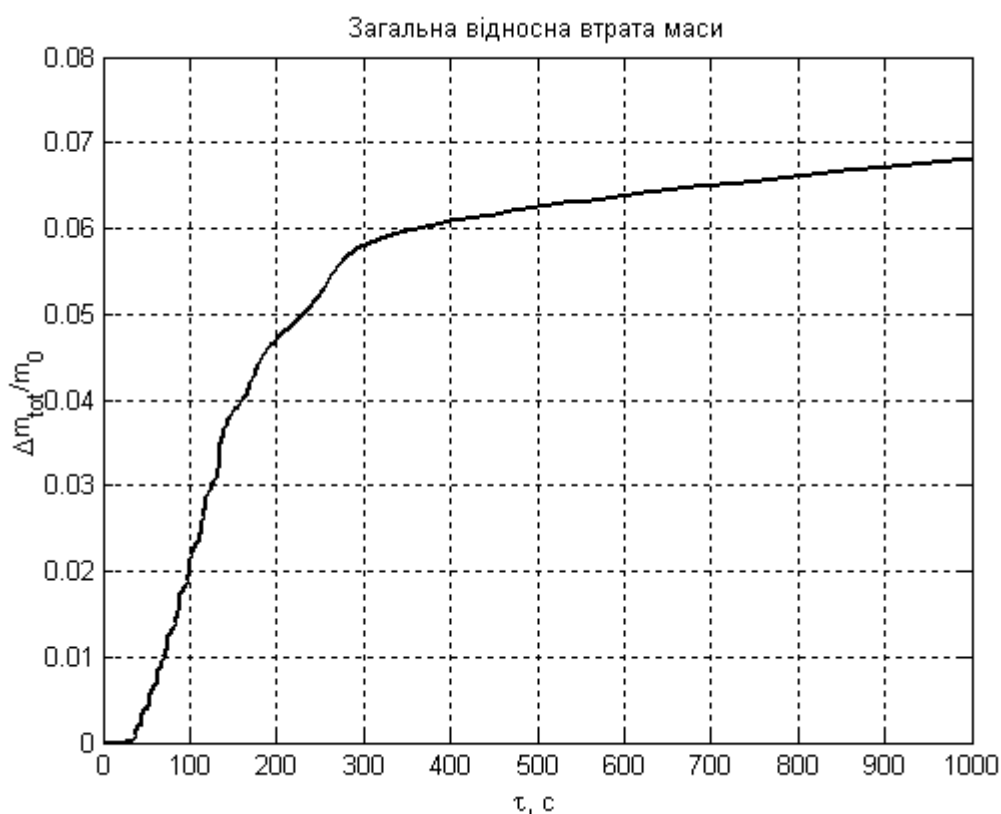


Рис. 4.8 Графік модельної залежності загальної відносної втрати маси захисного покриття від часу теплового впливу

Порівняння даних кривих з експериментальною температурною залежністю, представленою в роботі [15], показує допустимість застосувань викладеною у даному підрозділі відносно простої моделі для приблизного опису дії покриття, що спучується, СК-1.

Порівняння експериментальних і модельної температурних залежностей показує, що при використанні одного активного компонента важко (без

екзотичних припущень о температурній залежності швидкості реакції розпаду) отримати декілька квазіізотермічних ділянок на залежності температур елементів покриття від часу. Для подальшого поліпшення моделі треба її ускладнити, увівши додатково окремий компонент – наприклад, воду, для урахування процесу дегідратації. Крім того огляд дерев'яних пластин, що використовувалися у вогневих випробуваннях, показав, що під захисним шаром, дерево піддалося істотній деструкції. Остання обставина вказує на необхідність для дослідження задачі захисту дерев'яних поверхонь ускладнити модель (увівши в опис процеси піролізу), а для задачі визначення властивостей виключно покриття провести експерименти, наносячи покриття на інертні (наприклад металеві) пластини, що незначно змінить уже існуюче опис.

4.3 Математичне моделювання вогнезахисної дії покриття, що спучується внаслідок дії трьох активних компонентів

У попередньому підрозділі була продемонстрована можливість опису поведінки при вогневому впливі покриття СК-1, що спучується. Опис базувався на моделі, у якій речовина покриття розглядалася як суміш компонентів. Була розглянута модель спучування на основі дії одного активного компонента [36]. У даному підрозділі буде розглянутий більш реалістичний і тому більш складний варіант моделі [35]. Основною відмінністю буде більша кількість здатних до перетворення із виділенням газової фази так званих активних компонентів.

Модель, яка буде використовуватися у даному підрозділі, як і модель попереднього підрозділу. є спрощеним варіантом основної моделі [35].

Велика частина матеріалу цього підрозділу наведена у роботах [37, 58].

У даному дослідженні передбачається кілька припущень.

1) Склад покриття містить дев'ять компонентів (які позначатимуться індексом i) - одну хімічно інертну конденсовану ($i = p$), три активні також конденсовані компоненти ($i = a1, a2, a3$). Останні при нагріванні ендотермічно

розкладаються на конденсовану активну ($i = a2$), дві конденсовані інертні ($i = b2, b3$) і три газові компоненти ($i = g1, g2, g3$) 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 (через зняття напруги у системі) стає нехтовно малим – 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. Дана обставина дозволяє, не визначаючи швидкість руху газового потоку, врахувати у рівнянні теплового балансу пов'язаний з газом тепловий потік від зони утворення газу відносно простою зміною теплоти утворення газу.

3) Дерев'яний зразок, на який нанесене покриття, як і у роботі [36], поводить як хімічно інертна речовина.

Часто пропонуване спрощення 2 (див. [138]) дає можливість в області делокалізації визначити масові концентрації газових компонентів ρ_i ($i = g1, g2, g3$) з рівняння стану газу.

В області локалізованого стану газів концентрації газових компонентів ρ_i ($i = g1, g2, g3$) виражаються через концентрації активних компонентів ρ_i ($i = a1, a2, a3$) за допомогою відповідних рівнянь реакції..

Відзначимо, що концентрації інертних компонентів ρ_i ($i = b2, b3$) можна скрізь зв'язати з концентраціями активних компонентів, виходячи з рівнянь реакції.

Підсумовуючи сказане, можна стверджувати, що число незалежних нестационарних полів у даній моделі дорівнює п'яти – це три концентрації активних компонентів, температура і швидкість руху остова покриття (w_{fr}).

Відповідно до експерименту [15] просторова ситуація розглядається як одновимірна. Істотна просторова координата (x) спрямована по нормалі до поверхні захисту.

В подальшому, як і в попередньому підрозділі, для опису покриття ми будемо використовувати локальну систему координат, що рухається зі швидкістю остову покриття $w_{fr}(x, \tau)$. В цій системі просторова координата x' матеріальної точки покриття, яка на початку (при $\tau = 0$) мала нерухому координату x , буде описуватися співвідношенням (4.27). Величина об'єму dV елементарного шару покриття, у якому міститься маса dm_i , відповідно до рівняння (4.28) дорівнюватиме $dV = F \cdot dx'$, m^3 , де F - площа повздовжнього перерізу покриття, m^2 .

Концентрації ρ_i задовольняють рівнянням матеріального балансу (4.2). Запишемо ці рівняння для мас компонентів $dm_i = \rho_i \cdot dV$, які заповнюють елементарний об'єм величиною dV , що рухається разом із покриттям. У цій системі координат рівняння (4.2), застосовані до конденсованих компонентів (всюди) та газових компонентів (у локалізованій фазі), мають вигляд

$$\frac{\partial dm_i(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_i, \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}, \quad (4.63)$$

де $d\tilde{R}_i \equiv R_i \cdot dV$, а R_i - 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.

Найпростіший вигляд має рівняння балансу кількості пасивного компонента. Через те, що маса пасивного компонента не змінюється, виконується співвідношення $d\tilde{R}_p = 0$ із якого витікає, що

$$dm_p = dm_{p,0} = \text{const}, \quad (4.64)$$

де $dm_{p,0}$ - початкова маса пасивного компонента у об'ємі dV .

Розглянемо інші компоненти. Далі будуть виписані диференціальні рівняння, щодо елементарних мас трьох активних компонентів, і отримані алгебраїчні вирази мас інших компонентів через маси активних компонентів.

У схемі трьох перетворень, яка розглядається у даному підрозділі, компоненти $i = a1, a3$ тільки зникають, компоненти $b2, b3, g1, g2, g3$ тільки з'являються, і тільки активна компонента $a2$ у 1-ій реакції схеми з'являється, а у 2-ій реакції зникає. Будемо позначати швидкість появи (зникнення) компонента $a2$ верхнім індексом $+$ ($-$). За такої умови

$$d\tilde{R}_{a2} = d\tilde{R}_{a2}^+ + d\tilde{R}_{a2}^-. \quad (4.65)$$

Із схеми 1-го перетворення і закону збереження маси витікають наступні співвідношення:

$$d\tilde{R}_{g1} = -k_{g1} \cdot d\tilde{R}_{a1}, \quad (4.66)$$

$$d\tilde{R}_{a2}^+ = -(1 - k_{g1}) \cdot d\tilde{R}_{a1}, \quad (4.67)$$

де k_{g1} – частка маси активного компонента $a1$, що при розпаді переходить у газовий компонент $g1$; множник $(1 - k_{g1})$ з формулі (4.65) співпадає із часткою маси активного компонента $a1$, що при розпаді переходить у активну компоненту $a2$.

Співвідношення (4.61), (4.64) дозволяють виразити масу компонента $g1$ у локалізованій фазі із масою компонента $a1$. Дійсно, згідно із формулами (4.63) і (4.66) у першому перетворенні виконуються співвідношення

$$\frac{\partial dm_{a1}(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_{a1}, \quad (4.68)$$

$$\frac{\partial dm_{g1}(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_{g1} = -k_{g1} \cdot d\tilde{R}_{a1} = -k_{g1} \cdot \frac{\partial dm_{a1}(x', \tau)}{\partial \tau}. \quad (4.69)$$

Проінтегрувавши по часу від нуля до поточного моменту ліву і праву частини формули (4.69), виділяючи далі поточну масу компонента dm_{g1} , отримаємо шуканий алгебраїчний зв'язок

$$dm_{g1} = dm_{g1.0} + k_{g1} \cdot (dm_{a1.0} - dm_{a1}), \quad (4.70)$$

де $dm_{a1.0}$ і $dm_{g1.0}$ - відповідно, початкові маси компонентів $a1$ і $g1$ у об'ємі dV . (У подальшому будемо вважати, що $dm_{g1.0} = 0$.)

Застосовуючи співвідношення (4.63) (із врахуванням формул (4.65) і (4.67)) ще і до 2-го перетворення, отримаємо залежності

$$\frac{\partial dm_{a2}(x', \tau)}{\partial \tau} = -(1 - k_{g1}) \cdot d\tilde{R}_{a1} + d\tilde{R}_{a2}^-, \quad (4.71)$$

$$\frac{\partial dm_{b2}(x', \tau)}{\partial \tau} = -(1 - k_{g2}) \cdot d\tilde{R}_{a2}^-, \quad (4.72)$$

$$\frac{\partial dm_{g2}(x', \tau)}{\partial \tau} = -k_{g2} \cdot d\tilde{R}_{a2}^-, \quad (4.73)$$

де k_{g2} — частка маси активного компонента $a2$, що при розпаді переходить у газовий компонент $g2$; множник $(1 - k_{g2})$ з формулі (4.72) співпадає із часткою

маси активного компонента $a2$, що при розпаді переходить у конденсовану інертну компоненту $b2$.

Визначимо маси компонентів $b2$ і $g2$ через маси компонентів $a1$ і $a2$. Для цього із формул (4.68) і (4.71) виразимо величину $d\tilde{R}_{a2}^-$ через швидкості зміни відповідних мас. Отримаємо зв'язок

$$d\tilde{R}_{a2}^- = \frac{\partial dm_{a2}(x', \tau)}{\partial \tau} + (1 - k_{g1}) \cdot \frac{\partial dm_{a1}(x', \tau)}{\partial \tau}.$$

Підставивши останній вираз у формули (4.72) і (4.73), отримаємо співвідношення

$$\frac{\partial dm_{b2}(x', \tau)}{\partial \tau} = -(1 - k_{g2}) \cdot \left[\frac{\partial dm_{a2}(x', \tau)}{\partial \tau} + (1 - k_{g1}) \cdot \frac{\partial dm_{a1}(x', \tau)}{\partial \tau} \right],$$

$$\frac{\partial dm_{g2}(x', \tau)}{\partial \tau} = -k_{g2} \cdot \left[\frac{\partial dm_{a2}(x', \tau)}{\partial \tau} + (1 - k_{g1}) \cdot \frac{\partial dm_{a1}(x', \tau)}{\partial \tau} \right].$$

Проінтегрувавши їх по часу від нуля до поточного моменту, виділяючи далі поточні маси компонентів dm_{b2} і dm_{g2} , отримаємо шукані алгебраїчні зв'язки:

$$dm_{b2} = dm_{b2.0} + (1 - k_{g2}) \cdot [dm_{a2.0} - dm_{a2} + (1 - k_{g1}) \cdot (dm_{a1.0} - dm_{a1})], \quad (4.74)$$

$$dm_{g2} = dm_{g2.0} + k_{g2} \cdot [dm_{a2.0} - dm_{a2} + (1 - k_{g1}) \cdot (dm_{a1.0} - dm_{a1})], \quad (4.75)$$

де $dm_{a2.0}$, $dm_{b2.0}$ і $dm_{g2.0}$ - відповідно, початкові маси компонентів $a2$, $b2$ і $g2$ у об'ємі dV . (У подальшому будемо вважати, що $dm_{g2.0} = 0$.)

Застосовуючи співвідношення (4.63) до 3-го перетворення, отримаємо залежності

$$\frac{\partial dm_{a3}(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_{a3}, \quad (4.76)$$

$$\frac{\partial dm_{b3}(x', \tau)}{\partial \tau} = -(1 - k_{g3}) \cdot d\tilde{R}_{a3}, \quad (4.77)$$

$$\frac{\partial dm_{g3}(x', \tau)}{\partial \tau} = -k_{g3} \cdot d\tilde{R}_{a3}, \quad (4.78)$$

де k_{g3} – частка маси активного компонента $a3$, що при розпаді переходить у газовий компонент $g3$; множник $(1 - k_{g3})$ з формулі (4.77) співпадає із часткою маси активного компонента $a3$, що при розпаді переходить у конденсовану інертну компоненту $b3$.

Визначимо маси компонентів $b3$ і $g3$ через масу компонента $a3$. Для цього з формули (4.76) виразимо величину $d\tilde{R}_{a3}$ і підставимо у формули (4.77), (4.78). Отримаємо співвідношення

$$\begin{aligned} \frac{\partial dm_{b3}(x', \tau)}{\partial \tau} &= -(1 - k_{g3}) \cdot \frac{\partial dm_{a3}(x', \tau)}{\partial \tau}, \\ \frac{\partial dm_{g3}(x', \tau)}{\partial \tau} &= -k_{g3} \cdot \frac{\partial dm_{a3}(x', \tau)}{\partial \tau}. \end{aligned}$$

Проінтегрувавши їх по часу від нуля до поточного моменту, виділяючи далі поточні маси компонентів dm_{b3} і dm_{g3} , отримаємо шукані алгебраїчні зв'язки:

$$dm_{b3} = dm_{b3.0} + (1 - k_{g3}) \cdot (dm_{a3.0} - dm_{a3}), \quad (4.79)$$

$$dm_{g3} = dm_{g3.0} + k_{g3} \cdot (dm_{a3.0} - dm_{a3}), \quad (4.80)$$

де $dm_{a3.0}$, $dm_{b3.0}$ і $dm_{g3.0}$ - відповідно, початкові маси компонентів $a3$, $b3$ і $g3$ у об'ємі dV . (У подальшому будемо вважати, що $dm_{g3.0} = 0$.)

Отримані вище у даному підрозділі співвідношення, щодо визначення маси газових компонентів, стосувалися виключно області, де існує локалізація газів. Загальні ж рівняння матеріального балансу газових компонент мають вигляд

$$\frac{\partial dm_{gi}(x', \tau)}{\partial \tau} = d\tilde{R}_{gi} - \frac{\partial}{\partial x'} (w_g \cdot \rho_{gi}) \cdot dV, \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.81)$$

Нагадаємо, що усі компоненти, що не є газами, а також газові компоненти в області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 4.1), у нерухомій системі координат у заданій точці покриття рухаються з однаковою швидкістю, а саме швидкістю остову w_{fr} . При наявності області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1) газові компоненти рухаються з швидкістю

$$w_{g1} = w_{g2} = w_{g3} = w_{fr} + w_g,$$

де w_g – усереднена по перерізу покриття середньовитратна швидкість руху газу відносно остову, $m \cdot s^{-1}$.

У даному варіанті моделі, як це вже зазначалося у припущенні 2 даного підрозділу, ми не будемо визначати величину w_g у області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1). Будемо вважати, що вся надлишкова газова компонента дуже швидко виноситься із покриття. Формально це означає, що права частина рівняння (4.79) близька до нуля. В цій області процеси газів будуть

розглядатися, як ізобарні при тиску $p = p_0$, де p_0 - тиск зовнішнього середовища.

Функції, що задають швидкість розпаду активних компонентів, моделюються співвідношеннями

$$d\tilde{R}_{a1}(dm_{a1}, T) = -\frac{dm_{a1}}{\tau_{a1}} \cdot \exp\left(-\frac{T_{aa.1}}{T}\right) \cdot \vartheta(T - T_{a.1}), \quad (4.82)$$

$$d\tilde{R}_{a2}^-(dm_{a2}, T) = -\frac{dm_{a2}}{\tau_{a2}} \cdot \exp\left(-\frac{T_{aa.2}}{T}\right) \cdot \vartheta(T - T_{a.2}), \quad (4.83)$$

$$d\tilde{R}_{a3}(dm_{a3}, T) = -\frac{dm_{a3}}{\tau_{a3}} \cdot \exp\left(-\frac{T_{aa.3}}{T}\right) \cdot \vartheta(T - T_{a.3}), \quad (4.84)$$

де $\tau_{a.j}$, с, й $T_{a.j}$, $T_{aa.j}$, К, ($j = 1, 2, 3$) – 9 констант моделі.

Швидкості розпаду виду (4.82)-(4.84) дозволяють (при відповідному виборі параметрів) отримати особливості у залежності поля температур покриття $T(x, \tau)$ при температурах T_{a1} , T_{a2} , T_{a3} .

Система 9-ох рівнянь (4.64), (4.68), (4.70), (4.71), (4.74), (4.75), (4.76), (4.79), (4.80) (або (4.81) замість (4.70), (4.75), (4.80)) відносно невідомих dm_p , dm_{a1} , dm_{a2} , dm_{a3} , dm_{b2} , dm_{b3} , dm_{g1} , dm_{g2} , dm_{g3} доповнюється співвідношенням енергетичного балансу (4.3) відносно невідомого поля температур $T(x', \tau)$, яке у даному випадку приймає вигляд:

$$c'_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\partial}{\partial x'} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x'} \right) = -Q_R - \Delta Q_{g.w}, \quad (4.85)$$

де c'_p - питома об'ємна ізобарна теплоємність речовини покриття, Дж·м⁻³·К⁻¹, яка має вигляд суми (4.1) (при цьому сума $\sum_i$ містить 9 доданків

($i = p, a1, a2, a3, b2, b3, g1, g2, g3$); Q_R – загальна об’ємна локальна щільність стоку ентальпії реакцій розпаду, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}$, яка дорівнює сумі по реакціям

$$Q_R = \Delta H_1 \cdot R_{a1} + \Delta H_2 \cdot R_{a2}^- + \Delta H_3 \cdot R_{a3}, \quad (4.86)$$

де

$$\Delta H_1 = H_{a1} - (1 - k_{g1}) \cdot H_{a2} - k_{g1} \cdot H_{g1}, \quad (4.87)$$

$$\Delta H_2 = H_{a2} - (1 - k_{g2}) \cdot H_{b2} - k_{g2} \cdot H_{g2}, \quad (4.88)$$

$$\Delta H_3 = H_{a3} - (1 - k_{g3}) \cdot H_{b3} - k_{g3} \cdot H_{g3}, \quad (4.89)$$

де $H_i(T)$ – взята з врахуванням можливих хімічних та фазових перетворень ентальпія i -го компонента, розрахована на одиницю його маси, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Останній доданок у правій частині формули (4.85) дорівнює

$$\Delta Q_{g.w} = c'_{p.g} \cdot w_g \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \text{Вт} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4.90)$$

де $c'_{p.g} = \rho_{g1} \cdot c_{p.g1} + \rho_{g2} \cdot c_{p.g2} + \rho_{g3} \cdot c_{p.g3}$ – питома об’ємна ізобарна теплоємність газової складової покриття, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$ а $c_{p.gi}$ – питома масова ізобарна теплоємність gi -го газового компонента, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Доданок (4.90) формули (4.85) враховує перенос енергії газовим потоком. В області локалізації газу (область із $x < x_{del}$ на рис. 4.1), де $w_g = 0$, $\Delta Q_{g.w} = 0$.

В моделі припускається, що в області делокалізації газу ($x > x_{del}$ на рис. 4.1) утворювана газова компонента виноситься назовні настільки швидко, що не встигає по дорозі обмінятися енергією з покриттям. Разом із собою j -та газова компонента у розрахунку на кожен її кілограм уносить $c_{p.gj} \cdot (T - T_0)$ $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$ енергії, де T_0 – температура початку підрахунку ентальпії, К. Генерація цієї газової компоненти складає $R_{gj} = -k_{gj} \cdot R_{aj}^-$, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Внески компонентів у

енергоперенос підсумовуються. Це означає, що в області делокалізації величину $\Delta Q_{g.w}$ можна замінити на

$$\Delta Q_g = - \sum_{j=1}^3 c_{p.gj} \cdot k_{gj} \cdot R_{gj}^- \cdot (T - T_0), \text{ Вт} \cdot \text{м}^3. \quad (4.91)$$

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу покриття λ , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, оцінюється співвідношенням

$$\lambda(x, \tau) = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\hat{e})} \lambda_i \cdot \frac{dV_i}{dV} = C_\lambda \cdot \sum_i^{(\hat{e})} \lambda_i \cdot v_i \cdot \frac{dm_i}{dV}, \quad (4.92)$$

де λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ої конденсованої ($i = p, a1, a2, a3, b2, b3$) фази покриття, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; C_λ - безрозмірний множник, який залежить від структури остова і має величину ~ 1 ; символ $\sum_i^{(\kappa)}$ позначає суму по всім конденсованим компонентам. При переході від локалізованого до делокалізованого стану у співвідношенні (4.90) зменшується множник C_λ , що відображено у формулі (4.50)

Величини $v_i(T) \equiv dV_i/dm_i$, $\text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$, де dV_i і dm_i – об'єм і маса i -го компонента в об'ємі dV покриття, є питомими об'ємами відповідних компонентів. У даній моделі приймається, що питомі об'єми конденсованих компонентів постійні, а питомий об'єм газового компонента gj у локалізованому стані визначається за формулою

$$v_{gj}(T) = \frac{R \cdot T}{\mu_{gj} \cdot p} \cdot \vartheta(T - T_{g.beg}), \quad (4.93)$$

де μ_{gj} – молярна маса газового компонента gj , кг·моль⁻¹; p – тиск газу, Па, що для локалізованої газової фази визначається діагональними компонентами тензора напруг покриття в місці вкраплення газової фази. У даній роботі припускається, що $p = \text{const} > p_0$, де p_0 – тиск у зовнішній середовищі, Па.

Структура співвідношення (4.93) забезпечує виконання рівняння стану ідеального газу для газового компонента при температурі процесу спучування не менших за $T_{g.beg}$, К.

Загальний об'єм елемента покриття у локалізованому стані розраховується за формулою

$$dV_{loc} = \sum_i dV_i = \sum_i v_i \cdot dm_i, \quad (4.94)$$

у якій питомі об'єми газових компонентів визначається за формулою (4.93).

У даному варіанті моделі спучування, як і у попередньому підрозділі, приймається, що для кожного об'єму dV елементарної частинки покриття існує максимально можливе значення dV_{max} , по досягненню якого об'єм dV вже не змінюється. Додатково приймається, що в момент досягнення dV свого максимального значення відбувається перехід газової фази покриття із локалізованого стану у делокалізований.

Максимальний об'єм елемента покриття пов'язаний із максимальним коефіцієнтом спучення $k_{V,max}$ співвідношенням (4.45).

Знаючи початковий об'єм елемента покриття dV_0 та початковий об'ємний склад речовини покриття, можна визначити початкові значення маси компонентів. Якщо спочатку покриття складається тільки з активних і пасивної компоненти, то

$$dm_{ai.0} = \frac{dV_0 \cdot r_{V.ai.0}}{v_{ai}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad dm_{p.0} = \frac{dV_0 \cdot r_{V.p.0}}{v_p}, \quad (4.95)$$

де $r_{V.ai.0}$ і $r_{V.p.0}$ - відповідно, початкові об'ємні частки активних ai компонент і пасивної компоненти покриття, при цьому

$$\sum_{i=1}^3 r_{V.ai.0} + r_{V.p.0} = 1.$$

Як і у попередньому підрозділі, критерій локалізації задається співвідношеннями (4.47).

Загальна формула, яка формально єдиним образом дозволяє записати величину Z , яка у стані локалізації має вигляд Z_{loc} , а у стані делокалізації записується, як Z_{deloc} , має вигляд (4.48). Зокрема елементарний об'єму dV описується співвідношенням (4.49), у якому $dV_{deloc} = dV_{max}$.

Граничними умовами до розглянутої системи 10-ти рівнянь (4.64), (4.68), (4.70), (4.71), (4.74), (4.75), (4.76), (4.79), (4.80) (або (4.81) замість (4.70), (4.75), (4.80)), (4.85) відносно 10-ти невідомих dm_p , dm_{a1} , dm_{a2} , dm_{a3} , dm_{b2} , dm_{b3} , dm_{g1} , dm_{g2} , dm_{g3} , T є відсутність потоків маси конденсованих компонент і безперервність потоків енергії на границях. Нагадаємо, що границя з тілом, яке підлягає захисту, ($x=0$ на рис. 4.2) є нерухомою, а рухома координата зовнішньої границі покриття (x_s) описується рівнянням (4.51).

Просторова схема прогріву зображена на рис. 4.2, на якій по різному заштриховано дві області: 1) $-L_{tr} \leq x \leq 0$ — дерев'яна підкладка, яку захищають (де L_{tr} - товщина дерев'яної підкладки, м.); 2) $0 \leq x \leq x_s$ - захисне покриття, що спучується. Символом L_0 позначена початкова товщина покриття, м.

Умова безперервності потоку енергії на границі із гарячим середовищем (при $x = x_s$) має вигляд (4.52).

Моделна залежність температури середовища від часу задається

співвідношенням (4.53).

Умова безперервності теплового потоку на границі покриття із дерев'яною пластиною ($x=0$) у даній моделі інертної деревини має вигляд (4.54), у якому символом λ_{tr} позначено коефіцієнт теплопровідності деревини.

Передача тепла в дерев'яній пластині описується звичайним рівнянням нестационарної теплопровідності (4.55). Гранична умова до рівняння (4.55) на границі дерев'яної пластини з повітрям має вигляд (4.56).

Основна математична задача зведена до рішення системи 4-ох диференціальних рівнянь у частинних похідних ((4.68). (4.71), (4.76), (4.85)) відносно 4-ох невідомих нестационарних полів: dm_{a1} , dm_{a2} , dm_{a3} , T .

Описана система вирішувалася чисельно у середовищі Matlab за допомогою програми, написаною автором на мові середовища. Текст програми наведено у додатку Д дисертації. Для розуміння отриманих результатів відмітимо наступне. При рішенні задачі шар покриття із самого початку розбивався на $N=10$ елементарних шарів однокової товщини $dx_0 = L_0 / N$, нумерація яких здійснювалася у напрямку зростання координати x від $i=1$ до $i=N$, починаючи від границі покриття із дерев'яною пластиною (на якій $x=0$). Товщина цих шарів dx_i змінюється з часом, що пов'язано із зміною об'єму шарів $dV_i = F \cdot dx_i$. У подальшому відстежувалася еволюція цих шарів. Середнім параметрам середовища у шарі приписувався номер шару. Приймалося, що значення параметру у середині шару співпадає із середнім по шару. Так просторова координата середині i -го шару $x_i(\tau)$ змінюється згідно із рівнянням (4.27), яке для неї має вигляд

$$x_i(\tau) = x_i(0) + \int_0^{\tau} w_{fr}(x_i(\tau''), \tau'') d\tau'', \quad (4.57)$$

де $x_i(0) = (i + 0,5) \cdot dx_0$.

При запису рівнянь щодо просторових похідних використовувався метод кінцевих різниць. Після цього при розгляді еволюції параметрів покриття кожне диференційне рівняння у часткових похідних по просторовій координаті і часу переходило у систему N звичайних диференційних рівнянь відносно часу.

Дослідження проводилися при початкових товщинах захисного покриття $L_0 = 1 \div 3$ мм, температурах полум'я $t_f = 850 \div 1150^\circ\text{C}$ і фіксованій товщині дерев'яної пластини $L_{tr} = 15$ мм, які відповідали різним експериментам. У результаті отримувалися й аналізувалися, просторово-часові залежності температури покриття $t_i(\tau)$, C , коефіцієнта спучування $k_{V,i}(\tau)$, коефіцієнта теплопровідності $\lambda_i(\tau)$, масової частки активних компонент $g_{a1,i}(\tau)$, $g_{a2,i}(\tau)$, $g_{a3,i}(\tau)$, втрати маси покриття. Отримані модельні залежності підганялися під експериментальні варіюванням вільних параметрів.

На рис. 4.9 наведені типові модельні залежності переміщення верхньої (більш віддаленої) границі елементарних підшарів покриття від часу теплового впливу. Більшим номерам підшарів відповідає більше переміщення.

Початкова незмінність переміщень відображає модельне припущення про те, що: 1) до температури початку реакцій (у даному випадку $T_{a1} = 100 + 273$, К, дивись (4.82)) немає газової фази, тобто спучуватися нічому; 2) до моменту досягнення матеріалом відповідного підшару температури появи текучості $T_{g,beg}$ (у даному випадку $T_{g,beg} = 150 + 273$, К, дивись формулу (4.93)) спучування не можливе. Незмінність переміщень починаючи із якогось моменту відповідає модельному уявленню про існування максимального коефіцієнту спучування.

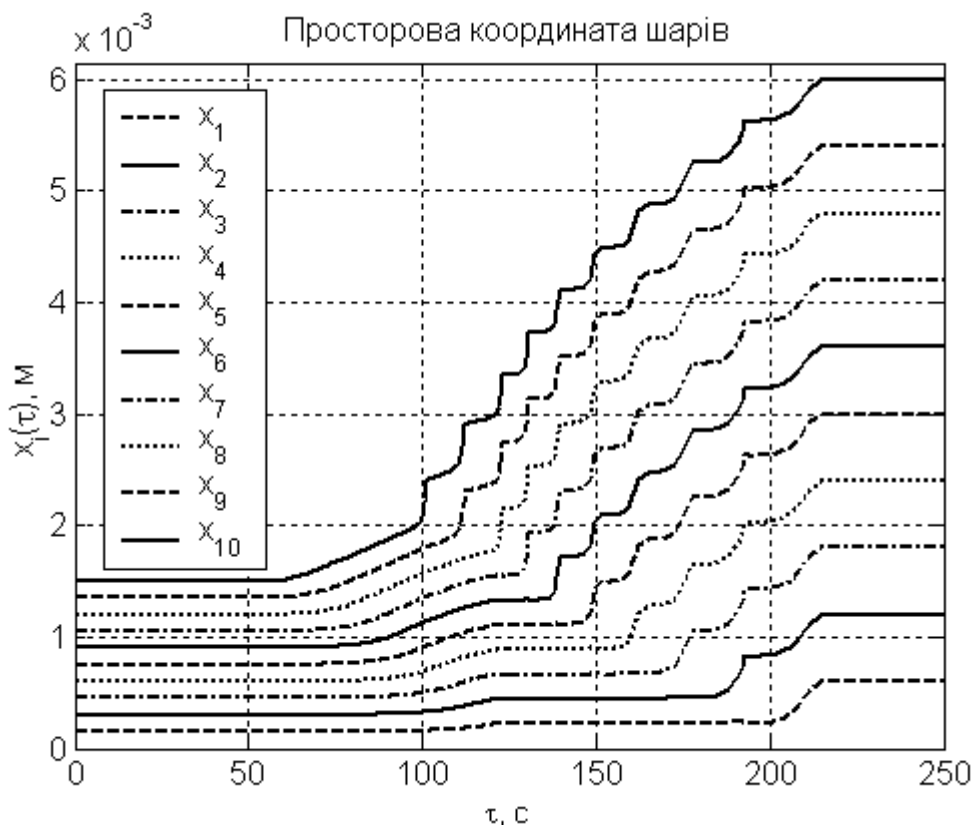


Рис. 4.9 Графіки залежності переміщення верхньої границі елементарних підшарів покриття від часу вогневого впливу

На рис. 4.10 наведені типові модельні залежності температур полум'я $t_f, ^\circ\text{C}$, зовнішньої поверхні покриття $t_s, ^\circ\text{C}$, оберненої до полум'я захищеної поверхні дерев'яної пластини $t_*, ^\circ\text{C}$, і тієї ж поверхні у відсутності захисту $t_{*,free}, ^\circ\text{C}$. Крім того тонкими лініями нанесені температури відповідних шарів покриття $t_1, t_{10}, ^\circ\text{C}$, (у кожен фіксований момент часу меншим значенням індексу i відповідають менші температури).

Порівняння температури поверхні деревини із захистом (t_*) і без нього ($t_{*,free}$) характеризує захисну дію покриття. (Слід пам'ятати, що у моделі деревина розглядається як інертна, через що немає сенсу довіряти цим модельним передбачення при модельних температурах деревини вищих за 200°C .)

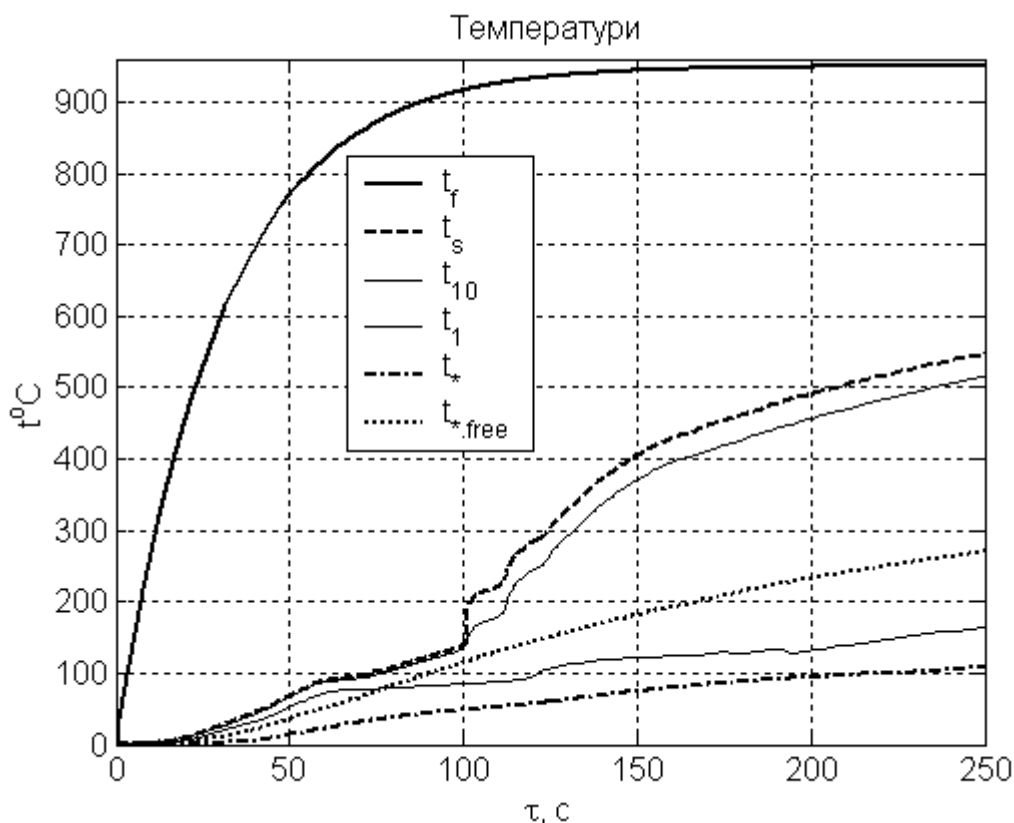


Рис. 4.10 Графіки модельної залежності температур від часу вогневого впливу

Горизонтальна ділянка на графіках при $t \approx 100^\circ\text{C}$, як показує моделювання, пов'язана із початком реакції ендотермічного розпаду (дивись (4.82)), який за моделлю починається при температурах $T_{a1} = 100 + 273, \text{ K}$.

На рис. 4.11 наведена типова модельна залежність локального $k_{V,i}(\tau)$ і загального $k_{V,tot}(\tau)$ коефіцієнта спучування. Перший визначається формулою (4.58), другий задовольняє співвідношенню (4.61).

Початок спучування при $t \approx 100^\circ\text{C}$, відповідає нижньому порогу реакції розпаду; особливості в графіках при $k_V \approx 1.5$ відповідають початку текучості при $T \approx T_{g,beg} = 150 + 273, \text{ K}$; незмінність k_V після досягнення рівня $k_V = 4$ відображає зупинку спучування у зв'язку із делокалізацією газової складової речовини покриття.

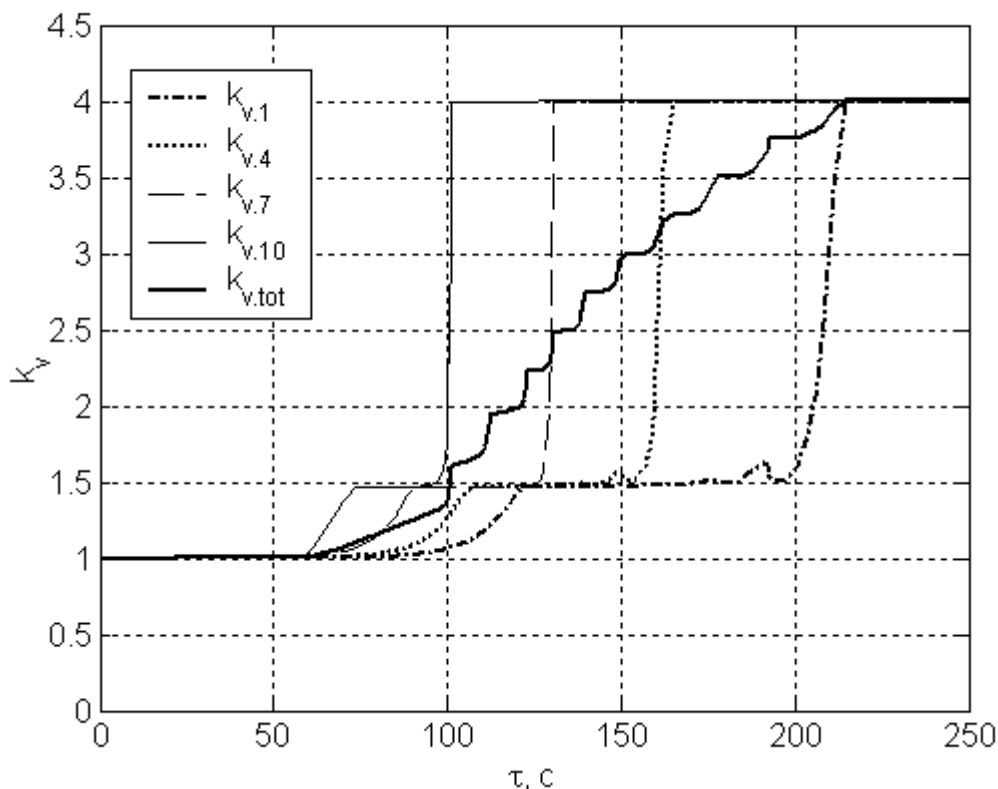


Рис. 4.11 Графіки модельної залежності коефіцієнта спучування захисного покриття від часу теплового впливу

На рис. 4.12 наведена типова модельна залежність коефіцієнта теплопровідності $\lambda_i(\tau) \equiv \lambda(x_i(\tau))$ фіксованих елементів захисного покриття в залежності від часу.

Подібно до коефіцієнту спучування початок зменшення коефіцієнта теплопровідності пов'язаний із досягненням нижнього порогу реакції розпаду при $t \approx 100^\circ\text{C}$; особливості в графіках при $\lambda \approx 0.4$ відповідають початку текучості при $T \approx T_{g,beg} = 150 + 273, \text{ K}$; повільне (у порівнянні із попереднім) зменшення λ після досягнення рівня $\lambda \approx 0.1$ відображає зупинку спучування у зв'язку із делокалізацією газової складової речовини покриття.

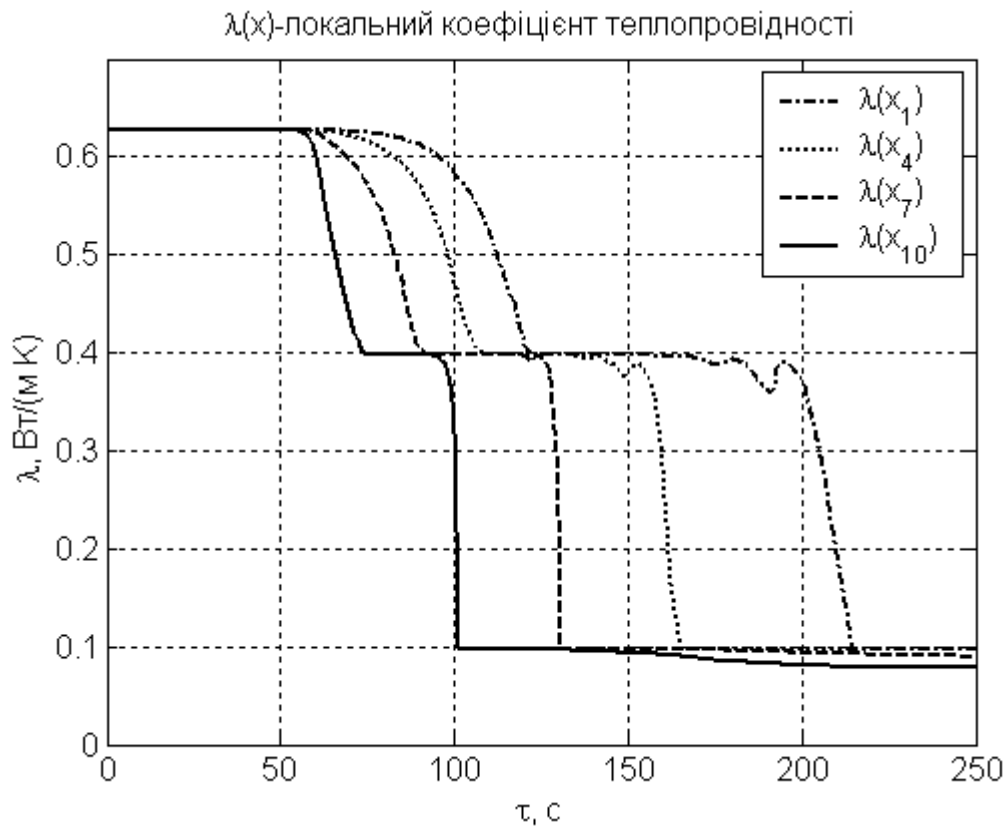


Рис. 4.12 Графіки модельної залежності локального коефіцієнта теплопровідності захисного покриття від часу теплового впливу

На рис. 4.13 наведені модельні залежності відношення маси $dm_{ai}(x_j)$ активного компонента ai елемента покриття, що має поточну координату $x = x_j(\tau)$, до загальної початкової маси dm_0 елемента покриття в залежності від часу. Дана величина позначається згідно із співвідношенням

$$g_a(x_i) \equiv \frac{dm_a(x_i)}{dm_0}, \quad (4.96)$$

де $dm_0 = dm_{a1.0} + dm_{a2.0} + dm_{a3.0} + dm_{b2.0} + dm_{b3.0} + dm_{p.0}$, кг.

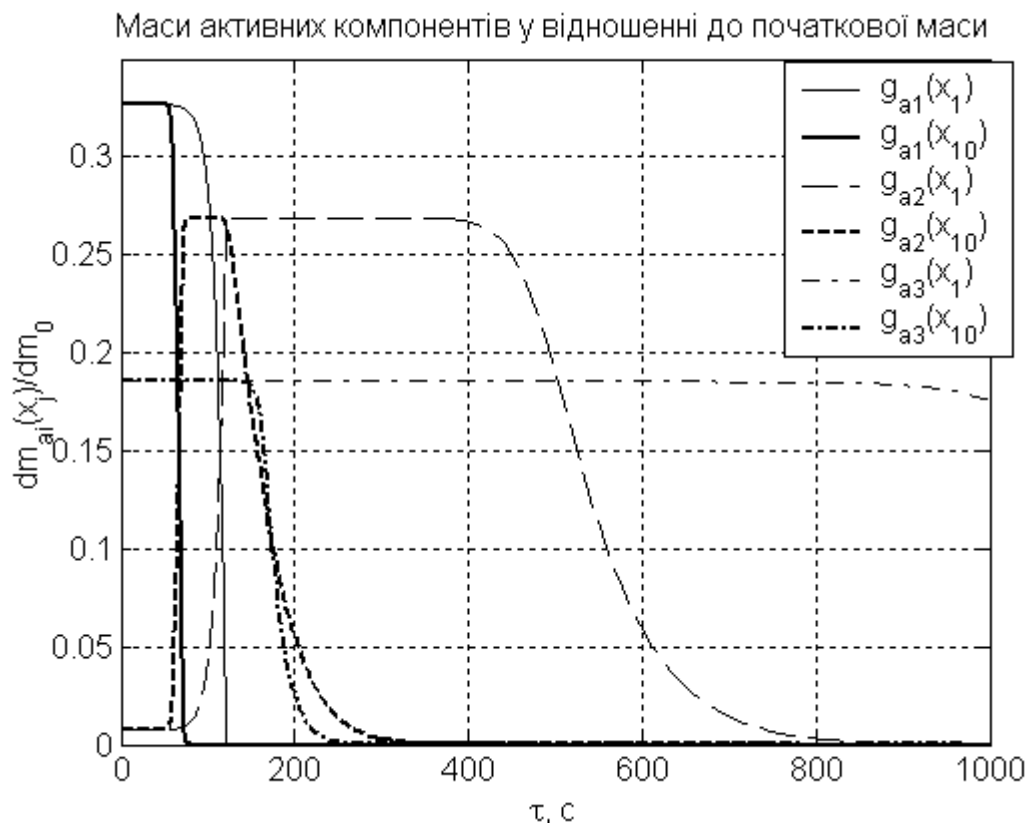


Рис. 4.13 Графіки залежності від часу відношення маси активного компонента до початкової маси у фіксованих елементах захисного шару

Характер поведінки $g_a(x_i(\tau))$ пов'язаний із видом функціональної залежності швидкостей реакцій розпаду від концентрацій і температури (дивись формули (4.82)-(4.84)). Суттєвим є наявність нижніх температурних порогів реакцій ($T_{a1} = 100 + 273$, К, $T_{a2} = 250 + 273$, К, $T_{a3} = 400 + 273$, К). Відмінна (від інших компонент) залежність від часу маси активної компоненти $a2$ пов'язана з тим, що відсутня на початку компонента $a2$, згідно із схемами перетворення, є продуктом першого перетворення, який зникає у другому перетворенні.

На рис. 4.14 наведена модельна залежність загальної відносної втрати маси захисного покриття від часу теплового впливу. Дана величина дорівнює відношенню $\Delta m_{tot}/m_0$, де $\Delta m_{tot}(\tau)$ - загальна втрата маси покриття за час теплового впливу, кг; m_0 - початкова величина маси покриття.. Величина

$\Delta m_{tot}(\tau)$ розраховується, як сума втрат маси усіма елементарними шарами покриття.

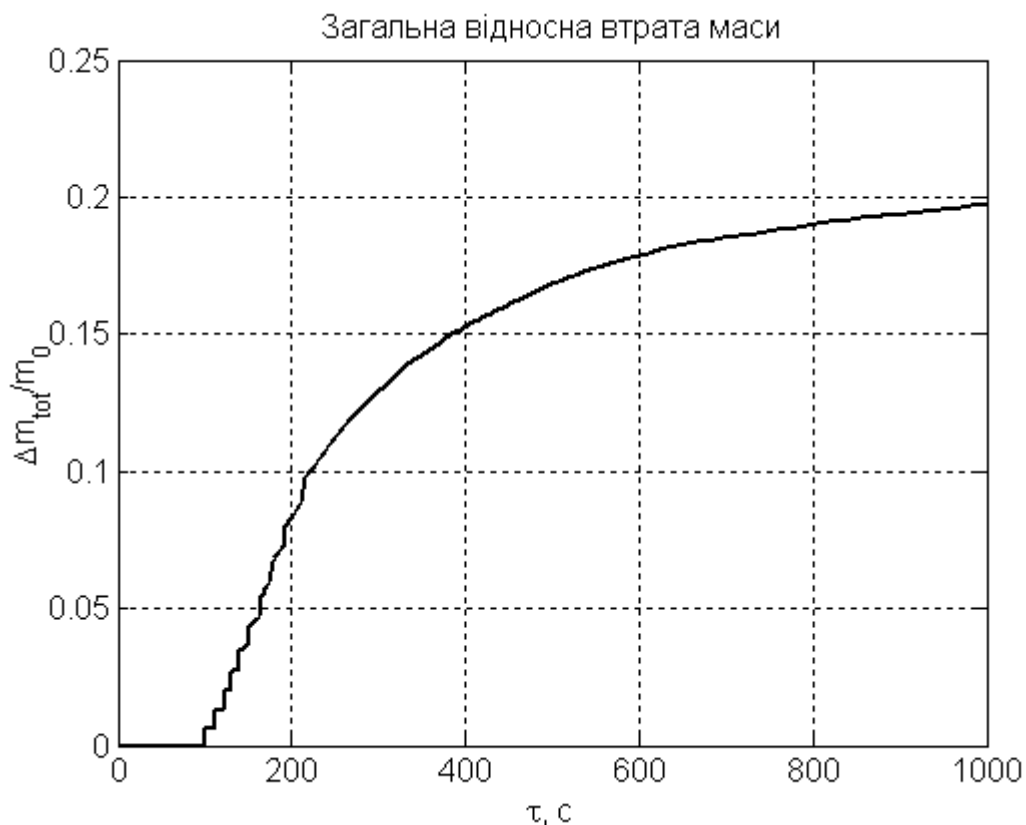


Рис. 4.14 Графік модельної залежності загальної відносної втрати маси захисного покриття від часу теплового впливу

Порівняння експериментальних [15] (рис.4. 15) і отриманих модельних (рис. 4.16) залежностей показує, що наближення трьох активних компонентів у використовуваній моделі може дозволити описати поведінку вогнезахисного покриття СК-1 при нагріванні, не тільки якісно, але і кількісно. При цьому використовується відносно невелика кількість вільних параметрів.

Порівняння графіків з рис.4. 15 і рис.4. 16 показує збіг експериментальних результатів з модельними із точністю $\sim 20\%$, що є вагомим підтвердженням адекватності розробленої моделі.

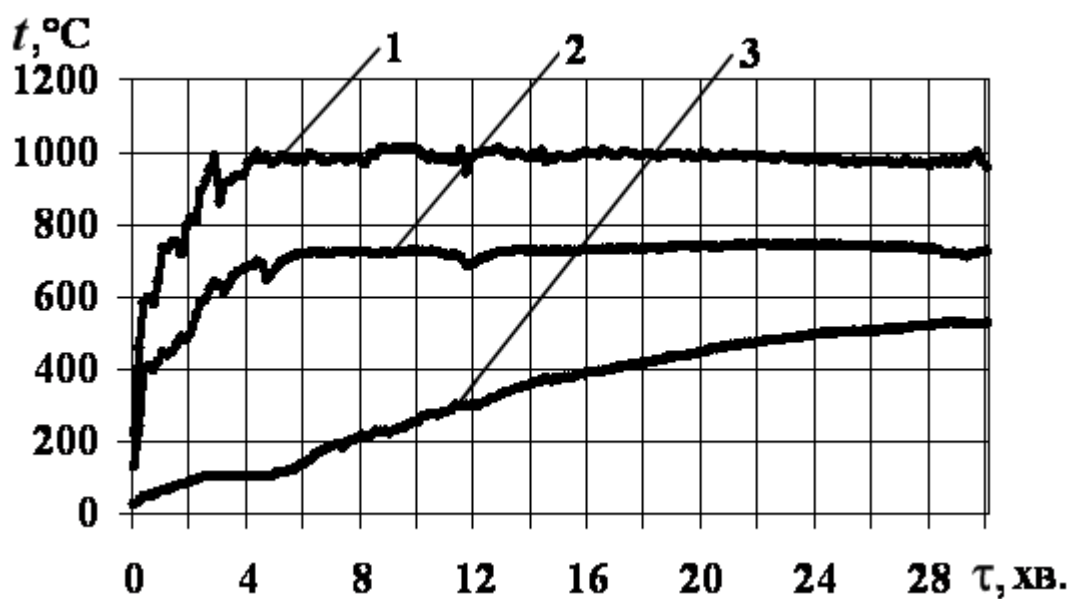


Рис. 4.15 Експериментальні залежності температур від часу вогневої дії:

1 – полум'я; 2 – поверхні «СК-1»; 3 – деревини

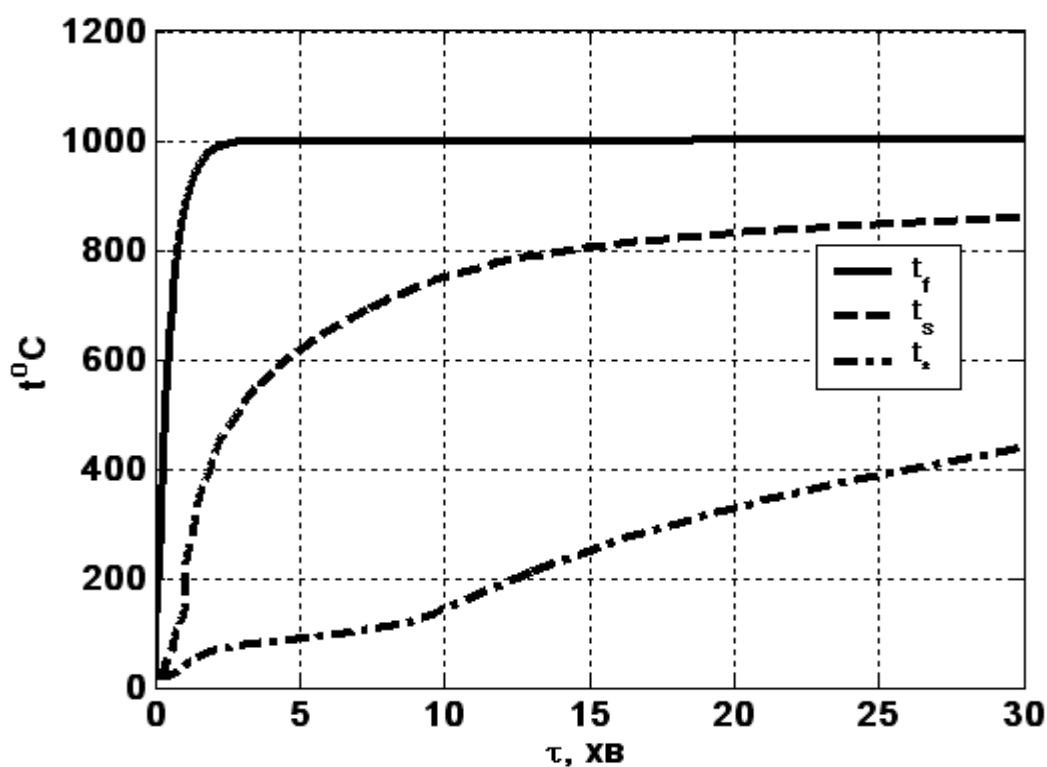


Рис. 4.16 Графіки модельної залежності температур від часу вогневого впливу: t_f – полум'я, °C; t_s – зовнішньої поверхні покриття, °C;

t_* – деревини, °C

У даній моделі легко враховується можливе максимальне значення коефіцієнта спучування матеріалу k_v ($k_{v,max} = 4$ на рис.4.10). У даному описі також легко, змінюючи початкові пропорції компонентів, підібрати обумовлену винесенням газової фази загальну втрату маси покриття ($\Delta m_{tot} / m_0 = 20\%$ на рис.4.14). У даній реалізації моделі можна врахувати процес дегідратації (компонент $a1$ розпадається із утворенням водяної пари $g1$, що відобразилося характерною «поличкою» на рис.4.10 при температурі поблизу 100°C).

Для звуження діапазонів можливих величин швидкостей реакції R_{ai} та ентальпій H_i компонент необхідно провести додаткові калориметричні дослідження на різних режимах нагрівання. При цьому бажано знати, як початковий склад покриття так і кількість компонентів, що утворюються.

Відмітимо, що огляд дерев'яних пластин, задіяних у вогневих випробуваннях показав, що під захисним шаром, дерево піддалося істотній деструкції. Остання обставина вказує на необхідність при описі захисту дерев'яних поверхонь урахувувати в моделі процес піролізу, а для задачі визначення властивостей самого покриття провести експерименти, наносячи покриття на інертні (металеві) пластини.

4.4 Висновки

1. 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.

2. На базі даного опису у наближеннях 1-го та 3-ох активно реагуючи компонентів розроблено алгоритми і комп'ютерні програми, що моделюють захист в умовах сталого теплового впливу та при стандартній пожежі. На

прикладі здатного до спучування покриття СК-1 показало якісний збіг експериментальних та модельних результатів у моделі 1-го активного компонента та кількісний збіг із точністю $\sim 20\%$ у моделі із 3-ма активними компонентами.

РОЗДІЛ 5

ЗАХИСТ ПОВЕРХОНЬ НЕОДНОРІДНИМ ПОКРИТТЯМ

У даному розділі буде розглянуто захист поверхонь, пов'язаний із використанням матеріалів, які або суттєво змінюються у просторі у процесі захисту, або від самого початку мають неоднорідну структуру.

Підрозділ 5.1 присвячений різним аспектам моделюванню захисної дії гелів. У підрозділі 5.2 проведено моделювання захисної дії гранульованого (синонім зернистого) покриття, шляхом ізоляції ним горючої рідини від зовнішнього середовища з метою запобігання пожежі.

5.1 Захист гелієвим покриттям

5.1.1 Теоретичні аспекти висихання гелю при пожежі

Важливою проблемою пожежної безпеки є захист об'єктів від впливу пожежі. Один зі шляхів її рішення - застосування нових вогнезахисних засобів, більш ефективних, ніж традиційна вода, наприклад, гелів водяних розчинів солей. Останнім часом проведений ряд досліджень по виявленню оптимальних варіантів застосування таких гелів для захисту поверхонь від впливу високотемпературного газового середовища, однак відсутня послідовна теорія висихання гелів у цих умовах. Завданням даної роботи є побудова на основі рівнянь тепло- і масопереноса теорії розглянутого процесу.

По даній проблемі існує ряд експериментальних досліджень. В одних (див., наприклад, [175]) відслідковується зміна температури захищеної гелем поверхні тіла, розташованого у потоці гарячих продуктів горіння, в інших вимірюється втрата маси покритих гелем поміщених у полум'я зразків матеріалів [16, 243]. У цих роботах при аналізі результатів висихання гелю фактично розглядається, як випар рідини з вільної поверхні. При цьому не враховується, що пористий залишок, що утвориться при висиханні гелю, - ксерогель - впливає на процес переносу пари. Розгляд проблеми, який враховує

вказані аспекти явища, був зроблений автором цієї роботи. Результати викладені у публікації [34].

Рішення проблеми вимагає спільного розгляду рівнянь тепло- і масопереносу [34]. У даному пункті розглядається одновимірна задача випару термічно тонкого шару гелю, нанесеного на тверду плоску поверхню. Відвід водяної пари від поверхні вологого гелю відбувається через пористе середовище, що формується при висиханні гелю. Схематично ситуація зображена на рис. 5.1, на якому ділянка із просторовою координатою $x < x_0$ відповідає зовнішньому газовому середовищу, ділянка з $x_0 < x < x_1$ - пористому ксерогелю, ділянка з $x_1 < x < x_*$ - вологому гелю, ділянка з $x_* < x$ - твердій основі, на яку гель нанесений. На рисунку відображено просторовий розподіл загального тиску газу - $p(x)$, парціального тиску пари - $p_v(x)$, абсолютної температури - $T(x)$.

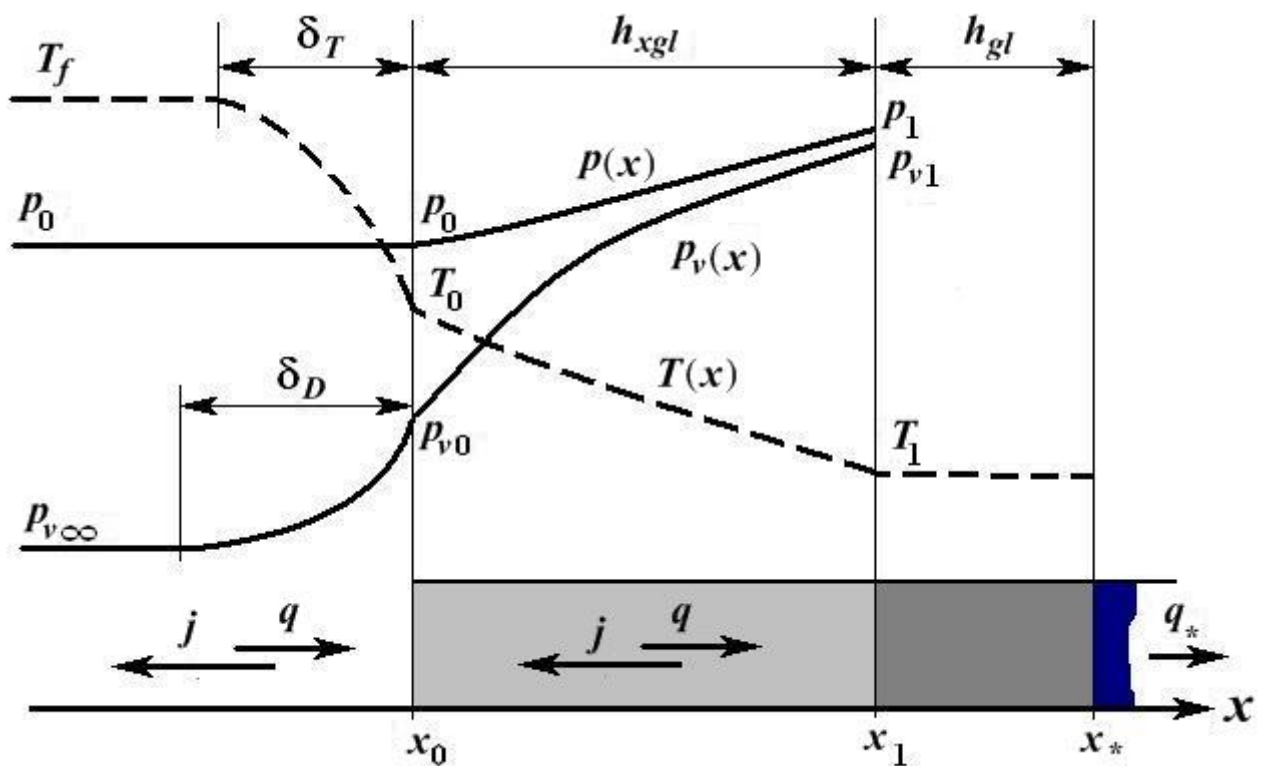


Рис. 5.1 Просторова схема прогріву й масопереносу

Газове середовище розглядається, як двохкомпонентна суміш ідеальних газів, що складається із сухого газу й водяної пари. (Вказівку на відповідні компоненти будуть давати індекси "g" (dry gas) і "v" (water vapor), відповідно.) У зв'язку із цією обставиною молярні концентрації компонент суміші $\phi_g(x)$ і $\phi_v(x)$, моль·м⁻³, задовольняють рівнянням стану ідеального газу:

$$p_v(x) = \phi_v(x) \cdot R \cdot T(x), \quad p_g(x) = \phi_g(x) \cdot R \cdot T(x), \quad (5.1)$$

де $p_v(x)$ і $p_g(x)$ - парціальні тиски відповідних компонентів, Па; T - абсолютна температура середовища, К. Відмітимо, що у даному випадку (і надалі у розділі) у формулах маються на увазі дійсні (тобто розраховані на одиницю дійсно занятого газом об'єму) концентрації.

Щільності молярних потоків компонент суміші $j_{\mu,v}(x)$ і $j_{\mu,g}(x)$ мають дифузійну і конвекційну складові:

$$j_{\mu,v}(x) = -D \cdot \frac{\partial \phi_v(x)}{\partial x} + w(x) \cdot \phi_v(x), \quad (5.2)$$

$$j_{\mu,g}(x) = -D \cdot \frac{\partial \phi_g(x)}{\partial x} + w(x) \cdot \phi_g(x), \quad (5.3)$$

де $D(T)$ - коефіцієнт взаємної дифузії компонент, м²·с⁻¹; w - швидкість переносу газової суміші, як цілого, м·с⁻¹. Відмітимо, що у даному випадку коефіцієнт дифузії розраховується на одиницю площі перерізу вільного простору, поперек якої здійснюється масоперенос.

Усереднена по поперечному перерізу щільність потоку енергії в середовищі $q(x)$, Вт·м⁻², також містить дифузійну й конвекційну складові:

$$q(x) = -\lambda \cdot \frac{\partial T(x)}{\partial x} + k \cdot [j_{\mu,v} \cdot H_{\mu,v}(T) + j_{\mu,g} \cdot H_{\mu,g}(T)], \quad (5.4)$$

де $\lambda(T)$ - коефіцієнт теплопровідності середовища, $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. (У чисто газовому середовищі (при $x < x_0$) $\lambda = \lambda_{free}$, де λ_{free} - коефіцієнт теплопровідності газової суміші за межами покриття; у пористому середовищі ксерогеля (при $x_0 < x < x_1$) $\lambda = \lambda_{xgl}$, де λ_{xgl} - коефіцієнт теплопровідності ксерогеля.) Безрозмірний множник k враховує ступінь свободи переносу газу в просторі. У чисто газовому середовищі (при $x < x_0$) $k = 1$, у пористому середовищі (при $x_0 < x < x_1$) $k < 1$ і дорівнює частці площі перерізу вільного потоку в загальній площі перерізу матеріалу. Величини $H_{\mu,v}$ і $H_{\mu,g}$ є питомими молярними ентальпіями водяної пари і сухого газу, відповідно, $\text{Дж}\cdot\text{моль}^{-1}$.

Рівняння (5.1) -(5.4) у вільному просторі (при $x < x_0$) доповнюються умовою сталості загального тиску $p(x) = p_v(x) + p_g(x)$:

$$p_v(x) + p_g(x) = p_0 = \text{const}, \quad (5.5)$$

а в межах ксерогеля (при $x_0 < x < x_1$) - рівнянням, що визначає швидкість руху в'язкої рідини в каналі [242]:

$$w(x) = -B(T) \cdot \frac{\partial p(x)}{\partial x}. \quad (5.6)$$

Величина $B(T)$ оцінюється співвідношенням $B(T) = C_w \cdot \frac{d_c^2}{\eta}$, де d_c являє собою середній діаметр каналу протікання (пори), м, а η - коефіцієнт динамічної в'язкості газового середовища, $\text{Па}\cdot\text{с}$; C_w - безрозмірний множник ~ 1 , що залежить від форми каналу протікання..

У середовищі, яке містить газ, ($x < x_1$) задача розглядається у квазістатичному наближенні, тобто припускається просторова незмінність теплового потоку і потоків компонент. Це означає, що

$$\text{при } x < x_0 \quad j_{\mu,v}(x) = j_\mu, \quad j_{\mu,g}(x) = 0, \quad q(x) = q, \quad (5.7)$$

$$\text{при } x_0 < x < x_1 \quad j_{\mu,v}(x) = \frac{j_\mu}{k}, \quad j_{\mu,g}(x) = 0, \quad q(x) = q, \quad (5.8)$$

де константи j_μ і q , що є щільністю молярного потоку пари у вільному просторі і питомим потоком тепла, відповідно, можуть залежати від часу τ . При записі (5.7), (5.8) враховано, що на границі вільного середовища із ксерогелем ($x = x_0$) в k раз змінюється площа перерізу газового потоку, а на границі ксерогеля з гелем ($x = x_1$) відсутній потік сухого газу.

Граничними умовами до рівнянь (5.1)-(5.4), крім згаданої неперервності потоків енергії й речовини, є неперервність температури й концентрацій (парціальних тисків) компонентів на границях $x = x_0$ і $x = x_1$. Крім того, задається температура та тиски у газовому середовищі вдалині від поверхні ксерогеля, тобто при $x \rightarrow -\infty$

$$T(x) = T_f, \quad p_v(x) = p_{v,\infty}, \quad p_g(x) = p_0 - p_{v,\infty}. \quad (5.9)$$

Перед розглядом задача в газовому середовищі запишемо співвідношення матеріального й енергетичного балансів процесів взаємодії шару гелю із сусідніми середовищами.

Як ми вже відзначали, потоки сухого газу на границях гелю відсутні, у зв'язку із чим загальний питомий потік газів (j) співпадає з питомим потоком водяної пари (j_v). Для визначення останнього розглянемо процес

випаровування, який в даній моделі має в місці на границі ($x = x_1$) гелю із ксерогелем. Пара з'являється внаслідок переходу гелю в ксерогель із виділенням води. Вода виноситься, а границя гелю ($x = x_1$) переміщається вправо, зменшуючи товщину $h_{gl} = x_* - x_1$ (дивися рис.5,1) і масу шару гелю. У зв'язку із цим щільність потоку пари $j = j_v = \mu_v \cdot j_{\mu,v}$, $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, задовольняє співвідношенню:

$$j = g_w \cdot \rho_{gl} \cdot \frac{dh_{gl}}{d\tau}, \quad (5.10)$$

де $\mu_v = 0,018 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$ - молярна маса водяної пари; ρ_{gl} - густина гелю, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$g_w = \left| \frac{dm_w}{dm_{gl}} \right|$ - абсолютна величина відношення маси води dm_w , що утворюється при розкладанні гелю у воду й ксерогель, до маси гелю, що розклався, dm_{gl} . Інакше говорячи, g_w є масовою часткою здатною до випаровування води у складі гелю.

Енергія надходить у шар гелю з боку більш гарячого ксерогеля (відповідний питомий потік дорівнює q), а уходить у тверду основу (відповідний питомий потік дорівнює q_* , дивитися рис. 5.1). Дисбаланс цих енергетичних потоків приводить до переходу частини гелю в ксерогель і воду та нагрівання гелю. Утворювана водяна пара видаляється із системи, створюючи потік маси із щільністю (5.10). Шар гелю поводить себе, як термічно тонке тіло, у зв'язку із чим може характеризуватися єдиною температурою T_1 . Зменшення маси гелю dm_{gl} жорстко пов'язане з виникаючими масами ксерогеля dm_{xgl} і води dm_w : $dm_{gl} = -(dm_{xgl} + dm_w)$. Перераховані обставини дозволяють надати рівнянню енергетичного балансу наступний вигляд:

$$q = j \cdot (H_w + \Delta H_w) + \rho_{gl} \cdot c_{p,gl} \cdot h_{gl} \cdot \frac{dT_1}{d\tau} + q_*, \quad (5.11)$$

де $\Delta H_w = \left| \frac{dm_{gl}}{dm_w} \right| \cdot H_{gl} - H_w - \left| \frac{dm_{xgl}}{dm_w} \right| \cdot H_{xgl}$ - енергія утворення гелю із ксерогеля та води, розрахована на одиницю маси потрібної для цього води, Дж·кг⁻¹; H_{gl} , H_w , H_{xgl} - питомі ентальпії гелю, води й ксерогеля, відповідно, Дж·кг⁻¹;
 $c_{p,gl} = \left(\frac{\partial H_{gl}}{\partial T} \right)_p$ - питома ізобарна теплоємність гелю, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

При розгляді переносу у вільному просторі ($x < x_0$) вирішуються рівняння (5.1)-(5.5), (5.7), (5.9). При цьому припускається, що величини концентрацій компонент виходять на свої об'ємні значення на відстані, рівній товщині дифузійного граничного шару δ_D , а температура середовища виходить на об'ємне значення T_f на відстані, що дорівнює товщині температурного граничного шару δ_T , від поверхні ксерогеля (див. рис. 5.1). Товщини δ_D і δ_T тісно пов'язані з характером обтікання поверхні тіла парогазовою сумішшю. Для їхнього визначення зазвичай використовують експериментальні дані, оброблені з використанням теорії подібності. Ми будемо вважати, що така задача виконана. У такому випадку величини δ_D і δ_T виражаються через характерний розмір задачі обтікання L (приблизно дорівнює розміру поверхні обтікання) за допомогою дифузійного $Nu_D \equiv Sh$ і температурного $Nu_T \equiv Nu$ чисел (критеріїв) подібності Нуссельта, які ще мають назви чисел (критеріїв) Шервуда та Нуссельта, відповідно:

$$\delta_D = \frac{L}{Nu_D}, \quad \delta_T = \frac{L}{Nu_T}.$$

При нехтуванні малими ефектами типу термодифузії рішення задачі переносу пари (викладене, наприклад, в [229, 56]) має вигляд:

$$j = - \frac{\mu_v \cdot p_0}{\delta_D \cdot \left(\frac{T}{D} \right)_{free} \cdot R} \cdot \ln \left(\frac{p_0 - p_{v\infty}}{p_0 - p_{v0}} \right), \quad (5.12)$$

де p_{v0} - парціальний тиск водяної пари на поверхні ксерогеля, Па; величина з верхньою горизонтальною рискою та індексом "*free*" позначає середнє значення по перехідному шару у вільному просторі, тобто

$$\left(\frac{T}{D} \right)_{free} \equiv \frac{1}{\delta_D} \cdot \int_{x_0 - \delta_D}^{x_0} \frac{T}{D(T)} dx. \quad (5.13)$$

Задача теплопереносу вирішується аналогічно.

Виходять із рівняння (5.4), яке можна записати вигляді

$$q = -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + j_v \cdot [H_v(T_0) + c_{p,v} \cdot (T - T_0)] = const, \quad (5.14)$$

де $H_v = H_{\mu v} / \mu_v$ - питома масова ентальпія водяної пари, Дж·кг⁻¹; $c_{p,v} = \left(\frac{\partial H_v}{\partial T} \right)_p$

- питома ізобарна теплоємність водяної пари при $T = T_0$, Дж·кг⁻¹·К⁻¹; T_0 - абсолютна температура поверхні ксерогеля, К (дивись рис. 5.1).

Рівняння (5.14) у області перехідного газового шару ($x \in [x_0 - \delta_T, x_0]$) можна представити у вигляді

$$\frac{dT}{j_v \cdot c_{p,v} \cdot (T - T_0) + j_v \cdot H_v(T_0) - q} = \frac{dx}{\lambda_{free}}.$$

Проінтегрувавши останній вираз в межах даного шару, отримаємо вираз

$$\ln \left[\frac{j_v \cdot H_v(T_0) - q}{j_v \cdot c_{p,v} \cdot (T_f - T_0) + j_v \cdot H_v(T_0) - q} \right] = j_v \cdot c_{p,v} \cdot \overline{\lambda_{free}^{-1}} \cdot \delta_T, \quad (5.15)$$

де $\overline{\lambda_{free}^{-1}}$ - середнє значення зворотного коефіцієнта теплопровідності газового середовища:

$$\overline{\lambda_{free}^{-1}} \equiv \frac{1}{\delta_T} \cdot \int_{x_0 - \delta_T}^{x_0} \frac{dx}{\lambda_{free}(T)}. \quad (5.16)$$

Із співвідношення (5.15) можна отримати алгебраїчний вираз квазістаціонарного питомого теплового потоку у газовому середовищі

$$q = j \cdot H_v(T_0) + \frac{j \cdot c_{p,v} \cdot (T_f - T_0)}{1 - \exp\left(-j \cdot c_{p,v} \cdot \overline{\lambda_{free}^{-1}} \cdot \delta_T\right)}. \quad (5.17)$$

Порівняємо із одиницею вираз у показнику експоненти формули (5.17):

$$-j \cdot c_{p,v} \cdot \overline{\lambda_{free}^{-1}} \cdot \delta_T = -\frac{j \cdot c_{p,v} \cdot (T_f - T_0)}{\overline{\lambda_{free}^{-1}} \cdot \delta_T} \approx \frac{j \cdot c_{p,v} \cdot (T_f - T_0)}{j \cdot H_v(T_0)} \approx \frac{c_{p,v} \cdot (T_f - T_0)}{H_v(T_0)} \ll 1.$$

Остання дріб є відношенням зміни ентальпії, пов'язаною зі зміною температури, до теплоти пароутворення, через що ця величина значно менша за одиницю. Із такою точністю формулі (5.17) можна надати вигляд;

$$q = \frac{\overline{\lambda}_{free}}{\delta_T} \cdot (T_f - T_0) + j \cdot H_v(T_0), \quad (5.18)$$

де для скорочення запису введено позначку $\overline{\lambda}_{free} = \left[\overline{\lambda}_{free}^{-1} \right]^{-1}$.

При розгляді теплопереносу у ксерогеле ($x_0 < x < x_1$) використовуються рівняння (5.4), (5.8). При цьому рівняння (5.4), у тім же наближенні щодо великої теплоти паротворення у порівнянні з теплою нагрівання, приймає вигляд:

$$q = \frac{\overline{\lambda}_{xgl}}{h_{xgl}} \cdot (T_0 - T_1) + j \cdot H_v(T_1), \quad (5.19)$$

де $\overline{\lambda}_{xgl}$ - звичайне середнє по температурі в інтервалі від T_0 до T_1 значення коефіцієнта теплопровідності ксерогеля. Величина $h_{xgl} = x_1 - x_0$ - являє собою товщину шару ксерогеля, м. Вона простим образом пов'язана з початковою товщиною гелієвого шару h_0 :

$$h_{xgl} = k_L \cdot (h_0 - h_{gl}), \quad (5.20)$$

де k_L - коефіцієнт лінійного розширення (стиску) гелю при висиханні в ксерогель.

Для визначення зміни тиску уздовж шару ксерогеля досліджується загальна молярна концентрація газу $\varphi = \varphi_v + \varphi_g$, яка, відповідно до формул (5.1)-(5.3), (5.6), (5.8), задовольняє співвідношенню

$$\frac{j_\mu}{k} = -D \frac{\partial \varphi}{\partial x} + w \cdot \varphi = -D \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} - B \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \varphi. \quad (5.21)$$

Для його спрощення використаємо ту обставину, що згідно оцінок $\frac{D}{B \cdot P} \approx \frac{10^{-15}(\dot{i}^2)}{l^2} \ll 1$ (тобто конвекційна складова потоку значно перевищує дифузійну), і отже

$$\frac{\partial P(x)}{\partial x} = -\frac{j_\mu}{k \cdot B \cdot \varphi(x)} = -\frac{j_\mu}{k} \cdot \frac{\eta}{C_w \cdot l_i^2 \cdot \varphi(x)} = -\frac{j_\mu}{k} \cdot \frac{v \cdot \mu_{mix}}{C_w \cdot l_i^2}, \quad (5.22)$$

де v і μ_{mix} - відповідно, коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, і середня молярна маса, $\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, газової суміші в даному місці ксерогеля. (При одержанні останнього співвідношення використовувався зв'язок коефіцієнтів в'язкості: $\eta = \rho \cdot v$, де $\rho(x) = \mu_{mix} \cdot \varphi(x)$ - густина газової суміші, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.)

Інтегрування формули (5.22) по x дозволяє зв'язати значення загального тиску $p_1 = p(x_1)$ і $p_0 = p(x_0)$ на границях ксерогеля:

$$p_1 = p_0 - \frac{j}{k} \cdot h_{xgl} \cdot \omega, \quad (5.23)$$

де

$$\omega = \frac{1}{h_{xgl}} \cdot \int_{x_0}^{x_0+h_{xgl}} \frac{\mu_{mix}}{\mu_v} \cdot \frac{v}{C_w \cdot l_i^2} dx, \text{ с}^{-1}. \quad (5.24)$$

Ще одне співвідношення виводиться аналогічно формулі (5.12) і має близький вигляд:

$$j = -k \cdot \frac{\mu_v \cdot p_0}{h_{xgl} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{xg} \cdot R} \cdot \ln \left(\frac{p_0 - p_{v.0}}{p_1 - p_{v.1}} \right), \quad (5.25)$$

де $p_{v,1}$ - парціальний тиск водяної пари на границі ксерогеля з гелем, Па; величина з верхньою горизонтальною рисою та індексом "xgl" позначає

$$\overline{\left(\frac{T}{D}\right)}_{xgl} \equiv \frac{1}{h_{xgl}} \cdot \int_{x_0}^{x_0+h_{xgl}} \frac{T}{D(T)} \cdot \frac{p_0}{p} dx. \quad (5.26)$$

У результаті ми для 10-ти незалежних змінних ($j, q, q_*, T_0, T_1, p_{v,0}, p_{v,1}, p_1, h_{gl}, h_{xgl}$) маємо 8 рівнянь зв'язку ((5.10)-(5.12), (5.18)-(5.20), (5.23), (5.25)).

Будемо припускати, що (подібно тиску насиченої пари води над рідкою водою) тиск пари води у поверхні гелю p_v є відомою функцією $p_s(T)$ температури цієї поверхні T . Таке припущення дає додаткове (9-те) рівняння зв'язку:

$$p_{v,1} = p_s(T_1). \quad (5.27)$$

Відзначимо, що врахування питомого теплового потоку q_* вимагає самоузгодженого рішення зовнішньої ($x > x_1$) задачі нестационарної теплопровідності. Ця загальна проблема не є питанням даної роботи. (У багатьох випадках у нульовому наближенні можна прийняти, що $q_* = 0$.)

Для подальшого аналізу виключимо з розгляду явну залежність від змінної T_0 . Скористаємося рівняннями (5.18), (5.19). В обговореному раніше наближенні нехтування теплотою нагрівання $[H_v(T_0) - H_v(T_1)] = c_{p,v} \cdot (T_0 - T_1)$ у порівнянні із теплотою паротворення $r = [H_v(T_1) - H_w(T_1)]$ вони дають зв'язок

$$q = \frac{T_f - T_1}{\frac{\delta_T}{\lambda_{free}} + \frac{h_{xgl}}{\lambda_{xgl}}} + j \cdot H_v(T_1). \quad (5.28)$$

Об'єднавши далі рівняння (5.28) і (5.11), можна виключити з розгляду величину q . Відповідний вираз з урахуванням формули (5.20) має вигляд:

$$j = -\frac{1}{r - \Delta H_w} \cdot \left[\frac{T_f - T_1}{\frac{\delta_T}{\lambda_{free}} + \frac{k_L \cdot (h_0 - h_{gl})}{\lambda_{xgl}}} - \rho_{gl} \cdot c_{p,gl} \cdot h_{gl} \cdot \frac{dT_1}{d\tau} - q_* \right]. \quad (5.29)$$

Спільний розгляд рівнянь (5.12) і (5.25) дозволяє позбутися від явної залежності від змінної p_{v0} . Результат цих перетворень із урахуванням зв'язків (5.20), (5.23) і (5.27) має вигляд:

$$j = -\frac{\mu_v \cdot \frac{p_0}{R}}{\delta_D \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{free} + \frac{k_L \cdot (h_0 - h_{gl})}{k} \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{xgl}} \cdot \ln \left(\frac{p_0 - p_{v,\infty}}{p_0 - \frac{j}{k} \cdot k_L \cdot (h_0 - h_{gl}) \cdot \omega - p_s(T_1)} \right), \quad (5.30)$$

У результаті ми для 4-х незалежних змінних (j , T_1 , h_{gl} , q_*) маємо 3 рівняння зв'язку ((5.10), (5.29), (5.30)). Саме ці три співвідношення вирішують поставлену задачу. Так наближення, у якому гель розглядається як вода, формально реалізується у межах $g_w = 1$, $k_L = 0$ і $\Delta H_w = 0$. У цьому випадку існує стаціонарний режим сушки, при якому $T_1 = const$ і $j = const$, у випадку ж урахування впливу шару ксерогелю таке рішення (через зміну товщини цього шару із часом) стає неможливим.

5.1.2 Моделювання охолодження термічно товстого тіла гелеутворюючим складом.

Охолодження горючих матеріалів і конструкцій під час пожежі є однією з основних умов її успішної ліквідації. У якості як охолоджуючої, так і вогнегасної речовини в більшості випадків використовується вода, яка має унікально високу охолоджувальну здатність. На жаль, коефіцієнт використання води при гасінні пожеж за звичай не перевищує 10% [56]. Вода стікає з похилих і вертикальних поверхонь. Це приводить до необхідності багаторазової повторної обробки поверхонь новими порціями води, що істотно зменшує можливості оперативного вогнезахисту.

Раніше для підвищення ефективності пожежогасіння були запропоновані вогнегасні гелеутворюючі системи (ГУС) [165-167]. При їхньому застосуванні на поверхні захисту утворюється стійкий не текучий вогнезахисний шар, який втримується на похилих і вертикальних поверхнях.

Перевага ГУС перед водою полягає в істотному зменшенні втрат і відповідному зменшенні витрати вогнегасних речовин й одночасному зменшенні збитків від заливу водою нижніх поверхів при гасінні пожежі.

Питання про динаміку охолодження об'єктів, оброблених ГУС, не було розглянуто. У зв'язку із цим доцільно провести математичне моделювання такого процесу. Така задача була вирішена. Основні результати, які викладаються у даному пункті, були опубліковані у роботах [40, 41].

У даному пункті розділу проблема розглядається як задача охолодження масивного тіла (півпростору) однорідно нагрітого до температури $t_0 > t_{cr}$, де t_{cr} критична температура явища, яка є температурою рівноваги водяної пари із вологим гелем. Для охолодження тіла на нього наноситься плівка вологого гелю із температурою $t_{gl0} < t_{cr}$. Внаслідок теплового впливу з боку охолоджуваного тіла гель спочатку нагрівається до температури t_{cr} , а далі (у випадку можливості відводу пари, що утвориться) «сушиться»: відбувається перехід рідкої складової гелю в газоподібну фазу з наступним видаленням пари. Далі йде охолодження масивного тіла крізь висушений гель. Інакше говорячи, в процесі охолодження масивного тіла реалізуються два послідовних етапи: А)

прогрів вологого гелю до температури t_{cr} з наступним «википанням» рідкої фази гелю; Б) охолодження масивного тіла з відводом тепла у зовнішнє середовище через теплоізолюючий шар сухого гелю, що утворився. Опишемо ці етапи докладніше.

А) Спочатку вологий гелю утворить на плоскій поверхні масивного тіла плоску плівку товщиною $h = h_{gl0}$. Далі за рахунок тепла, що надходить від масивного тіла, іде процес прогріву плівки вологого гелю до температури t_{cr} . Його динаміка така: спочатку за нехтовно малий час температура гелю в площині контакту гелієвої плівки з масивним тілом (просторова координата $x=0$ на рис. 5.2) досягає величини t_{cr} . Далі фронт критичного прогріву (до температури t_{cr}) рухається по вологому гелі справа наліво (на рис. 5.2), при цьому наростання температури вологого гелю праворуч від фронту нехтовно мале. На цій стадії випаровування пригнічується відсутністю можливості відводу пари. По досягненню фронтом критичного прогріву зовнішньої границі гелієвої плівки (координата $x=-h$ на малюнку) на цій поверхні починається процес сушіння гелю з відводом пари, що утворюється, у зовнішнє середовище (уліво). Відповідний фронт висихання гелю, що має ту ж температуру t_{cr} , рухається до масивного тіла (зліва направо), при цьому пара відводиться крізь плівку щойно створеного сухого гелю. Процес закінчується по досягненні фронтом висихання границі масивного тіла, температура якої весь етап «А» зберігає практично постійне значення t_{cr} . У той же час товщина плівки h може змінюватися.

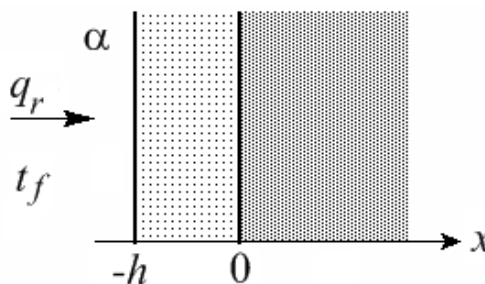


Рис. 5.2 Просторова схема охолодження

Ми припускаємо, що температурне поле $t(x, \tau), ^\circ\text{C}$, у масивному тілі протягом обох етапів охолодження (А и Б) описується лінійним рівнянням нестационарної теплопровідності:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a_* \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x < \infty; \quad (5.31)$$

у якому

$$a_* \equiv \frac{\lambda_*}{c'_*},$$

- коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а λ_* і c'_* - відповідно, коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, і питома об'ємна ізобарна теплоємність, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$, масивного тіла.

Граничною умовою рівняння (5.31) у ході всього процесу є обмеження величини температури тіла вдалині від границі:

$$t(x, \tau)|_{x=\infty} < \text{const} . \quad (5.32)$$

Ключова обставина, що дозволяє аналітично описати температурне поле в масивному тілі в ході етапу «А», є незмінність температури тіла на границі з гелем. Воно задає характерну тільки для етапу «А» другу граничну умову:

$$t(+0, \tau) = t_{cr} . \quad (5.33)$$

Початковою умовою задачі (5.31)-(5.33) прийнято однорідний початковий розподіл температури в масивному тілі ($x > 0$):

$$t(x, -\Delta\tau_A) = t_0, \quad (5.34)$$

де t_0 – початкова температура, яка вважається відомою, а $\Delta\tau_A$ – тривалість етапу «А», що починається (при $\tau = -\Delta\tau_A$) з утворення плівки вологого гелю на поверхні масивного тіла і закінчується (при $\tau = 0$) у момент повного висихання гелю, тобто, інакше кажучи, на етапі «А» $\tau \in [-\Delta\tau_A; 0]$.

Задача (5.31)-(5.34) є відомою граничною задачею 1-го роду. Її рішення має вигляд (дивіться, наприклад, [106]):

$$t(x, \tau) = t_0 + \Delta t_{cr} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_* \cdot (\tau + \Delta\tau_A)}}\right), \quad (5.35)$$

де $\Delta t_{cr} \equiv t_{cr} - t_0$, а символом $\operatorname{erfc}(Z)$ позначена додаткова функція помилок Гаусса від аргументу Z .

Для визначення відсутньої величини $\Delta\tau_A$ скористаємося міркуваннями енергетичного балансу. Будемо вважати, що всі зміни, що відбуваються з гелієвою плівкою в ході етапу «А», забезпечувалися за рахунок потоку тепла від масивного тіла.

Теплота ΔE_s , Дж·м⁻², що передається із масивного тіла в гель у розрахунку на 1 м² площі контакту за час етапу «А», згідно із основним законом теплопровідності Фур'є (із урахуванням формули (5.35)) дорівнює

$$\Delta E_s = \left| \int_{-\Delta\tau_A}^0 \lambda_* \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} d\tau \right| = \left| \int_{-\Delta\tau_A}^0 \frac{\lambda_* \cdot \Delta t_{cr} \cdot d\tau}{\sqrt{\pi \cdot a_* \cdot (\Delta\tau_A + \tau)}} \right| = \frac{2 \cdot \lambda_* \cdot |\Delta t_{cr}| \cdot \sqrt{\Delta\tau_A}}{\sqrt{\pi \cdot a_*}}, \quad (5.36)$$

Ця теплота йде на нагрівання вологого гелю від початкової температури гелю t_{gl0} до температури t_{cr} і подальшу повну сушку його при сталій температурі t_{cr} . Енергія двох останніх процесів ΔE_{gl} , Дж·м⁻², оцінюється співвідношенням

$$\Delta E_{gl} = h_{gl0} \cdot [k_m \cdot \rho_{gl} \cdot \Delta H_{gl} + c'_{p.gl} \cdot (t_{cr} - t_{gl0})], \quad (5.37)$$

де $c'_{p.gl}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність вологого гелю, Дж·м⁻³·К⁻¹; ρ_{gl} - густина вологого гелю, кг·м⁻³; k_m - масова частка вологого гелю, що переходить у пару при повнім сушінні гелю; ΔH_{gl} - теплота, Дж·кг⁻¹, що йде на одержання 1 кг пари з вологого гелю при температурі t_{cr} .

За час $\Delta\tau_A$ етапу А із гелієвої плівки у навколишнє середовище звичайним (не пов'язаним із переносом пари) теплообміном піде кількість теплоти ΔE_α , Дж·м⁻². Враховуючі, що енергія, необхідна на сушку значно перевищує енергію, що йде на нагрівання, а сушка вважається ізотермічною, величину ΔE_α можна оцінити співвідношенням

$$\Delta E_\alpha = [\alpha \cdot (t_{cr} - t_f) - q_r] \cdot \Delta\tau, \quad (5.38)$$

де α – коефіцієнт конвекційної тепловіддачі з даної поверхні у навколишнє середовище (повітря), Вт·м⁻²·К⁻¹; t_f – температура навколишнього середовища, °С; q_r – результуюча щільність потоку енергії теплового випромінювання, що падає на поверхню, Вт·м⁻² (дивись рис. 5.2).

Співвідношення енергетичного балансу гелієвої плівки за час $\Delta\tau_A$ етапу А має вигляд:

$$\Delta E_s = \Delta E_{gl} + \Delta E_\alpha, \quad (5.39)$$

це з врахуванням формул (5.36)-(5.38) приводить до квадратного рівняння відносно величини $\sqrt{\Delta\tau_A}$:

$$\left[\alpha \cdot (t_{cr} - t_f) - q_r \right] \cdot \Delta \tau_A - \frac{2 \cdot \lambda_* \cdot |\Delta t_{cr}| \cdot \sqrt{\Delta \tau_A}}{\sqrt{\pi \cdot a_*}} + h_{gl0} \cdot \left[k_m \cdot \rho_{gl} \cdot \Delta H_{gl} + c'_{p,gl} \cdot (t_{cr} - t_{gl0}) \right] = 0. \quad (5.40)$$

Рівняння (5.40) має два позитивні кореня. Більший з цих коренів не задовольняє фізичним міркуванням, бо він відповідає зростанню часу процесів перетворення $\Delta \tau$ при зменшенні (α) тепловідводу від гелієвої плівки. Надамо вид $\Delta \tau_A$, який відповідає меншому кореню рівняння (5.40), у найбільш поширеній ситуації, коли енергія відводу тепла ΔE_α значно менша за енергію зміни стану ΔE_{gl} :

$$\Delta \tau_A = \frac{\pi \cdot a_*}{4} \cdot \left\{ \frac{h_{gl0} \cdot \left[k_m \cdot \rho_{gl} \cdot \Delta H_{gl} + c'_{p,gl} \cdot (t_{cr} - t_{gl0}) \right]}{\lambda_* \cdot (t_0 - t_{cr})} \right\}^2, \text{ с.} \quad (5.41)$$

Формула (5.41) замикає розгляд етапу «А». Перейдемо до етапу «Б», що реалізується при $\tau \geq 0$ і являє собою подальше охолодження частково охолодженого масивного тіла через теплоізолюючу плівку сухого гелю.

На цьому етапі в області масивного тіла ($x > 0$) зберігається вид рівняння (5.31) із граничною умовою (5.32) і початковим розподілом температури, що визначається виразом (5.35) при $\tau = 0$:

$$t(x, 0) = t_0 + \Delta t_{cr} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \sqrt{a_* \cdot \Delta \tau_A}} \right). \quad (5.42)$$

В області сухого гелю ($-h < x < 0$) температурне поле підпорядковується рівнянню нестационарної теплопровідності

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad -h \leq x \leq 0; \quad (5.43)$$

у якому

$$a \equiv \frac{\lambda}{c'},$$

- коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, а λ і c' – відповідно, коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; і питома об'ємна ізобарна теплоємність, $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}$, сухого гелю.

Граничні умови до рівняння (5.43) мають відомий вигляд. Так на границі гелю із зовнішнім середовищем ($x = -h$) гранична умова виражає безперервність повного потоку тепла:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-h} = q_r - \alpha \cdot [t(-h, \tau) - t_f]. \quad (5.44)$$

Умовами на границі сухого гелю з масивним тілом ($x = 0$) є неперервність температури і питомого теплового потоку, відповідно:

$$t(-0, \tau) = t(+0, \tau), \quad -\lambda \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-0} = -\lambda_* \cdot \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=+0}. \quad (5.45)$$

Початковою умовою задача (5.43)-(5.45) може бути прийняте однорідний розподіл температури в покритті ($-h < x < 0$):

$$t(x, 0) = t_{cr}. \quad (5.46)$$

Відразу ж відзначимо, що початковий розподіл температури в сухому гелі практично не впливає на вид поля $t(x, \tau)$ при часах τ , перевищуючих характерний час прогріву покриття (2.26):

$$\tau_0 \equiv \frac{h^2}{a}. \quad (5.47)$$

Задача (5.31), (5.32), (5.42)-(5.46) у випадку сталості величин a , a_* , λ , λ_* , q_r , α , t_f й t_0 вирішується за допомогою перетворення Лапласа, проведеного по часовій змінній нестационарного поля $t(x, \tau)$ окремо в областях $-h < x < 0$ і $x > 0$ (дивися, наприклад, [124], або розділ 2.1 цієї роботи). У результаті відбувається перехід до зображень по Лапласу:

$$t_L(x, s) = \int_0^{\infty} [t(x, \tau) - t_0] \cdot \exp(-s\tau) d\tau.$$

Функції $t_L(x, s)$ задовольняють лінійній системі звичайних (а не у частинних похідних) диференціальних рівнянь щодо просторової змінної x . Ці рівняння, які є наслідком рівнянь (5.43) і (5.31), мають вигляд

$$\frac{d^2 t_L(x, s)}{dx^2} - \frac{s}{a} \cdot t_L(x, s) + \frac{\Delta t_{cr}}{a} = 0, \quad -h \leq x \leq 0; \quad (5.48)$$

$$\frac{d^2 t_L(x, s)}{dx^2} - \frac{s}{a_*} \cdot t_L(x, s) + \frac{\Delta t_{cr} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a_* \cdot \Delta \tau_A}}\right)}{a_*} = 0, \quad 0 \leq x < \infty; \quad (5.49)$$

Граничні умови до цих рівнянь, які є наслідком співвідношень (5.44), (5.45), (5.32) мають вигляд

$$-\lambda \cdot \left. \frac{dt_L(x, s)}{dx} \right|_{x=-h} = \frac{q_r + \alpha \cdot (t_f - t_0)}{s} - \alpha \cdot t_L(-h, s), \quad (5.50)$$

$$t_L(-0, s) = t_L(+0, s), \quad (5.51)$$

$$-\lambda \cdot \frac{dt_L(x, s)}{dx} \Big|_{x=-0} = -\lambda_* \cdot \frac{dt_L(x, s)}{dx} \Big|_{x=+0}, \quad (5.52)$$

$$t_L(x, s) \Big|_{x=\infty} < const. \quad (5.53)$$

Техніка рішення систем звичайних лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь добре відпрацьована, у зв'язку із чим ми опустимо викладення. Результат щодо зображення по Лапласу цікавої для нас температури на границі масивного тіла з покриттям ($x = 0$) має вигляд:

$$t_L(0, s) = \frac{\Delta t_{ef} + \Delta t_{cr} \cdot [1 - e^{s \cdot \Delta \tau} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A})] \cdot K \cdot \left(\frac{\varphi}{Bi} \cdot \operatorname{ch}(\varphi) + \operatorname{sh}(\varphi) \right)}{s \cdot \left[\left(1 + K \cdot \frac{\varphi}{Bi} \right) \cdot \operatorname{ch}(\varphi) + \left(K + \frac{\varphi}{Bi} \right) \cdot \operatorname{sh}(\varphi) \right]}. \quad (5.54)$$

При записі співвідношення (5.54) використані наступні позначення, більшість з яких введена у розділі 2:

$\varphi = \sqrt{s \cdot \tau_0}$ - формула (2.25);

$\Delta t_{ef} \equiv t_f + \frac{q_r}{\alpha} - t_0$ - ефективна температура зовнішнього середовища, °С;

$K \equiv \sqrt{\frac{\lambda_* c'_*}{\lambda c'}}$ - критерій відносної теплової активності середовищ (2.23);

$Bi \equiv \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$ - критерій Био задачі охолодження покриття середовищем (2.30).

У розглянутому покритті критерій K не малий, а критерій $Bi \ll 1$, у зв'язку із чим у формулі (5.54) можна зневажити складовими з $\operatorname{sh}(\varphi)$. У

результаті вираз (5.54) спрощується:

$$t_L(0, s) = \frac{\Delta t_{ef} + \Delta t_{cr} \cdot \left[1 - e^{s \cdot \Delta \tau_A} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A}) \right] \cdot K \cdot \frac{\Phi}{Bi} \cdot \operatorname{ch}(\varphi)}{s \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\Phi}{Bi} \right) \cdot \operatorname{ch}(\varphi)}.$$

Останню формулу для подальшого аналізу зручніше записати у вигляді

$$t_L(0, s) = \Delta t_{ef} \cdot I_{L.ef}(s) + \Delta t_{cr} \cdot I_{L.cr}(s), \quad (5.55)$$

де

$$I_{L.ef}(s) \equiv \frac{1}{s \cdot \operatorname{ch}(\varphi) \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\Phi}{Bi} \right)} = \frac{1}{s \cdot \operatorname{ch}(\sqrt{s \cdot \tau_0}) \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})}, \quad (5.56)$$

$$I_{L.cr}(s) \equiv \frac{1 - e^{s \cdot \Delta \tau_A} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A})}{s \cdot \left(1 + K \cdot \frac{\Phi}{Bi} \right)} \cdot K \cdot \frac{\Phi}{Bi} = \frac{1 - e^{s \cdot \Delta \tau_A} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A})}{\sqrt{s} \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})} \cdot \sqrt{\tau_*}. \quad (5.57)$$

При записі (5.56), (5.57) використовується введений формулою (2.35) параметр

$$\tau_* \equiv \left(K \cdot \frac{\sqrt{\tau_0}}{Bi} \right)^2 = \frac{\lambda_* \cdot c'_*}{\alpha^2},$$

який позначає характерного час тепловідводу від масивного тіла в охолоджуюче середовище, с.

Перший доданок у формулі (5.55) відповідає охолодженню однорідно нагрітого масивного тіла з покриттям із сухого гелю (у випадку відсутності етапу «А»), другий доданок враховує вплив попереднього охолодження системи на етапі «А».

Для повернення до вихідної температури $t(0, \tau)$ необхідно застосувати до $t_L(0, s)$ зворотне перетворення Лапласа.

Тут, як і у розділі 2, Лаплас образ функції $f(\tau)$ будемо позначати за допомогою символу оператора $\hat{L}$, тобто $F(s) = \hat{L}[f(\tau)]$. Праобраз Лаплас образу (тобто вихідну функцію $f(\tau)$) позначатимемо символом зворотного оператора $\hat{L}^{-1}$, тобто $f(\tau) = \hat{L}^{-1}[F(s)]$.

Застосувавши оператор $\hat{L}^{-1}$ до співвідношення (5.55), отримаємо

$$t(0, \tau) - t_0 = \hat{L}^{-1}[t_L(0, s)] = \Delta t_{ef} \cdot I_{ef}(\tau) + \Delta t_{cr} \cdot I_{cr}(\tau), \quad (5.58)$$

де

$$I_{ef}(\tau) \equiv \hat{L}^{-1}[I_{L,ef}(s)] = \hat{L}^{-1}\left[\frac{1}{s \cdot \operatorname{ch}(\sqrt{s \cdot \tau_0}) \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})}\right], \quad (5.59)$$

$$I_{cr}(\tau) \equiv \hat{L}^{-1}[I_{L,cr}(s)] = \hat{L}^{-1}\left[\frac{1 - e^{s \cdot \Delta \tau_A} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A})}{\sqrt{s} \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})} \cdot \sqrt{\tau_*}\right]. \quad (5.60)$$

Задача знаходження $I_{ef}(\tau)$ (5.59) вирішена у пункті 2.1.2. У цьому пункті показано, що

$$I_{ef}(\tau) = I_{tot}(\tau), \quad (5.61)$$

де величина $I_{tot}(\tau)$ визначається у вигляді ряду (2.61), який добре сходиться при $\tau > \tau_0$. Так перший доданок цього ряду, згідно з формулами (2.62), (2.54) при $i = 0$, дорівнює

$$I(\tau, 0) = \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}}\right) - e^{\sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_*}} + \frac{\tau}{\tau_*}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}}\right). \quad (5.62)$$

Спираючись на співвідношення (2.62), (2.54) можна розрахувати $I_{ef}(\tau)$ з будь якою потрібною точністю.

Для розрахунку $I_{cr}(\tau)$ (5.60) можна розбити вихідний Лаплас образ $I_{L.cr}(s)$ на два складники, надавши другому вигляд добутку:

$$\begin{aligned} I_{L.cr}(s) &= \frac{1 - e^{s \cdot \Delta \tau_A} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A})}{\sqrt{s} \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})} \cdot \sqrt{\tau_*} = \\ &= \frac{\sqrt{\tau_*}}{\sqrt{s} \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})} - \left[\frac{\sqrt{\tau_*}}{1 + \sqrt{s \cdot \tau_*}} \right] \cdot \left[\frac{e^{s \cdot \Delta \tau_A}}{\sqrt{s}} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A}) \right]. \end{aligned}$$

Далі треба скористатися (дивись [124]) співвідношенням

$$L^{-1} \left[\frac{\sqrt{\tau_*}}{\sqrt{s} \cdot (1 + \sqrt{s \cdot \tau_*})} \right] = e^{\frac{\tau}{\tau_*}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}} \right), \quad (5.63)$$

і формулами

$$L^{-1} \left[\frac{\sqrt{\tau_*}}{1 + \sqrt{s \cdot \tau_*}} \right] = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \tau}} - \frac{1}{\sqrt{\tau_*}} \cdot e^{\frac{\tau}{\tau_*}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}} \right), \quad (5.64)$$

$$L^{-1} \left[\frac{e^{s \cdot \Delta \tau_A}}{\sqrt{s}} \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{s \cdot \Delta \tau_A}) \right] = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot (\tau + \Delta \tau_A)}}, \quad (5.65)$$

разом з рівнянням згортки

$$L^{-1} [F_{L.1}(s) \cdot F_{L.2}(s)] = \int_0^{\tau} f_1(\tau - \theta) \cdot f_2(\theta) \cdot d\theta,$$

де $f_1(\tau) \equiv L^{-1} [F_{L.1}(s)]$, $f_2(\tau) \equiv L^{-1} [F_{L.2}(s)]$, застосованим до формул (5.64),

(5.65). У результаті одержимо, що

$$I_{cr}(\tau) = e^{\frac{\tau}{\tau_*}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}}\right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\tau}{\tau_*}} \frac{e^y \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{y}) \cdot dy}{\sqrt{\frac{\tau + \Delta\tau_A}{\tau_*} - y}} - \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau + \Delta\tau_A}}\right). \quad (5.66)$$

Таким чином, шукане результуюче співвідношення, яке у першому наближенні описує температуру поверхні масивного тіла на етапі «Б», має вигляд:

$$t(0, \tau) = t_0 - \left(t_0 - t_f - \frac{q_r}{\alpha}\right) \cdot \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}}\right) - e^{\sqrt{\frac{\tau_0}{\tau_*} + \frac{\tau}{\tau_*}}} \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}} + \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\tau_0}{\tau}}\right)\right] + \\ - (t_0 - t_{cr}) \cdot \left[e^{\frac{\tau}{\tau_*}} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau_*}}\right) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\tau}{\tau_*}} \frac{e^y \cdot \operatorname{erfc}(\sqrt{y}) \cdot dy}{\sqrt{\frac{\tau + \Delta\tau_A}{\tau_*} - y}} - \frac{2}{\pi} \cdot \arcsin\left(\sqrt{\frac{\tau}{\tau + \Delta\tau_A}}\right)\right]. \quad (5.67)$$

При необхідності підвищити точність розрахунків при малих часах $\tau_0 \geq \tau > 0$, необхідно в першу квадратну дужку формули (5.67) додавати відповідну кількість доданків ряду (2.61).

Графік залежності $t(0, \tau)$ температури поверхні масивного тіла у перебігу всього процесу охолодження за участю гелю (тобто при $\tau > -\Delta\tau_A$) представлений суцільною лінією на рис. 5.3. При його побудові обрані типові значення параметрів: $h = h_{gl0} = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $\rho_{gl} = 1250$ кг·м⁻³; $k_m = 0,75$; $c'_{p,gl} = 5 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·К⁻¹; $\Delta H_{gl} = 2 \cdot 10^6$ Дж·кг⁻¹; $t_{gl0} = t_f = 20$ °С; $t_0 = 400$ °С; $t_{cr} = 100$ °С; $\lambda = 0,25$ Вт·м⁻¹·К⁻¹; $c' = 2,5 \cdot 10^5$ Дж·м⁻³·К⁻¹; $\lambda_* = 1,0$ Вт·м⁻¹·К⁻¹; $c'_* = 1,0 \cdot 10^6$ Дж·м⁻³·К⁻¹; $q_r = 0$ Вт·м⁻²; $\alpha = 10$ Вт·м⁻²·К⁻¹. Час нагрівання і сушки

гелієвої плівки дорівнює $\Delta\tau_A \approx 400$ с, а характерний час прогріву плівки сухого гелю $\tau_0 = 9$ с. Етапу «А» відповідає часовий інтервал $\tau \in (-\Delta\tau_A; 0)$, етап «Б» протікає при $\tau > 0$. На цей же графік пунктирною лінією нанесена залежність температури поверхні масивного тіла у випадку охолодження без нанесення гелю (це переміщена вліво на $\Delta\tau_A$ функція (2.35) з характерним часом $\tau_\Sigma = \tau_*$). Порівняння залежностей наочно демонструє ефективність вологого гелю як засобу охолодження поверхні.

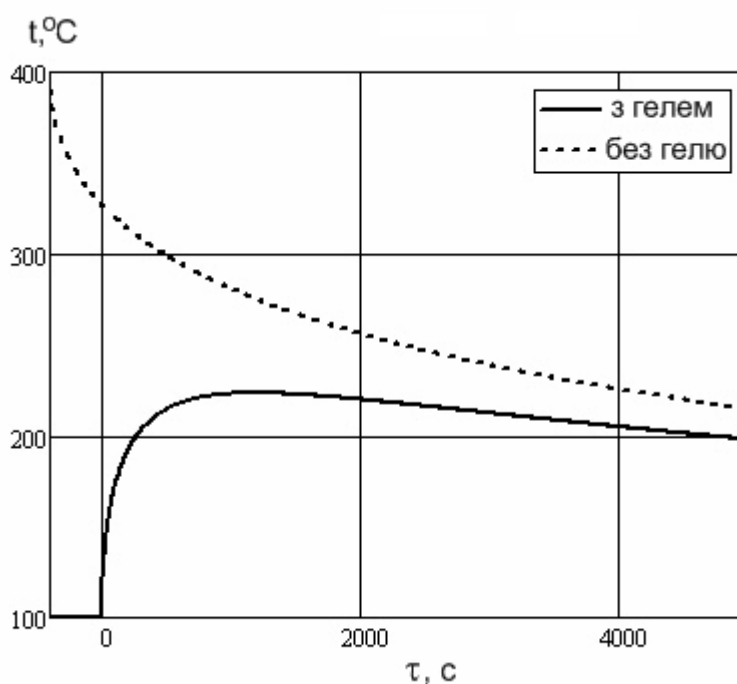


Рис. 5.3 Залежність температури поверхні масивного тіла від часу при охолодженні

5.1.3 Моделювання поведінки крапель компонентів гелеутворюючих вогнегасних систем у високотемпературній області

Однією з умов успішного використання ГУС є подача їх компонентів у розпорошеному вигляді. Максимальний діаметр крапель компонентів ГУС не повинен перевищувати 1,5 мм. Збільшення розміру краплі понад цю величину погіршує умови змішання компонентів, що приводить до часткового стікання рідин, що не прореагували [167, 244]. З іншого боку, малий розмір крапель

компонентів ГУС може призвести до повного випару всієї рідини з розчину або до передчасної коагуляції гелеутворювача (полісилікату натрію) при проходженні ними крізь область горіння. Це приведе до неможливості гелеутворювання при змішанні компонентів на твердих поверхнях. Стає важливим питання про найменший розмір крапель компонентів ГУС, що забезпечує ефективне гелеутворювання.

У даному пункті буде промодельоване поведіння компонентів ГУС при прольоті до поверхні гасіння. Метою дослідження є встановлення нижньої границі початкового розміру краплі компонентів ГУС, що надійно забезпечить процес гелеутворювання на поверхні твердого горючого матеріалу (ТГМ). Для цього необхідно розглянути задачу про випар краплі водяного розчину солі в гарячому газовому середовищі. Для випадку чистої води ця задача давно вирішена [229]. Будемо діяти аналогічно, використовуючи тільки рівняння балансу мас і енергії, замінюючи рівняння руху газових компонентів умовою ізобарності процесу, фактично розглядаючи процес випару як квазірівноважний. Отримані результати були викладені у роботі [38, 39].

Написання відповідних рівнянь балансу вимагає вміння розраховувати потоки маси водяної пари й тепла між поверхнею краплі й зовнішнім середовищем. Рішення цієї проблеми в наближенні сферично симетричного граничного шару викладено, наприклад, у монографії [229]. Згідно із цими уявленнями із краплею води пов'язане два приповерхніх сферичних граничних шари: дифузійний (товщиною δ_D) і температурний (товщиною δ_T). Обидва шари позначені на схемі рис.5.4.

Дифузійний шар містить надлишок водяної пари, парціальний тиск якої на зовнішній границі шару збігається з його атмосферним значенням $p_{v0}(r)$, а тиск пари на внутрішній границі шару (безпосередньо біля поверхні краплі) дорівнює $p_{s,c}(T_d, g_c)$, Па, де $p_{s,c}(T, g_c)$ – тиск насиченої пари води над поверхнею водяного розчину солі при абсолютній температурі T і масовій частці солі у розчині g_c ; T_d – абсолютна температура поверхні краплі, К.

У квазістаціонарному режимі випаровування, що реалізується в нашій ситуації, потік маси водяної пари J_v ($\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$) від краплі у газове середовище описується співвідношенням

$$J_v = 2\pi \cdot r_d \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_w \cdot p}{R \cdot \bar{T}} \cdot (Nu_D + 2) \cdot \ln \left(\frac{p - p_{v0}}{p - p_{c.s}(T_d, g_c)} \right). \quad (5.68)$$

де r_d – радіус краплі, м; p – загальний атмосферний тиск, Па; $\bar{T}$ – середнє значення абсолютної температури газового середовища у дифузійному шарі, К.

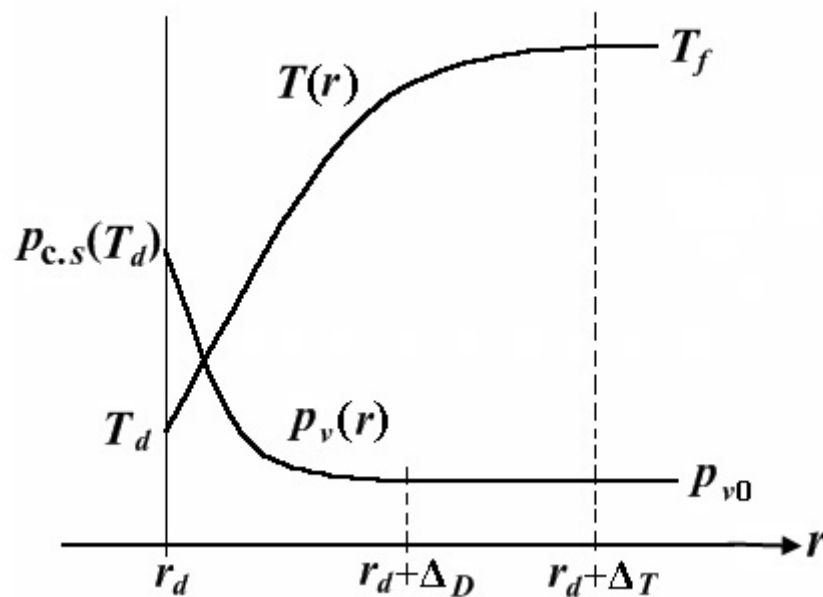


Рис. 5.4 Схема залежності температури газового середовища $T(r)$ і парціального тиску водяної пари $p_v(r)$ від відстані r від центру краплі

Осереднене значення коефіцієнта дифузії пари у газовому середовищі дифузійного шару $\bar{D}$ визначається формулою

$$\bar{D} = \frac{\bar{T}}{\frac{r_d \cdot (r_d + \delta_D)}{\delta_D} \int_{r_d}^{r_d + \delta_D} \frac{T(r)}{D(T(r)) \cdot r^2} dr}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1},$$

у якій змінна інтегрування « r » являє собою відстань від центра краплі.

Дифузійний критерій Нуссельта Nu_D зв'язує ширину дифузійного шару δ_D із характерною відстанню задачі ($2 \cdot r_d$) співвідношенням

$$\delta_D = \frac{2 \cdot r_d}{Nu_D}.$$

У квазістаціонарному режимі випару згідно [229] потік енергії Q (Вт) між краплею й зовнішнім середовищем описується співвідношенням:

$$Q = J_v \cdot \left[H_v(T_d) - \frac{H_v(T_f) - H_v(T_d)}{\exp(B') - 1} \right], \quad (5.69)$$

Тут символом B' позначена безрозмірна величина

$$B' \equiv \frac{J_v \cdot c_{pv}}{2\pi \cdot r_d \cdot \bar{\lambda} \cdot (Nu_T + 2)}. \quad (5.70)$$

Величина $\bar{\lambda}$ - середнє по температурному шару значення коефіцієнта теплопровідності парогазового середовища, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. При виводі співвідношення (5.69) припускалася лінійна залежність питомої масової ентальпії утворення водяної пари H_v , $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$, від температури:

$$H_v(T) = H_v(T_d) + c_{p,v} \cdot (T - T_d), \quad (5.71)$$

де $c_{p,v}$ – питома масова ізобарна теплоємність пари, Дж·кг⁻¹·К⁻¹.

Температурний критерієм Нуссельта Nu_T зв'язує ширину перехідного температурного шару δ_T із характерною відстанню задачі ($2 \cdot r_d$) співвідношенням

$$\delta_T = \frac{2 \cdot r_d}{Nu_T}.$$

Рівняння (5.68) і (5.69) зв'язують між собою п'ять величин – Q , J_v , g_c , r_d і T_d . Відсутніми трьома рівняннями, що замикають систему, є співвідношення, що відображають баланси мас двох компонентів розчину в краплі, і рівняння зміни ентальпії краплі. Розглянемо ці співвідношення.

Маса краплі розчину m_d складається з мас води m_w і солі m_c : $m_d = m_w + m_c$. Вважаючи, що в процесі випаровування маса солі в краплі залишається незмінної ($m_c = \text{const}$), із закону збереження речовини одержуємо

$$\frac{dm_d}{d\tau} = \frac{dm_w}{d\tau} = -J_v. \quad (5.72)$$

Звідси випливає, що швидкість зміни масової частки солі в краплі розчину задовольняє співвідношенню

$$\frac{dg_c}{d\tau} \equiv \frac{d}{d\tau} \left(\frac{m_c}{m_w + m_c} \right) = - \frac{m_c}{(m_w + m_c)^2} \frac{dm_w}{d\tau} = g_c \cdot \frac{J_v}{m_d} = g_c \cdot \frac{J_v}{\rho \cdot V_d}, \quad (5.73)$$

де $\rho(g_c)$ – відома густина розчину краплі, кг·м⁻³. (залежність $\rho(T)$ не

розглядається через відносну малість відповідних змін); V_d - об'єм краплі, м³.

Для одержання швидкості зміни розміру краплі розглянемо швидкість зміни її маси:

$$\frac{dm_d}{d\tau} = \frac{d(\rho \cdot V_d)}{d\tau} = \frac{d\rho}{d\tau} \cdot V_d + \rho \cdot \frac{dV_d}{d\tau} = \frac{\partial \rho}{\partial g_c} \cdot \frac{dg_c}{d\tau} \cdot V_d + \rho \cdot \frac{dV_d}{d\tau}. \quad (5.74)$$

Зі співвідношень (5.72)-(5.74) витікає, що

$$\rho \cdot \frac{dV_d}{d\tau} = -J_v \cdot \left(1 + \frac{\partial \rho}{\partial g_c} \cdot \frac{g_c}{\rho} \right). \quad (5.75)$$

Останнім з рівнянь балансу є перший закон термодинаміки, відповідно до якого в розглянутому ізобарному процесі тепловий потік крізь поверхню краплі забезпечується за рахунок зміни її ентальпії, тобто

$$\begin{aligned} Q &= -\frac{d}{d\tau} [H_{wc}(T_d, g_c) \cdot m_d] = -\left[\frac{\partial H_{wc}}{\partial g_c} \cdot \frac{dg_c}{d\tau} + \frac{\partial H_{wc}}{\partial T} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} \right] \cdot m_d - H_{wc} \cdot \frac{dm_d}{d\tau} = \\ &= -c_{p,wc} \cdot m_d \cdot \frac{dT_d}{d\tau} + J_v \cdot \left[H_{wc} - \frac{\partial H_{wc}}{\partial g_c} \cdot g_c \right], \end{aligned} \quad (5.76)$$

де $H_{wc}(T, g_c)$ – питома масова ентальпія утворення розчину солі, Дж·кг⁻¹;

$c_{p,wc}(T, g_c) = \left(\frac{\partial H_{wc}}{\partial T} \right)_p$ – питома масова теплоємність розчину, Дж·кг⁻¹·К⁻¹. (При

перетвореннях рівняння (5.76) використалися співвідношення (5.72) і (5.73)).

Об'єднавши формули (5.69), (5.76), використовуючи розкладання (5.71), можна одержати рівняння, що задає швидкість зміни температури краплі:

$$m_d \cdot c_{p,wc} \cdot \frac{dT_d}{d\tau} = J_v \cdot \left[-\Delta H + \frac{c_{p,v} \cdot (T_f - T_d)}{\exp(B') - 1} \right], \quad (5.77)$$

де

$$\begin{aligned} \Delta H &\equiv H_v(T_d) - H_{wc}(T_d, g_c) + \frac{\partial H_{wc}}{\partial g_c} \cdot g_c \approx \\ &\approx H_v(T_d) - H_{wc}(T_d, 0) = H_v(T_d) - H_w(T_d) \equiv \Delta H_v, \end{aligned} \quad (5.78)$$

а H_w і ΔH_v являють собою питомі ентальпії утворення рідкої фази води і теплоту паротворення води, відповідно, Дж·кг⁻¹.

Із співвідношень (5.78) прямо витікає, що відмінність теплоти утворення водяної пари із розчину солі і із чистої води

$$\Delta H - \Delta H_v = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 H_{wc}}{\partial g_c^2} \cdot g_c^2 + o(g_c^2)$$

є величиною не нижче другого порядку по g_c , тобто є істотним тільки при значних концентраціях солі у розчині.

Для однозначного рішення задачі уточнимо деякі із залежностей. Надалі будемо вважати, що розчин солі поводить ся як ідеальний. У цьому випадку тиск насиченої пари води над поверхнею розчину $p_{c,s}(T, g_c)$ є пропорційним мольній частці води у розчині ($g_{\mu,w}$), тобто

$$p_{c,s}(T, g_c) = g_{\mu,w}(g_c) \cdot p_{0,s}(T), \quad (5.79)$$

де $p_{0,s}(T)$ - відома величина тиску насиченої пари води над чистою водою.

Мольну частку води у масових частках можна представити у вигляді

$$g_{\mu,w}(g_c) = 1 - \frac{g_c \cdot \mu_w}{\mu_c - (\mu_c - \mu_w) \cdot g_c},$$

де μ_c - молярна маса солі (відзначимо, що у випадку CaCl_2 молярна маса дорівнює $\mu_c = 0,111 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$, у випадку $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7 \cdot (\text{Si}_2) - \mu_c = 0,224 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$).

Рішення задачі вимагає визначення величин критеріїв подібності Шервуда (Nu_D) і Нуссельта (Nu_T), які тісно пов'язані з характером обтікання краплі газовим середовищем. Скористаємося тим, що внаслідок подібності явищ дифузії речовини і дифузії енергії залежність критерію Шервуда від критеріїв Рейнольдса (Re) і Шмідта (Sc) і залежність критерію Нуссельта від критеріїв Рейнольдса (Re) і Прандтля (Pr) збігаються. Надалі, використовуючи незначну відмінність критеріїв Шмідта (Sc) і Прандтля (Pr) у газовому середовищі, будемо оцінювати критерії подібності Шервуда й Нуссельта однаковим критеріальним рівнянням (див. [229]):

$$Nu_T = Nu_D = \begin{cases} 2 \cdot (1 + 0.08 \cdot Re^{2/3}), & Re \leq 200 \\ 0.54 \cdot Re^{1/2}, & Re > 200 \end{cases}. \quad (5.80)$$

Тут критерій Рейнольдса розраховується за формулою

$$Re = \frac{w \cdot (2 \cdot r_d)}{\nu_g}, \quad (5.81)$$

де w - швидкість руху краплі щодо газового середовища, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; ν_g - коефіцієнт кінематичної в'язкості газового середовища, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Відзначимо відразу, що наслідком збігу дифузійного і теплового критеріїв Нуссельта ($Nu_D = Nu_T$) є спрощення виду параметра B' (5.70), що

супроводжується зникненням залежності B' від розмірів краплі.

Рівняння (5.73), (5.75), (5.77) (з урахуванням співвідношень, що описують зв'язки величин) за умови завдання початкової маси й температури краплі, а також концентрації солі у розчині, однозначно описують процес випаровування краплі розчину. Для подальшого аналізу процесу випаровування краплі трансформуємо ці рівняння. У якості шуканої невідомої величини замість радіуса краплі візьмемо площу її поверхні $s = 4\pi \cdot r_d^2$, і для компактності запису введемо функцію

$$G(T_d, s, g_c) \equiv 2 \frac{J_v}{\rho \cdot r_d} = 4\pi \cdot \bar{D} \cdot \frac{\mu_w \cdot p}{\rho \cdot R \cdot T} \cdot (Nu_D + 2) \cdot \ln \left(\frac{p - p_{v0}}{p - p_{c.s}(T_d, g_c)} \right), \quad (5.82)$$

яка є характерною швидкістю зміни площі поверхні краплі. У результаті рівняння (5.75), (5.77) приймуть вигляд:

$$\frac{ds}{d\tau} = -G \cdot \left(1 + \frac{\partial \rho}{\partial g_c} \cdot \frac{g_c}{\rho} \right). \quad (5.83)$$

$$s \cdot \frac{dT_d}{d\tau} = \frac{3}{2 \cdot c_{p.wc}} \cdot G \cdot \left[-\Delta H + \frac{c_{p.v} \cdot (T_f - T_d)}{\exp(B') - 1} \right]. \quad (5.84)$$

Замість рівняння (5.73) використаємо умову незмінності маси солі в краплині при випаровуванні. Дійсно

$$m_c = g_c \cdot m_d = g_c \cdot \rho(g_c) \cdot V_d = g_c \cdot \rho(g_c) \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot r_d^3 = g_c \cdot \rho(g_c) \cdot \frac{s^{3/2}}{6 \cdot \sqrt{\pi}} = \text{const}.$$

Звідси слідує, що

$$s = s_0 \cdot \left(\frac{g_{c,0} \cdot \rho(g_{c,0})}{g_c \cdot \rho(g_c)} \right)^{2/3}, \quad (5.85)$$

де s_0 і $g_{c,0}$ - значення s і g_c у початковий момент часу.

Відзначимо, що у вираженні у квадратних дужках у правій частині рівняння (5.84) відсутня явна залежність від розміру краплі. Крім того, цей вираз при малому вмісті солі у розчині (відповідно до співвідношень (5.78) і (5.79)) практично не залежить від g_c . Це означає, що, поки концентрація солі в розчині залишається малою, процес випаровування відповідно до формули (5.84) виходить і далі триває при постійній температурі краплі $T_d = T_{st}$. Величина T_{st} є коренем рівняння

$$-\Delta H + \frac{c_{p,v} \cdot (T_f - T_d)}{\exp(B') - 1} = 0, \quad (5.86)$$

при рішенні якого можна брати значення $g_c = 0$, що відповідає чистій воді. У цьому режимі функція G (5.82) слабко залежить від розміру краплі, у зв'язку із чим швидкість зміни площі поверхні краплі розчину відповідно до рівняння (5.83) убиває практично лінійно за законом

$$s(\tau) = s_{0,st} - G_{st} \cdot \tau, \quad (5.87)$$

де символом $s_{0,st}$ позначена площа поверхні краплі на початку стаціонарного температурного режиму, а $G_{st}(T_{st}, s_{0,st}) \equiv G(T_{st}, s_{0,st}, 0)$.

Відзначимо, що характерний час виходу на стаціонарний режим значно менше часу перебування краплі в цьому режимі, у зв'язку із чим при оцінках можна приймати $s_{0,st} \approx s_0$.

Відзначимо, що, використавши співвідношення (5.70) і те, що межа $g_c = 0$ відповідає чистій воді, рівняння (5.86) зручніше представити у вигляді:

$$\ln\left(\frac{p - p_{v0}}{p - p_{0,s}(T_{st})}\right) = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{D} \cdot c_{p,v}} \cdot \frac{R \cdot \bar{T}}{\mu_w \cdot p} \cdot \ln\left(1 + \frac{c_{p,v} \cdot (T_f - T_{st})}{\Delta H_v(T_{st})}\right). \quad (5.88)$$

Рівняння (5.88) можна, знаючи залежність $T_s(p_v)$ (абсолютної температури насиченої водяної пари від її тиску p_v), вирішувати стандартними методами (наприклад, методом послідовних наближень). Отримане значення $T_{st}(T_f)$ дозволяє оцінити характерну величину швидкості зменшення площі поверхні краплі:

$$G_{st} = 4\pi \cdot (Nu_D + 2) \cdot \frac{\bar{\lambda}}{\rho_w \cdot c_{p,v}} \cdot \ln\left(1 + \frac{c_{p,v} \cdot (T_f - T_{st})}{\Delta H_v(T_{st})}\right). \quad (5.89)$$

де ρ_w – густина води, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Знання величини G_{st} дозволяє відповідно до формул (5.85), (5.87) оцінити час $\Delta\tau$ досягнення критичного значення концентрації солі $g_{c,cr}$ і максимальну дальність подачі гелеутворюючого розчину із збереженням пожежогасячої здатності: $L_{\max}$:

$$\Delta\tau = \frac{s_0}{G_{st}} \cdot \left[1 - \left(\frac{g_{c,0} \cdot \rho(g_{c,0})}{g_{c,cr} \cdot \rho(g_{c,cr})} \right)^{2/3} \right]. \quad (5.90)$$

$$L_{\max} = w \cdot \Delta\tau = \frac{w \cdot s_0}{G_{st}} \cdot \left[1 - \left(\frac{g_{c,0} \cdot \rho(g_{c,0})}{g_{c,cr} \cdot \rho(g_{c,cr})} \right)^{2/3} \right]. \quad (5.91)$$

Відповідно до формул (5.89)-(5.91) залежність $L_{\max}$ від початкового розміру краплі (у зневазі залежністю коефіцієнта кінематичної в'язкості газового середовища ν_g від температури у співвідношеннях (5.81)) можна представити у вигляді:

$$L_{\max}(T_{st}, g_c, r_0) = f_{T,g}(T_{st}, g_c) \cdot f_r(r_0). \quad (5.92)$$

Вид функціональної залежності $f_r(r_0)$ від початкового розміру краплі r_0 (у найбільш поширеній межі $Re > 200$) близький до ступеневої

$$f_r(r_0) = \frac{S_0}{Nu_D + 2} \sim r_0^n, \quad (5.93)$$

с показником ступеня $n \approx 1,5$.

Описана вище система рівнянь (5.83)-(5.85) досліджувалася чисельно за допомогою середовища математичних розрахунків Matlab. Типові результати розрахунків представлені на рис.5.5.

При чисельному моделюванні бралися типові при пожежогасінні значення параметрів процесу: загальний тиск $p = 1,0 \cdot 10^5$ Па; парціальний тиск водяної пари в газовому середовищі $p_{v0} = 0$ Па; питома теплоємність водяної пари $c_{p,v} = 2,0 \cdot 10^3$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹; питома теплота паротворення $\Delta H_v = 2,3 \cdot 10^6$ Дж·кг⁻¹; коефіцієнт кінематичної в'язкості газового середовища $\nu_g = 3,5 \cdot 10^{-5}$ м²·с⁻¹; температура газового середовища $T_f = 1273$ К. Передбачалися температурні залежності $\bar{\lambda}(\bar{T}) = 8,6 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{T}$, Вт·м⁻¹·К⁻¹, і $\bar{D}(\bar{T}) = 4,9 \cdot 10^{-9} \cdot \bar{T}^{1,5}$, м²·с⁻¹. Бралася лінійна залежність густини розчину від масової частки солі: $\rho(g_c) = 1000 + 500 \cdot g_c$, кг·м⁻³. Також були прийняті

значення початкової і критичної (кінцевої) концентрації солі, які дорівнювали, відповідно, $g_{c.0} = 0,1$ і $g_{c.cr} = 0,5$. Передбачалося, що швидкість крапель стала і дорівнює типовому для ручних пожежних стволів значенню $w = 25 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

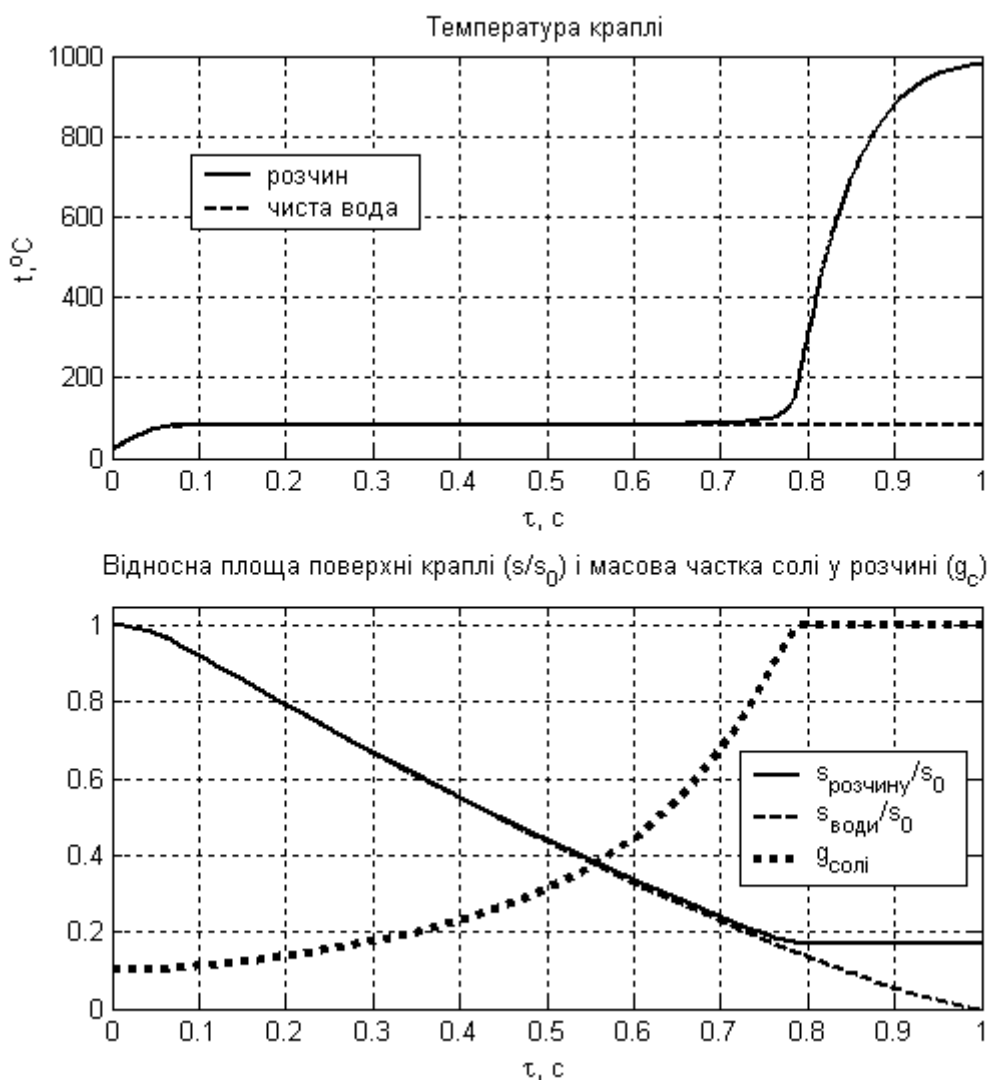


Рис. 5.5 Залежності температури ($t, ^\circ\text{C}$), відносної площі поверхні (s/s_0) краплі розчину і чистої води, масової частки солі в розчині (g_c) від часу польоту краплі в газовому середовищі ($\tau, \text{с}$).

Графіки рис. 5.5 підтверджують збіг характеристик процесів випаровування крапель розчину і чистої води в широкому діапазоні концентрацій солі. Підтверджується існування режиму зі стаціонарною

температурою випаровування і близькому до лінійного характеру убуття з часом площі поверхні краплі.

На рис. 5.6 представлена отримана на основі чисельного експерименту модельна залежність максимальної дальності польоту крапель від їх початкового радіуса при температурах газового середовища 800°C і 1000°C.

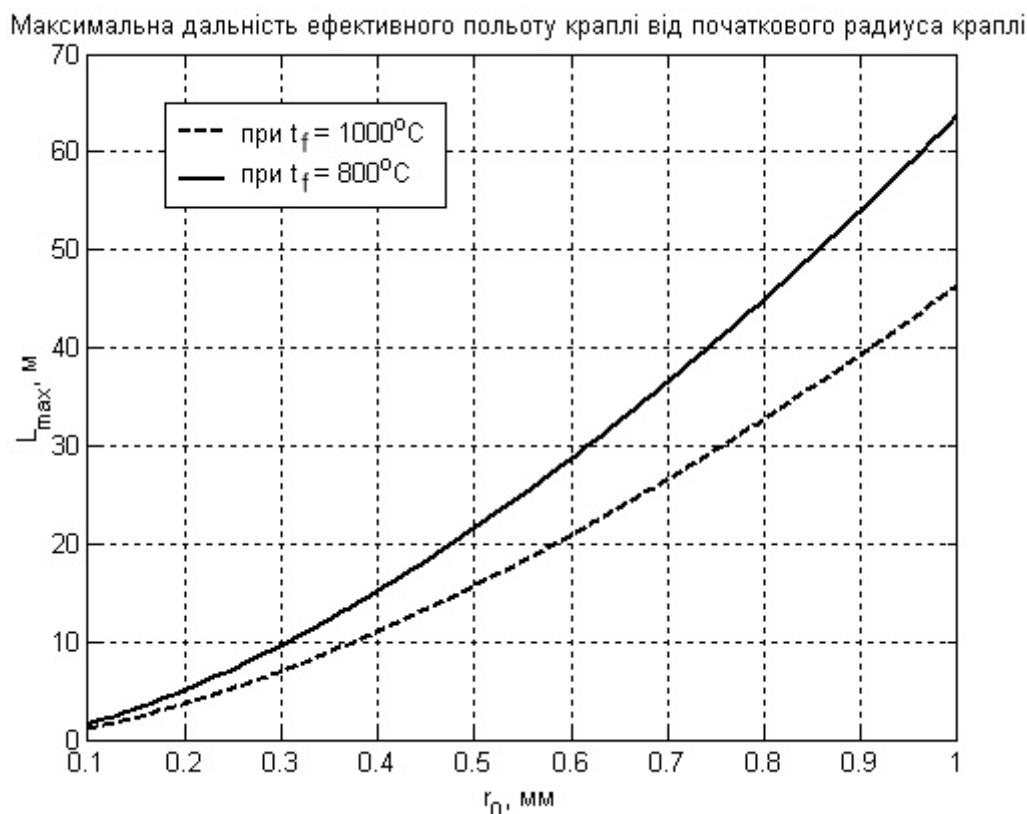


Рис. 5.6 Залежність максимальної дальності польоту крапель розчину $L_{\max}$, що забезпечує надійне гелеутворювання на оброблюваних поверхнях, від початкового радіуса крапель r_0 .

Дані залежності із відносним відхиленням у кілька відсотків апроксимуються ступеневою функцією

$$L_{\max} = f_t(t_f) \cdot r_0^n, \text{ м}, \quad (5.94)$$

у яку значення r_0 підставляються в міліметрах, із $f_t(800) = 64,4$, $f_t(1000) = 46,9$ і загальним показником ступеня $n = 1,58$. Як і передбачалося, функція (5.94) є варіантом залежності (5.92).

5.1.4 Локалізація ландшафтних пожеж за допомогою захисних смуг, покритих гелеутворюючими складами

Однією із поширених надзвичайних ситуацій є ландшафтні пожежі. Вони характеризуються великими площами та периметрами горіння. При гасінні таких пожеж гостро стоїть питання о захисті суміжних об'єктів та о подальшому розповсюдженні горіння.

Одним із важливих етапів пожежогасіння є локалізація пожежі. У більшості випадків для локалізації пожежі використовується вода. Нею обробляють горючі матеріали вздовж фронту пожежі і тим самим зупиняють розповсюдження полум'я.

Одним із недоліків води як вогнезахисного та вогнегасного засобу є її великі непродуктивні втрати внаслідок стікання з поверхонь, що підлягають захисту. Гладкі поверхні із матеріалів, що не пропитуються, утримують лише $\sim 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ води [245]. Навіть у присутності змочувачів при 10 секундному забризкуванні цей показник не перевищує $\sim 0,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2}$ води. Після випару з поверхні захисна дія води закінчується, що вимагає повторної подачі. Це суттєво збільшує витрати води на захист.

Цих недоліків нема у гелеутворюючих складів (ГУС) на основі водних розчинів. Маючи приблизно таку ж охолоджувачу здатність, що і вода, вони значно менше стікають з нахилених та вертикальних поверхонь, а після випаровування залишаються на поверхні у вигляді пористої сухої речовини (ксерогеля), яка утруднює подальше розповсюдження горіння.

В роботах [178, 246] було встановлено, що гелеподібні шари товщиною 1-2 мм захищають зразки деревини від прямого впливу полум'я протягом 3-20 хвилин. Також встановлено, що при товщині желеподібного шару більше 3,5

мм більшість ТГМ стають нездатними до полум'яного горіння. Ця обставина робить такі склади перспективними для цілей локалізації пожежі.

У даному пункті буде розглянута модель локалізації пожежі за допомогою ГУС, оцінена необхідна для цього кількість ГУС і проведено порівняння такої дії із можливостями води. Основні результати даного пункту викладені у роботі [32].

У більшості випадків ландшафтної пожежі передача тепла від фронту пожежі здійснюється випромінюванням. Розглянемо крупну розвинену пожежу у випадку, коли ширина її фронту L_f значно перевищує висоту полум'я h_f , так що на відстанях від фронту $x \ll L_f$ фронт пожежі можна вважати нескінченно широким. З метою визначення безпечної відстані від фронту пожежі знайдемо величину питомого променистого потоку q від полум'я до елементу опромінюваної поверхні, який знаходиться на відстані x від фронту на рівні землі ($z = 0$ на рисунку 5.7).

На рисунку 5.7 зображена схема теплообміну між елементом факела і елементом опромінюваної поверхні на якій індекс 2 відповідає елементу опромінюваної поверхні, індекс 1 відмічає елемент поверхні факелу пожежі; $\vec{n}_1$, $\vec{n}_2$ - одиничні вектори, спрямовані по нормалі до відповідних елементарних поверхонь; φ_1 , φ_2 - кути між нормаллю ($\vec{n}_1$ або $\vec{n}_2$) і вектором $\vec{r}$, який з'єднує елементарні поверхні; θ - кут між $\vec{n}_2$ і віссю OX , відрахований, як показано на рис.5.7.б. Вважається, що вектор $\vec{n}_2$ лежить в площині XOZ . Така орієнтація поверхні 2 відповідає максимально можливому (щодо повертання навколо вісі OX) сумарному променистому потоку, що падає на цю поверхню.

Результуючий питомий променистий тепловий потік на поверхні тіла, опромінюваного факелом пожежі, у випадку дифузійного відбиття випромінювання від поверхонь оцінюється співвідношенням [239]

$$q_{\psi} = q_0 \cdot \psi, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (5.95)$$

де параметр q_0 задається формулою

$$q_0 = \varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T^4), \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (5.96)$$

у якій ε_f і ε - відносні випромінювальні здатності (ступені чорноти) факелу полум'я і опромінюваного тіла, відповідно; T_f - середня абсолютна температура поверхні факелу, К; T - абсолютна температура оберненої до факелу поверхні опромінюваного тіла, К.

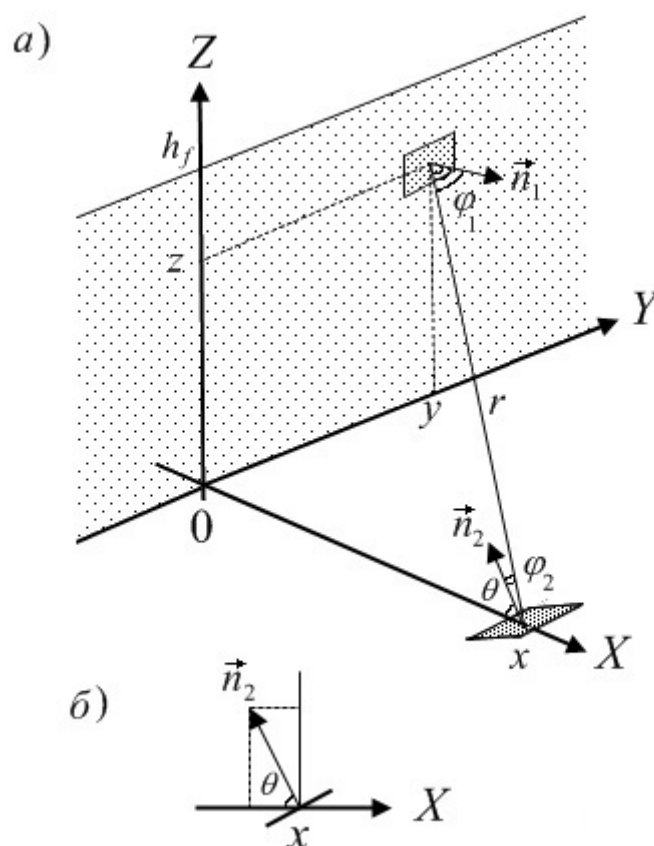


Рис. 5.7 Схема променистого теплообміну між елементом факела і елементом опромінюваної поверхні.

Зразу відмітимо, що у подавляючій кількості випадків, другим доданком

у дужках формули (5.96) можна знехтувати, тобто з достатньою точністю можна вважати, що

$$q_0 = \varepsilon_f \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_f^4, \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}. \quad (5.97)$$

Безрозмірний множник ψ співвідношення (5.95) є середнім кутовим коефіцієнтом випромінювання опромінюваної ділянки на поверхню факелу. Це цілком геометричний фактор, який визначається за формулою [239]

$$\psi = \int_{F_1} \frac{\cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2)}{\pi \cdot r^2} dF_1, \quad (5.98)$$

де інтеграл береться по всій площі F_1 випромінювача 1, яку видно з опромінюваної точки 2.

Візьмемо інтеграл (5.98), спираючись на схему ситуації, яка надана на рис. 5.7.

Інтегрування по поверхні факелу конкретизується, як

$$\int_{F_1} dF_1 \rightarrow \int_0^{h_f} dz \int_{-\infty}^{\infty} dy, \quad (5.99)$$

У системі координат рисунку 5.7 вектори нормалі мають представлення $\vec{n}_1 = [1, 0, 0]$, $\vec{n}_2 = [-\cos(\theta), 0, \sin(\theta)]$; вектор $\vec{r}_{1-2}$, спрямований із точки 1 до точки 2, має вигляд $\vec{r}_{1-2} = [x, -y, -z]$; зустрічний вектор $\vec{r}_{2-1}$ задовольняє співвідношенню $\vec{r}_{2-1} = -\vec{r}_{1-2} = [-x, y, z]$.

Дані співвідношення дають можливість у явному вигляді виразити косинуси кутів формули (5.98), використовуючи формули скалярного добутку:

$$\cos(\varphi_1) = \frac{\vec{n}_1 \cdot \vec{r}_{1-2}}{r} = \frac{x}{r}, \quad \cos(\varphi_2) = \frac{\vec{n}_2 \cdot \vec{r}_{2-1}}{r} = \frac{x \cdot \cos(\theta) + z \cdot \sin(\theta)}{r}, \quad (5.100)$$

де $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ - абсолютна величина векторів $\vec{r}_{1-2}$ і $\vec{r}_{2-1}$ (відстань між точками 1 і 2), м.

Скориставшись співвідношеннями (5.99), (5.100), із загальної формули (5.98) отримуємо шукану залежність

$$\begin{aligned} \psi &= \int_0^{h_f} dz \int_{-\infty}^{\infty} dy \frac{x \cdot [x \cdot \cos(\theta) + z \cdot \sin(\theta)]}{\pi \cdot [x^2 + y^2 + z^2]^2} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{h_f}{\sqrt{x^2 + h_f^2}} \cdot \cos(\theta) + \frac{\sqrt{x^2 + h_f^2} - x}{\sqrt{x^2 + h_f^2}} \cdot \sin(\theta) \right]. \end{aligned} \quad (5.101)$$

Змінюючи орієнтацію (кут θ) можна реалізувати $\psi_{\max}(x)$ - максимально можливе значення ψ на даній відстані x . Із умови екстремальності $\frac{\partial \psi}{\partial \theta} = 0$, знаходимо, що кут $\theta_{\max}$, на якому реалізується максимум, задовольняє співвідношенню

$$\operatorname{tg}(\theta_{\max}) = \sqrt{1 + \left(\frac{h_f}{x}\right)^2} - 1. \quad (5.102)$$

Відповідне значення кутового коефіцієнту ψ дорівнює

$$\psi_{\max}(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_f}{x}\right)^2}}}. \quad (5.103)$$

Таким чином максимально можливе значення питомого теплового потоку, який на відстані x може отримувати опромінюваний об'єкт, згідно із формулою (5.95) дорівнює

$$q_{\psi, \max}(x) = q_0 \cdot \psi_{\max}(x). \quad (5.104)$$

Умовою нерозповсюдження полум'я крізь смугу захисту є неможливість загоряння горючих матеріалів, як у межах так і за межами смуги. У межах смуги відсутність загоряння забезпечується додатковими діями по недопущенню загоряння, за межами смуги загоряння не відбувається через недостатню інтенсивність теплового впливу пожежі. Загоряння не відбудеться, якщо величина питомого результуючого теплового потоку q буде нижче критичного значення q_{cr} . Для більшості твердих горючих матеріалів нижня межа інтенсивності теплового випромінювання, достатня для займання при довготривалому впливі джерела випромінювання, перевищує $7,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$. (Значення $q_{cr} = 7,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ відповідає можливості загоряння сильно висушеної трави.)

Вирішивши рівняння

$$q_{\psi, \max}(x_{cr}) = q_{cr},$$

можна знайти мінімальну безпечну ширину x_{cr} вогнезахисної смуги.

Останньому рівнянню, згідно із співвідношенням (5.95), можна надати вигляд

$$\psi_{\max}(x_{cr}) = \psi_{cr}, \quad (5.105)$$

де введено параметр

$$\psi_{cr} = \frac{q_{cr}}{q_0}, \quad (5.106)$$

який практично в усіх значимих ситуаціях задовольняє нерівності $\psi_{cr} \ll 1$.

Використавши співвідношення (5.103) при рішенні рівняння (5.105), отримуємо, що у нашому випадку мінімальна безпечна товщина вогнезахисної смуги дорівнює

$$x_{cr} = \frac{h_f}{2} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \psi_{cr}^2}{\psi_{cr} \cdot \sqrt{1 - \psi_{cr}^2}} = \frac{h_f}{2 \cdot \psi_{cr}} \cdot [1 + O(\psi_{cr}^2)], \quad (5.107)$$

де запис $O(Z)$ означає величину порядку Z .

Надамо оцінку критичної ширини вогнезахисної смуги у випадку лісової пожежі. Якщо $h_f = 5$ м, $T_f = 1300$ К, $\varepsilon_f = 0,8$, $\varepsilon = 0,8$, $q_{cr} = 12600$ Вт·м⁻², то $q_0 = 103600$ Вт·м⁻², $\psi_{cr} = 0,122$, $x_{cr} = 20,0$ м.

Для визначення кількості вогнезахисної речовини, якою треба покрити вогнезахисну смугу, щоб уникнути запалення, розрахуємо надлишковий тепловий потік, від якого треба захиститися. У розрахунку на 1 м довжини фронту він дорівнює

$$\begin{aligned} Q_L &= \int_0^{x_{cr}} [q_{\psi, \max}(x) - q_{cr}] \cdot dx = q_0 \cdot \int_0^{x_{cr}} [\psi_{\max}(x) - \psi_{cr}] \cdot dx = \\ &= \frac{q_0 \cdot h_f}{2} \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{2 \cdot \psi_{cr}} \right) + C + O(\psi_{cr}^2) \right], \end{aligned} \quad (5.108)$$

де

$$C = \int_0^{\infty} \left[\sqrt{2} \cdot \sqrt{1 - \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}} - \frac{1}{x+1} \right] \cdot dx - 1 \approx -0,081. \quad (5.109)$$

У випадку вибраних вище значень параметрів лісової пожежі $Q_L = 345000$ Вт·м⁻¹.

Знаючи Q_L , можна оцінити кількість надлишкової променистої теплової енергії, що потрапляє на захисну смугу за характерний час $\Delta\tau$ дії пожежі. Як правило, пожежне навантаження має час вигорання від 15 до 30 хвилин. Враховуючи, що інтенсивність горіння спочатку зростає, а потім зменшується, в якості характерного часу дії візьмемо $\Delta\tau = 15$ хвилин. В результаті для надлишкової енергії у розрахунку на 1 м фронту отримаємо значення $E_L = Q_L \cdot \Delta\tau = 311 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-1}$.

Якщо захищати локалізуючи смугу за допомогою води, то треба подати таку її кількість, щоб за рахунок нагрівання і випаровування поданої води компенсувати надлишкову теплову енергію. Кількість енергії, необхідна для нагрівання 1 кг води від початкової температури $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до температури кипіння $t_s = 100^\circ\text{C}$ і подальшого повного випаровування, дорівнює

$$Q_s = c_{p.w} \cdot (t_s - t_0) + \Delta H_v = 4,18 \cdot 80 + 2254 = 2590 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1},$$

де $c_{p.w} = 4,18 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\Delta H_v = 2254 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Якщо врахувати, що коефіцієнт ефективності використання води k_{eff} не перевищує 10%, тобто оптимістичне $k_{eff} = 0,1$, то практична (розрахована на одиницю реально витраченої води) величина енергії, яку вдасться компенсувати, дорівнює $Q_{s.pract} = k_{eff} \cdot Q_s \approx 260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$. Це означає, що практична кількість води (в розрахунку на 1 м фронту пожежі), яку необхідно подавати на захисну смугу для запобігання загорянню, дорівнює

$$M_{L.pract} = \frac{E_L}{Q_{s.pract}} = \frac{311 \cdot 10^3}{260} = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}.$$

Для захисту тієї ж площі гелієвим вогнезахисним складом необхідно нанести на поверхню шар гелю товщиною 3,5 мм. З врахуванням нерівності

реальних поверхонь приймемо товщину вогнезахисного гелієвого шару $h_{gl} = 5$ мм. У цьому випадку об'єм гелю, необхідний для покриття 1-го метру довжини ділянки смуги, що локалізує пожежу, складатиме

$$V_L = h_{gl} \cdot x_{cr} = 0,005 \cdot 20 = 0,1 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-1}.$$

Даний об'єм відповідає масі гелю $M_{L,gl} = \rho_{gl} \cdot V_L \approx 1250 \cdot 0,1 = 125 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-1}$.

Відзначимо, що товщина шару гелю на ділянках захисної смуги з невеликими надлишковими потоками може бути зменшена. Через цю обставину реальна кількість гелю, яка необхідна для вогнезахисту, також може бути зменшена.

Порівнюючи $M_{L,pract}$ з $M_{L,gl}$, бачимо, що у даному випадку необхідна маса води у $M_{L,pract} / M_{L,gl} \approx 10$ раз перевищує відповідну масу гелю. Основною причиною такої ситуації є низький коефіцієнт використання води $k_{eff} = 0,1$.

5.2 Захист зернистим покриттям

У даному підрозділі буде розглянута захисна дія зернистого покриття. Спочатку буде досліджуватися загальна проблема дифузії газу крізь таке середовище. Далі буде розглянуте задача неізотермічної дифузії парів рідини через покриваючий її шар зернистого матеріалу. Буде оцінена протипожежна дія такого шару при покритті їм горючої рідини з метою запобігання запалювання. Останнім буде досліджена захисна дія двошарового покриття, що складається із зернистого шару й нанесеного на нього зверху гелієвого шару.

5.2.1 Уповільнення масопереносу зернистим середовищем

Одним з можливих способів уповільнення процесу масопереносу від джерела небезпечної речовини (наприклад, парів пального або отрути), є засипання його (наприклад, щебенем). У результаті над джерелом формується зернистий шар, що сповільнює процеси масопереносу. Відносна легкість даного способу захисту робить актуальним дослідження закономірностей

масопереносу крізь зернисте середовище. Задача полягає в знаходженні зв'язку між інтенсивністю масопереносу і характеристиками зернистого середовища.

Дана проблема окремо не досліджувалася. За звичай зернисте середовище просто характеризувалося коефіцієнтом дифузії, значення якого визначалося дослідним шляхом. Зі структурних залежностей постулювалася пропорційність цього коефіцієнта коефіцієнту дифузії в просторі без засипання, подовженню шляху дифузії, пов'язаному з обходом зерен, і об'ємній частці порожнеч, що пронизують зернисте середовище [247].

Як буде доведено в пункті, останнє припущення дає тільки верхню границю значення коефіцієнта дифузії крізь зернисте середовище. Викладені тут результати опубліковані в роботі [47].

У даному пункті розглядається стаціонарний ізотермічний масоперенос, здійснюваний винятково по порожнечах зернистого матеріалу з відомої (регулярною або випадкової) структурою. Вважається, що характерна ширина порожнеч перевищує довжину вільного пробігу мікрочастинок переносимої речовини. Плоский зернистий шар має товщину Δh , м. Значення концентрації переносимої речовини на зовнішніх границях шару ϕ_1 і ϕ_2 , моль·м⁻³ - задані сталі величини (для визначеності приймається, що $\phi_1 > \phi_2$). Вважається, що перепад тисків між сторонами шару нехтовно малий, внаслідок чого масоперенос має виключно дифузійний характер. Коефіцієнт дифузії переносимої речовини у вільному просторі D , м²·с⁻¹, заданий. Необхідно розрахувати потік компонента J_μ , моль·с⁻¹, крізь площадку зернистого матеріалу заданої площі F , м².

Задача зводиться до розгляду наслідків застосування рівняння дифузії (рівняння Фіка) [229] у стаціонарних умовах у порах зернистого середовища. Для прояснення ситуації розіб'ємо картину потоку компонента на малі однозв'язні трубки струму [248]. (Для шарів кінцевої товщини така розбивка завжди можлива.) Схематичне зображення такої трубки представлено на рис.5.8.

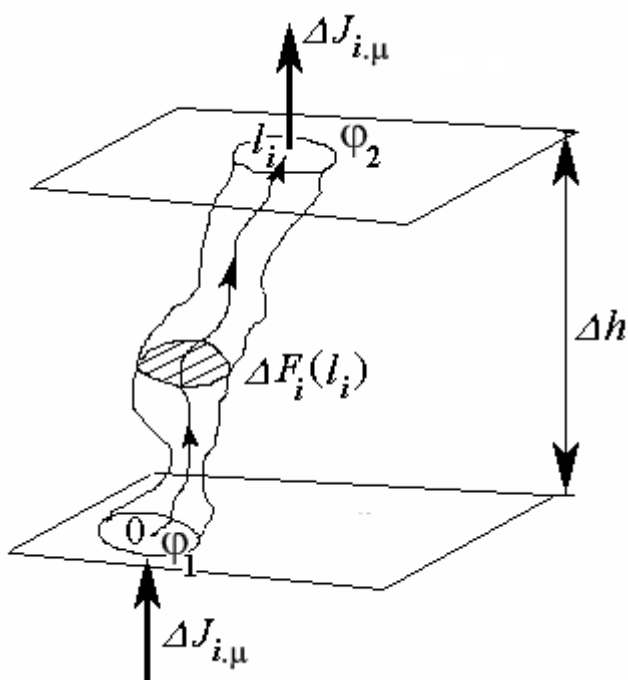


Рис. 5.8 Схематичне зображення i -ої трубки струму крізь плоский шар зернистого середовища

Трубки відмічаються індексом « i ». Стрілками указано напрямок масопереносу, уздовж якого відраховується довжина шляху масопереносу l_i у даній трубці струму; заштрихований переріз трубки струму відповідає поверхні рівних концентрацій, його площа позначається ΔF_i . Нагадаємо, що образуючі бічних сторін трубок струму паралельні векторам градієнта концентрації компонента, тому масоперенос здійснюється тільки уздовж трубок струму. У зв'язку із цією обставиною у стаціонарних умовах наслідком закону збереження кількості компонента є незмінність потоку компонента $\Delta J_{i,\mu}$, моль·с⁻¹, крізь будь-який поперечний переріз трубки струму.

Описані вище обставини означають, що рівнянню Фіка для i -ої трубки струму можна надати вигляд:

$$-D \cdot \frac{\partial \varphi(l_i)}{\partial l_i} = \frac{\Delta J_i}{\Delta F_i(l_i)}, \quad (5.110)$$

де l_i – відстань від нижньої поверхні шару до даної точки, відміряна уздовж i -ої трубки струму, м (дивися рис. 5.8); $\varphi(l_i)$ – концентрація компонента в даній точці, моль·м⁻³; ΔF_i – площа перерізу трубки струму поверхнею рівних концентрацій, м².

Проінтегруємо рівняння (5.110) уздовж відповідної трубки струму від однієї поверхні шару до іншої. У результаті після алгебраїчних перетворень одержимо вираз для потоку компонента крізь дану трубку струму

$$\Delta J_{i,\mu} = \frac{D \cdot \Delta \varphi}{\int_0^{\Delta l_i} \frac{dl_i}{\Delta F_i(l_i)}} = D \cdot \frac{\Delta \varphi}{\Delta h} \cdot \frac{\overline{(\cos(\theta))}_i}{\left(\frac{1}{\Delta F}\right)_i}, \quad (5.111)$$

де $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – перепад концентрацій компонента на дифузійному шарі, моль·м⁻³; Δl_i – відстань між поверхнями шару, узята уздовж трубки струму, м; тут і далі лінією над виразом позначене усереднення виразу уздовж відповідної трубки струму, тобто

$$\overline{\left(\frac{1}{\Delta F}\right)}_i = \frac{1}{\Delta l_i} \cdot \int_0^{\Delta l_i} \frac{dl_i}{\Delta F_i(l_i)} \quad (5.112)$$

- середнє значення зворотної площі перерізу i -ої трубки струму, м⁻².; $\cos(\theta)$ – спрямовуючий косинус вектора щільності потоку компонента у напрямку нормалі до поверхні шару. У зв'язку із цим

$$\overline{(\cos(\theta))}_i = \overline{\left(\frac{dh_i}{dl_i}\right)}_i = \frac{1}{\Delta l_i} \cdot \int_0^{\Delta l_i} \left(\frac{dh_i}{dl_i}\right) dl_i = \frac{1}{\Delta l_i} \cdot \int_0^{\Delta h} dh_i = \frac{\Delta h}{\Delta l_i} \quad (5.113)$$

(у формулі (5.113) dh_i – проекція елемента трубки струму dl_i на нормаль до граничних площин).

Використовуючи формулу (5.111), можна виразити повний потік компонента через площадку зернистого матеріалу заданої площі F у вигляді суми по всіх трубках струму, які починаються на цій площадці:

$$J_{\mu} = \sum_i \Delta J_{i,\mu} = D \cdot \Delta\varphi \cdot \sum_i \frac{1}{\int_0^{\Delta l_i} \frac{dl_i}{\Delta F_i(l_i)}} = D \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta h} \cdot \sum_i \frac{\overline{(\cos(\theta))}_i}{\left(\frac{1}{\Delta F}\right)_i}. \quad (5.114)$$

Для подальших оцінок використаємо наступну загальну властивість усереднення довільних позитивних функцій:

$$\overline{\left(\frac{1}{\Delta F}\right)_i} \geq \frac{1}{\overline{(\Delta F)}_i}, \quad (5.115)$$

причому рівність реалізується за умови, що площа перерізу ΔF_i постійна (не залежить від l_i).

Відмітимо, що середня площа перерізу $\overline{(\Delta F)}_i$ прямо пов'язана з об'ємом i -ой трубки струму ΔV_i :

$$\overline{(\Delta F)}_i = \frac{1}{\Delta l_i} \cdot \int_0^{\Delta l_i} \Delta F_i(l_i) dl_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta l_i}. \quad (5.116)$$

Спільне застосування співвідношень (5.115), (5.116) до формули (5.114) дозволяє оцінити повний потік компонента

$$J_{\mu} \leq D \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta h} \cdot \sum_i \overline{(\cos(\theta))}_i \cdot \frac{\Delta V_i}{\Delta l_i} = D \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta h} \cdot F \cdot \sum_i \left[\overline{(\cos(\theta))}_i\right]^2 \cdot \frac{\Delta V_i}{\Delta V}, \quad (5.117)$$

де $\Delta V = F \cdot \Delta h$ - загальний об'єм зернистого шару, м³.

Для спрощення оцінки (5.117) скористаємося очевидним співвідношенням $\left[\overline{(\cos(\theta))}_i\right]^2 \leq 1$, у якому рівність настає тільки, якщо утворюючі трубки струму є прямими, спрямованими по нормалі до поверхні шару. У результаті, замінивши у (5.117) всі напрямні косинуси на одиниці, одержимо співвідношення

$$J_{\mu} \leq D \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta h} \cdot F \cdot r_V, \quad (5.118)$$

у якому величина

$$r_V = \frac{\sum_i \Delta V_i}{\Delta V}$$

являє собою загальну об'ємну частку проточних порожнин у розглянутому зернистому середовищі (пористість).

Проведений розгляд показав, що дифузію у зернистому середовищі можна описувати як дифузію в однорідному середовищі з ефективним коефіцієнтом дифузії D_{ef} , що задовольняє співвідношенню

$$D_{ef} = D \cdot \sum_i \frac{\overline{(\cos(\theta))}_i}{F \cdot \left(\frac{1}{\Delta F}\right)_i} \leq D \cdot \sum_i \left[\overline{(\cos(\theta))}_i\right]^2 \cdot \frac{\Delta V_i}{\Delta V} \leq D \cdot r_V. \quad (5.119)$$

Відмітимо, що при такому способі опису для визначення потоків компонента в розрахункових формулах необхідно використовувати дійсне значення концентрації компонента (у порожнинах, а не у середньому по зернистому матеріалу).

Отримані формули дають відносно простий інструмент для оцінок коефіцієнта дифузії (а отже й потоків речовини) у зернистому матеріалі у випадку регулярної структури цього матеріалу. Методика розрахунку складається в максимально можливого збільшенні ширини трубок струму аж до границь порожнин і надалі дослідженні властивостей одержуваних геометричних структур.

У випадку нерегулярної структури формули теж вірні, однак аналіз утруднюється складністю прогнозування маршруту елементарної трубки струму (складно визначити: «У яку із двох дотичних порожнин потрапить трубка?»). Має сенс поміняти підхід. Розглядати не елементарні трубки струму, що проходять крізь весь шар, а максимально широкі трубки (дифузійні характеристики яких легко визначити), що зв'язують точки розгалуження. У результаті дана задача зведеться до задачі протікання струму по випадковій сітці опорів. Описані міркування можуть послужити основою програми подальших досліджень.

5.2.2 Математичне моделювання неізотермічної дифузії пари горючої рідини крізь зернисте покриття

Одним з важливих напрямків діяльності оперативно-рятувальних підрозділів ДСНС є запобігання виникнення або обмеження поширення пожеж за участю горючих рідин. Проблемою, що для цього необхідно вирішувати, є недопущення загоряння пари горючої рідини. Одним зі способів досягнення такої мети є неповна ізоляція парів, що зменшує їхню концентрацію і потік до безпечних величин. Можливим варіантом подібної часткової ізоляції є створення над поверхнею рідини шару матеріалу зернистої структури, що утрудняє перенос пари до зони ймовірного загоряння.

Зменшення концентрації пари горючих і токсичних рідин у повітрі досягається декількома способами. Цього можна досягти шляхом зменшення масштабу випару рідини або поглинанням її пари різними абсорбентами [249-

251]. У більшості випадків як абсорбент парів рідини використовують воду. Даний метод реалізується постановкою водяних завіс.

Зменшити потік парів рідини так само можна рядом способів. До них відноситься зменшення площі випару або зменшення швидкості випару, граничним випадком якого є ізоляція рідини. Швидкість випару можна зменшити шляхом розведення небезпечної рідини проточною водою або нейтралізуючим розчином, а також введенням у рідку фазу згущувачів. До ізоляційних методів відноситься покриття дзеркала розливу полімерною плівкою.

Одним з основних методів є ізоляція вільної поверхні рідини повітряно-механічною піною. Піни, однак, як засобу ізоляції рідин мають ряд недоліків:

- існують труднощі з їхньою подачею на великі відстані;
- піни поступово руйнуються, особливо при контакті з полярними рідинами;
- піни забруднюють нафту та нафтопродукти, що утрудняє їхнє подальше використання і переробку;
- більшість поверхнево-активних речовин, що входять до складу піноутворювачів екологічно небезпечні [252, 253, 195, 196].

Перераховані фактори приводять до збільшення витрати піни і завданню втрат навколишньому середовищу

Варіантом усунення перерахованих недоліків повітряно-механічних пін є використання для цілей ізоляції гелеутворюючих складів (ГУС) [165], спочатку запропонованих для пожежогасіння. Нанесений на поверхню рідини гелеподібний шар забезпечує її ізоляцію. Зазвичай гель щільніше рідини. У зв'язку із цим для забезпечення плавучості шару гелю в горючих рідинах було запропоновано використовувати легкий негорючий носій - гранульоване піноскло [220]. Досвіди показали, що бінарний шар піноскло-гель залишається стабільним на поверхні бензину протягом декількох діб.

Питання про ізолюючі властивості гелеподібного шару було розглянуто у роботі [46]. Створення бінарного шару є відносно складним процесом. У зв'язку

із цією обставиною в роботі [228] досліджувався процес переносу пари горючої рідини у стаціонарному ізотермічному режимі крізь одиничний шар гранульованого піноскла. Отримані в [228] результати до суцільно неізотермічної ситуації загоряння, строго говорячи, не застосовні. Остання обставина ініціювала виконання роботи [52], зміст якої викладено у даному пункті.

Задачею, розглянутою у даному пункті, є побудова математичної моделі процесу неізотермічної дифузії парів рідини крізь виступаючий над її поверхнею шар зернистого матеріалу.

Просторова схема процесу представлена на рис. 5.9 [52].

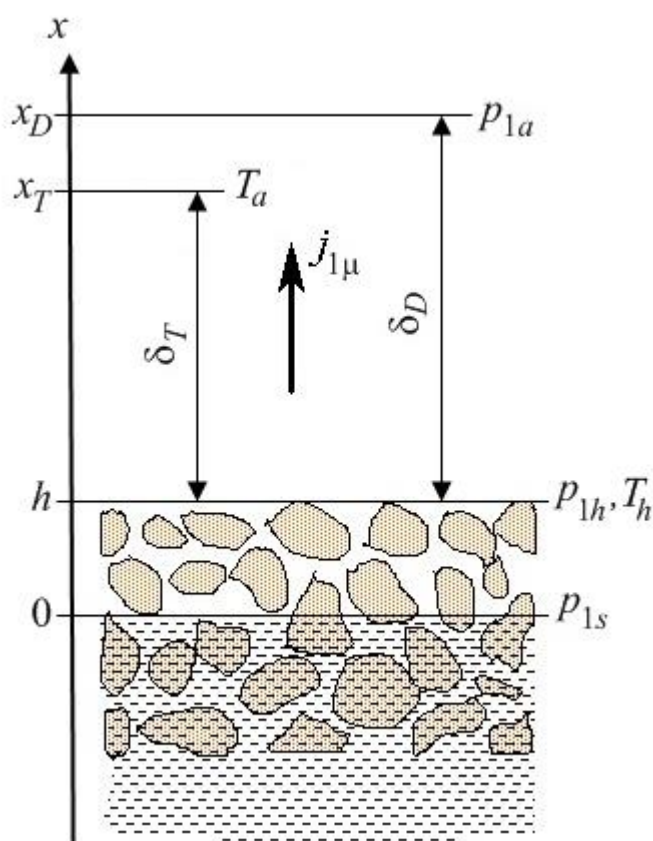


Рис. 5.9 Просторова схема задачі переносу пари пального крізь шар пористого покриття. Заштриховано область, у якій перебуває рідина

Просторова координата x , м, направлена угору (у напрямку переносу парів). Значенню координати $x=0$ відповідає поверхня рідкої фази, координата $x=h$ відповідає зовнішній границі покриття, тобто величина h є товщиною

шару дифузії пари у пористому матеріалі. Координата $x = x_D = h + \delta_D$ відзначає границю перехідного шару концентрації пари пального, δ_D - товщина концентраційного шару. При $x \geq x_D$ концентрація пари збігається з концентрацією в зовнішньому повітряному просторі. Аналогічно, координата $x = x_T = h + \delta_T$ відзначає границю перехідного температурного шару, δ_T - товщина цього шару. При $x \geq x_T$ температура газового середовища збігаються з температурою в зовнішньому повітряному просторі. Відзначимо, що при турбулентному характері руху газового середовища $\delta_D = \delta_T$.

Характеристики горючої рідини та її пари відзначаються індексом «1». Так p_{1s} , p_{1h} і p_{1a} - парціальний тиск пари горючої рідини над її поверхнею, на рівні поверхні зернистого покриття і у зовнішньому повітряному просторі, відповідно, Па. Параметр p_{1s} є тиском насиченої пари пального. Він пов'язаний з температурою на границі рідини $T(0, \tau)$ залежністю лінії насичення $p_{1s} = p_{1s}(T(0, \tau))$. T_h і T_a - абсолютна температура середовища на рівні поверхні зернистого покриття і у зовнішньому повітряному просторі, К. Символом $j_{1\mu}$ позначена поверхнева щільність молярного потоку пари горючої рідини, моль·с⁻¹·м⁻².

Відзначимо обставину, що дозволяє спростити розглянуту модель неізотермічного масопереносу від поверхні рідини в зовнішній повітряний простір. При загальному описі процеси, що впливають на перенос пари, характеризуються трьома часами. Першим є характерний час дифузії пари крізь зернистий шар

$$\tau_{D.gr} = \frac{h^2}{D_{gr}}, \quad (5.120)$$

де D_{gr} - коефіцієнт дифузії пари у повітрі крізь зернистий шар по його порожнинах, м²·с⁻¹. Він пропорційний коефіцієнту дифузії пари пального в

повітрі без гранул (D_a), $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ (дивись (5.119)):

$$D_{gr} \leq D_a \cdot \left(\frac{h}{l_m} \right)^2 \cdot r_v, \quad (5.121)$$

де r_v - об'ємна частка порожнеч у зернистому середовищі, крізь які рухається пара рідини, l_m - середнє значення довжини трубки струму між поверхнями шару.

Другим характерним часом є час прогріву зернистого шару

$$\tau_{T.gr} = \frac{h^2}{a_{gr}}, \quad (5.122)$$

де a_{gr} - коефіцієнт температуропровідності зернистого шару, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

У зв'язку з тим, що $D_{gr} \gg a_{gr}$, реалізується умова

$$\tau_{D.gr} \ll \tau_{T.gr}, \quad (5.123)$$

тобто усередині гранульованого шару реалізується квазістаціонарний режим масопереносу. Це означає, що, якщо провести усереднення опису по інтервалах часу $\Delta\tau$, де

$$\tau_{D.gr} \leq \Delta\tau \ll \tau_{T.gr}, \quad (5.124)$$

то у кожен момент масоперенос у зернистому шарі можна розглядати як стаціонарний процес у повільно мінливому полі температур.

Третім характерним часом є τ_a - загальний час установаження процесів тепло- та масопереносу у перехідних концентраційному й температурному

шарах над поверхнею покриття. Цей час єдиний для теплових і масопереносних процесів у зв'язку із загальним механізмом вирівнювання концентрацій і температур у чисто газовому середовищі.

У більшості ситуацій

$$\tau_a \leq \tau_{D,gr}, \quad (5.125)$$

що дозволяє після усереднення опису по інтервалах часу $\Delta\tau$ розглядати поза зернистим шаром як квазістаціонарні процеси не тільки масо- але й теплопереносу.

Виведемо формули, які у межі (5.124) описують досліджувані процеси. Спочатку розглянемо рівняння до процедури усереднення за часом $\Delta\tau$. Будемо вважати, що газове середовище складається із двох компонентів (пари пального (індекс «1») і чистого повітря (індекс «2»)), які поведуть себе як ідеальний газ. У цьому випадку молярні концентрації компонент φ_1 і φ_2 , моль·м⁻³, задовольняють рівнянням стану ідеального газу:

$$\begin{aligned} p_1(x, \tau) &= \varphi_1(x, \tau) \cdot R \cdot T(x, \tau), \\ p_2(x, \tau) &= \varphi_2(x, \tau) \cdot R \cdot T(x, \tau), \end{aligned} \quad (5.126)$$

де p_1 і p_2 - парціальні тиски відповідних компонентів, Па; T - абсолютна температура середовища, К.

Щільності молярних потоків компонент суміші $j_{1\mu}$ й $j_{2\mu}$, моль·м⁻²·с⁻¹, мають дифузійну і загальну конвекційну (стефанівську) складові [229]:

$$j_{1\mu}(x, \tau) = -D \cdot \frac{\partial \varphi_1(x, \tau)}{\partial x} + w(x, \tau) \cdot \varphi_1(x, \tau), \quad (5.127)$$

$$j_{2\mu}(x, \tau) = -D \cdot \frac{\partial \varphi_2(x, \tau)}{\partial x} + w(x, \tau) \cdot \varphi_2(x, \tau), \quad (5.128)$$

де $D(T)$ - коефіцієнт взаємної дифузії компонент, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; w - швидкість переносу газової суміші, як цілого, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$. У відповідності до цього загальна щільність молярного потоку часток газу j_μ дорівнює

$$j_\mu = j_{1\mu} + j_{2\mu} = -D \cdot \frac{\partial(\varphi_1 + \varphi_2)}{\partial x} + w \cdot (\varphi_1 + \varphi_2). \quad (5.129)$$

Рівняння (5.126)-(5.128) доповнюються умовою сталості загального тиску p :

$$p = p_1(x, \tau) + p_2(x, \tau) = \text{const}. \quad (5.130)$$

Скориставшись співвідношеннями (5.126), виключимо з опису концентрації компонент. У цьому варіанті при нехтуванні зазвичай малою термодифузією питомі потоки компонентів дорівнюють

$$j_{1\mu} = -\frac{D}{R \cdot T} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} + w \cdot \frac{p_1}{R \cdot T}, \quad (5.131)$$

$$j_{2\mu} = -\frac{D}{R \cdot T} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x} + w \cdot \frac{p_2}{R \cdot T}. \quad (5.132)$$

Склавши співвідношення (5.131), (5.132) і скориставшись незмінністю загального тиску (5.130), одержимо зв'язок загальної щільності потоку часток (5.129) з величиною стефанівської швидкості переносу w :

$$j_\mu = j_{1\mu} + j_{2\mu} = \frac{w}{R \cdot T} \cdot p. \quad (5.133)$$

Далі проведемо усереднення за часом $\Delta \tau$, що задовольняє умові (5.124). Як відзначалося раніше, у цьому наближенні потоки компонент стають

стаціонарними і як наслідок не залежними від просторової координати. Врахувавши, що потік повітряного компонента у поверхні випаровування дорівнює нулю, використовуючи однорідність потоку, ми скрізь у досліджуваній області одержимо значення

$$j_{2\mu} = 0, \quad (5.134)$$

і, отже,

$$j_{1\mu} = j_{\mu} = \frac{w}{R \cdot T} \cdot p. \quad (5.135)$$

Рівняння (5.135) дозволяє, позбувшись швидкості w у рівнянні (5.131), переписати останнє у вигляді:

$$\frac{dp_1}{p - p_1} = -j_{1\mu} \cdot \frac{R}{p} \cdot \frac{T}{D} \cdot dx. \quad (5.136)$$

Проінтегрувавши рівняння (5.136) в області однорідності (дивися рис. 5.10), одержимо вираз щільності потоку пари пального через парціальний тиск цієї пари $p_{1d} = p_1(x_d)$ і $p_{1u} = p_1(x_u)$ на нижній і верхній границях області та ширину області $\Delta x = x_u - x_d$:

$$j_{1\mu} = \frac{p}{R} \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)^{-1} \cdot \frac{1}{\Delta x} \cdot \ln \left(\frac{p - p_{1u}}{p - p_{1d}} \right), \quad (5.137)$$

де риска над величиною означає середнє значення величини на відповідній ділянці:

$$\left(\overline{\frac{T}{D}} \right) \equiv \frac{1}{\Delta x} \int_{x_d}^{x_u} \frac{T}{D(T)} dx. \quad (5.138)$$

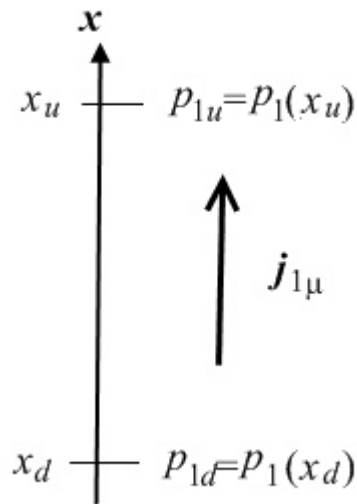


Рис. 5.10 Просторова схема задачі переносу пари пального крізь однорідний шар

Відразу відзначимо, що у випадку малих парціальних тисків пари пального у порівнянні із загальним тиском ($p_{1u} \ll p$ і $p_{1d} \ll p$), перший член розкладання натурального логарифма у формулі (5.137) породжує відомий вираз стаціонарного дифузійного потоку:

$$j_{1\mu} = \frac{p}{R} \cdot \left(\frac{T}{D} \right)^{-1} \cdot \frac{1}{\Delta x} \cdot \frac{p_{1d} - p_{1u}}{p} \approx \frac{\bar{D}}{\Delta x} \cdot (\varphi_{1d} - \varphi_{1u}), \quad (5.139)$$

у якому φ_{1u} і φ_{1d} являють собою концентрації, що відповідають парціальним тискам p_{1u} і p_{1d} . Порівняння формул (5.137) і (5.139) показує, що співвідношення (5.139) дає завищення величини потоку пари пального, істотне при $p_{1d} \sim p$.

Застосувавши співвідношення (5.137) до гранульованого шару ($0 \leq x \leq h$) і до перехідної області над гранульованим шаром ($h \leq x \leq x_D = h + \delta_D$) (дивися рис. 5.9), одержимо співвідношення, що виражають поверхневу щільність

молярного потоку пари пального в гранульованому (індекс «*gr*») і в перехідному повітряному (індекс «*a*») шарі:

$$j_{1\mu}^{(gr)} = \frac{p}{R} \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_{gr}^{-1} \cdot \frac{1}{h} \cdot \ln \left(\frac{p - p_{1h}}{p - p_{1s}} \right), \quad (5.140)$$

$$j_{1\mu}^{(a)} = \frac{p}{R} \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_a^{-1} \cdot \frac{1}{\delta_D} \cdot \ln \left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1h}} \right). \quad (5.141)$$

Доповнимо вирази (5.140), (5.141) умовою безперервності потоку пального на зовнішній границі гранульованого шару (при $x = h$). Через те, що щільність молекулярного потоку у формулі (5.140) (як і у формулі (5.141)) бралася розраховуючи на одиницю площі перерізу всього середовища (а не тільки порожнин), умові безперервності потоку можна надати вигляд:

$$j_{1\mu}^{(gr)} = j_{1\mu}^{(a)}. \quad (5.142)$$

Спільне рішення системи рівнянь (5.140)-(5.142) дозволяє виразити поверхневу щільність молекулярного потоку пального $j_{1\mu} = j_{1\mu}^{(gr)} = j_{1\mu}^{(a)}$ через парціальні тиски пари пального на зовнішніх границях області масопереносу

$$j_{1\mu}(h) = \frac{p}{R} \cdot \frac{1}{h \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_{gr} + \delta_D \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_a} \cdot \ln \left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1s}} \right), \quad (5.143)$$

або інакше

$$j_{1\mu}(h) = \frac{\delta_D \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_a}{h \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_{gr} + \delta_D \cdot \left(\overline{\frac{T}{D}} \right)_a} \cdot j_{1\mu}(0). \quad (5.144)$$

З формули (5.144) витікає, що наявність гранульованого захисного шару зменшує потік пари пального не менш ніж у $K_{gr.a}$ раз, де

$$K_{gr.a} \equiv \frac{j_{1\mu}(0)}{j_{1\mu}(h)} = 1 + k_{gr.a}, \quad (5.145)$$

де

$$k_{gr.a}(h) \equiv \frac{h \cdot \overline{\left(\frac{T}{D}\right)_{gr}}}{\delta_D \cdot \overline{\left(\frac{T}{D}\right)_a}} \approx \frac{h}{\delta_D} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}} \geq \frac{h}{\delta_D} \cdot \frac{1}{r_V} \cdot \left(\frac{l_m}{h}\right)^2. \quad (5.146)$$

Використовуючи співвідношення (5.140)-(5.142), можна виразити парціальний тиск пари пального над поверхнею гранульованого шару через тиски (p_{1s} і p_{1a}) на границях системи:

$$p_{1h} = p - (p - p_{1a})^{\frac{k_{gr.a}}{1+k_{gr.a}}} \cdot (p - p_{1s})^{\frac{1}{1+k_{gr.a}}}. \quad (5.147)$$

У межі $p_{1a} < p_{1s} \ll p$ вираз (5.147) спрощується до відомої залежності

$$p_{1h} \approx p_{1s} - \frac{k_{gr.a}}{1+k_{gr.a}}(p_{1s} - p_{1a}) = p_{1s} - \frac{h \cdot \overline{\left(\frac{T}{D}\right)_{gr}} \cdot (p_{1s} - p_{1a})}{h \cdot \overline{\left(\frac{T}{D}\right)_{gr}} + \delta_D \cdot \overline{\left(\frac{T}{D}\right)_a}}. \quad (5.148)$$

Варто мати на увазі, що в межі $p_{1s} \rightarrow p$ тиски, розраховані по формулі (5.147), перевищують значення, одержувані по спрощеній формулі (5.148),

тобто у випадку $p_{1s} \sim p$ при визначенні пожежної небезпеки формулою (5.148) користуватися не можна.

Останнє твердження наочно демонструють графіки на рис. 5.11, які відображають залежність парціального тиску пари $p_1(h)$ згідно загальної ступеневої формули (5.147) та по її спрощеному варіанту (5.148) (останні лінії помічені індексом «lin»). Символ $k\%$ поряд з позначкою ліній означає, що на даній лінії $p_{1s} = k\% \cdot p$, де загальний тиск p має величину $p = 1 \cdot 10^5$ Па. При побудові графіків конкретизована залежність безрозмірної величини $k_{gr,a}(h)$ (5.146). Вона має вигляд $k_{gr,a}(h) = 8 \cdot h$, де товщина шару h береться у метрах.

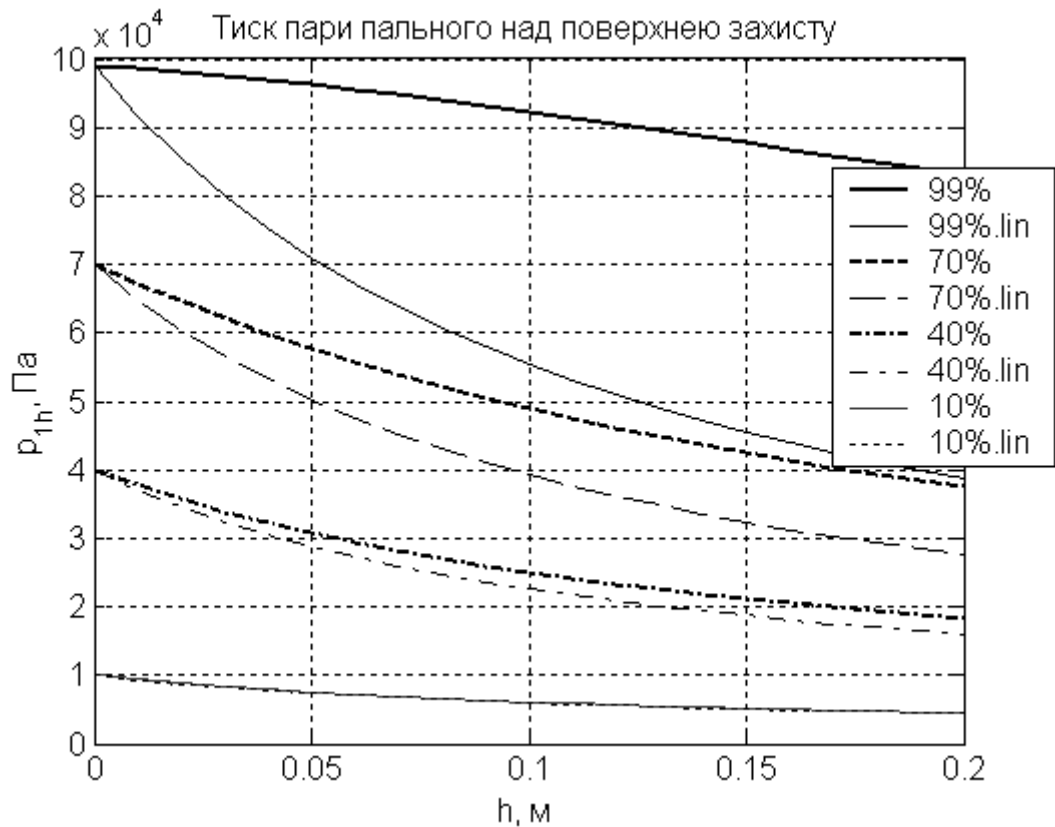


Рис. 5.11 Залежність тиску пари пального над поверхнею захисту від товщини захисного шару

Перейдемо до одержання рівняння енергетичного балансу в розглянутій системі (при $0 < x < x_T$). Воно має вигляд:

$$c'_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = - \frac{\partial}{\partial x} [q(x, \tau)], \quad (5.149)$$

де c'_p - питома об'ємна ізобарна теплоємність середовища, Дж·м⁻³·К⁻¹; q - усереднена по поперечному перерізу щільність потоку енергії у середовищі, Вт м⁻².

Для запису рівняння (5.149), як рівняння щодо температурного поля, необхідно знати явний вид залежності q від температури середовища. До усереднення по інтервалах часу $\Delta \tau$

$$q(x, \tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + j_{1\mu} \cdot H_{1\mu}(T) + j_{2\mu} \cdot H_{2\mu}(T), \quad (5.150)$$

де $\lambda(T)$ - коефіцієнт теплопровідності середовища, Вт·м⁻¹·К⁻¹. Величини $H_{1\mu}(T)$ і $H_{2\mu}(T)$ є питомими молярними ентальпіями пари пального і повітря, відповідно, Дж·моль⁻¹. У чисто повітряному середовищі ($h < x$) у праву частину співвідношення (5.150) слід додавати питомий променистий потік q_r .

Після усереднення опису процесів по інтервалах часу $\Delta \tau$ питомі потоки $j_{1\mu}$ й $j_{2\mu}$ стануть однорідними, що, зокрема, через відсутність потоку повітря на границі з рідиною (при $x = 0$) приводить до співвідношення $j_{2\mu} = 0$ (5.134). У результаті усередині гранульованого шару (тобто при $0 < x < h$) усереднений вираз (5.150) має вигляд:

$$q(x, \tau) = -\lambda_{gr.g} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + j_{1\mu} \cdot [H_{1\mu}(T_a) + c_{1p\mu} \cdot (T - T_a)], \quad (5.151)$$

де

$$c_{1p\mu} = \left. \frac{\partial H_{1\mu}(T)}{\partial T} \right|_p, \text{ Вт·м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}, \quad (5.152)$$

- питома молярна ізобарна теплоємність пального, Дж·моль⁻¹·К⁻¹; $\lambda_{gr.g}$ - коефіцієнт теплопровідності гранульованого середовища з простором між гранулами, який заповнено газом, Вт·м⁻²·К⁻¹.

У перехідному повітряному шарі ($h < x < x_T$) усереднений по часам Δt процес теплопереносу буде квазістаціонарним. У цьому наближенні питомий тепловий потік q , як і потік пари пального, буде однорідним. Це означає, що виконується співвідношення

$$q = -\lambda_a \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + j_{1\mu} \cdot [H_{1\mu}(T_a) + c_{1p\mu} \cdot (T - T_a)] + q_r, \quad (5.153)$$

де λ_a - коефіцієнт теплопровідності пароповітряного середовища, причому q не залежить від x .

Останнє рівняння можна, переписавши у вигляді

$$\frac{dT}{j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot (T - T_a) + j_{1\mu} \cdot H_{1\mu}(T_a) + q_r - q} = \frac{dx}{\lambda_a},$$

проінтегрувати по перехідному газовому шару ($x \in [h, x_T]$). У результаті вийде співвідношення

$$\ln \left[\frac{j_{1\mu} \cdot H_{1\mu}(T_a) + q_r - q}{j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot (T_h - T_a) + j_{1\mu} \cdot H_{1\mu}(T_a) + q_r - q} \right] = j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot \overline{\lambda_a^{-1}} \cdot \delta_T, \quad (5.154)$$

де $T_h \equiv T(h, \tau)$ - температура на зовнішній поверхні зернистого шару, К; $\overline{\lambda_a^{-1}}$ - середнє значення зворотного коефіцієнта теплопровідності пароповітряного середовища:

$$\overline{\lambda_a^{-1}} \equiv \frac{1}{\delta_T} \cdot \int_h^{h+\delta_T} \frac{dx}{\lambda_a}. \quad (5.155)$$

Зі співвідношення (5.154) можна одержати алгебраїчний вираз квазістаціонарного питомого теплового потоку в пароповітряному шарі:

$$q = j_{1\mu} \cdot H_{1\mu}(T_a) + \frac{j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot (T_h - T_a)}{1 - \exp\left(-j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot \overline{\lambda_a^{-1}} \cdot \delta_T\right)} + q_r. \quad (5.156)$$

Знання залежності q від температури дозволяє записати рівняння енергетичного балансу (5.149), як рівняння щодо температури. Так, підставляючи вираз (5.151) у співвідношення (5.149), одержимо рівняння енергетичного балансу усередині зернистого шару із заповненими газом порожнечами ($0 < x < h$)

$$c'_{p.gr.g} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{gr.g} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (5.157)$$

де $c'_{p.gr.g}$ - питома об'ємна ізобарна теплоємність зернистого середовища з газовими зазорами, Дж·м⁻³·К⁻¹.

У області зернистого середовища ($x < 0$), у якій простір між зернами заповнено рідким паливом, рівняння енергетичного балансу має звичайний вигляд рівняння нестационарної теплопровідності

$$c'_{p.gr.l} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{gr.l} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (5.158)$$

де $c'_{p.gr.l}$ і $\lambda_{gr.l}$ - відповідно, питома об'ємна ізобарна теплоємність, Дж·м⁻³·К⁻¹, і коефіцієнт теплопровідності, Вт·м⁻²·К⁻¹, зернистого середовища із зазорами, заповненими рідким паливом.

Граничними умовами до рівнянь (5.157), (5.158) є безперервність поля температури й теплового потоку на загальній границі ($x=0$). Вони мають вигляд

$$T(-0, \tau) = T(+0, \tau); \quad (5.159)$$

$$-\lambda_{gr.l} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=-0} = -\lambda_{gr.g} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=+0} + j_{1\mu} \cdot \Delta H_{1\mu.l.g}(T(0, \tau)), \quad (5.160)$$

де $\Delta H_{1\mu.l.g}(T)$ - питома молярна теплота пароутворення пального, Дж·моль⁻¹.

Граничною умовою до рівняння (5.157) на границі з газовим середовищем ($x=h$) є безперервність питомого теплового потоку q . З формул (5.151) і (5.156) витікає, що цю граничну умову можна представити у вигляді

$$-\lambda_{gr.g} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=h-0} = \frac{j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot (T_h - T_a)}{\exp\left(j_{1\mu} \cdot c_{1p\mu} \cdot \lambda_a^{-1} \cdot \delta_T\right) - 1} + q_r. \quad (5.161)$$

У рівнянні (5.157) і граничних умовах до нього (5.160), (5.161) питомих молярний потік пари пального $j_{1\mu}$ розраховується по формулі (5.143), у якій у якості p_{1s} береться тиск насиченої пари пального при температурі $T(0, \tau)$. Ця температура визначається на границі між рідким паливом і його паром, що перебуває у зазорах зернистого середовища.

Ширини перехідних областей оцінюються співвідношеннями

$$\delta_T = \frac{l}{Nu}, \quad (5.162)$$

$$\delta_D = \frac{l}{Nu_D}, \quad (5.163)$$

де l - характерний просторовий розмір задачі, м. Відзначимо, що у випадку турбулентного режиму течії газового середовища над покриттям $\delta_T = \delta_D$.

При оцінці спрямованого на запобігання загоряння рідини дії зернистого шару необхідно враховувати дві необхідних умови загоряння. У випадку вільної поверхні рідини (відсутності захисту) вони такі: 1) концентрація пари горючої рідини в зоні загоряння повинна перевищувати нижню концентраційну межу запалення $\phi_{1.LICL}$; 2) температура рідини повинна перевищувати температуру її запалення T_{1i} , К.

Перша умова забезпечує запалення пароповітряної суміші. Її вид при наявності зернистого шару не міняється – необхідно перевищення концентрації пари пального на поверхні над $\phi_{1.LICL}$, що описується формулою

$$\phi_1(h) = \frac{p_{1h}}{R \cdot T_h} \geq \phi_{1.LICL}, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (5.164)$$

у якій тиск пари p_{1h} задається співвідношенням (5.147).

Відзначимо, що умову (5.164) (використовуючи формулу (5.147)) можна представити, як обмеження на товщину шару

$$h \leq h_{1.cr} \equiv \delta_D \cdot \frac{\left(\frac{T}{D}\right)_a}{\left(\frac{T}{D}\right)_g} \cdot \frac{\ln\left(\frac{p - p_{1.LICL}}{p - p_{1s}}\right)}{\ln\left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1.LICL}}\right)} \approx \delta_D \cdot \frac{\left(\frac{T}{D}\right)_a}{\left(\frac{T}{D}\right)_g} \cdot \frac{p_{1s} - p_{1.LICL}}{p_{1.LICL} - p_{1a}}, \quad (5.165)$$

де $p_{1.LICL} = \phi_{1.LICL} \cdot R \cdot T_h$, а приблизна рівність реалізується, якщо $p \gg p_{1s} > p_a$.

Виконання другого (температурної) умови загоряння уможливорює підтримку виниклого горіння за рахунок припливу пари пального від рідини в зону горіння. Фактично ця умова на мінімальну величину питомого молярного потоку горючих газів $j_{1\mu.cr}$, що дозволяє горінню не загасати. Шар гранульованого матеріалу істотно утрудняє як перенос пари убік зони горіння, так і підтримуючий випар зустрічний перенос тепла до поверхні рідини. Ця обставина повинна приводити до помітного росту температури запалення рідини з ростом товщини захисного шару h . Величину $j_{1\mu.cr}$ в рамках викладеної моделі одержати неможливо, тому що вона пов'язана із процесом загоряння, що проходить за часи $\tau_i \ll \tau_{T.gr}$, які не описуються даною моделлю в силу її квазістатичного характеру.

Якщо знати величину $j_{1\mu.cr}$ (наприклад, з експериментів), то в рамках розглянутої моделі можна оцінити величину температури запалення T_{1i} , К. Вона буде коренем рівняння $j_{1\mu} = j_{1\mu.cr}$, що відповідно до формули (5.143) має вигляд:

$$j_{1\mu.cr} = \frac{p}{R} \cdot \frac{1}{h \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{gr} + \delta_D \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_a} \cdot \ln \left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1s}(T_{1i})} \right). \quad (5.166)$$

Зі співвідношення (5.166) витікає, що

$$T_{1i} = T_{1s} [p - (p - p_{1.LICL}) \cdot \exp(-k_{1i})], \quad (5.167)$$

де

$$k_{1i}(h) = j_{1\mu.cr} \cdot \frac{R}{p} \cdot \left(h \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_{gr} + \delta_D \cdot \left(\frac{T}{D}\right)_a \right),$$

а $T_{1s}[p_1]$, К – абсолютна температура насиченої пари пального при її

парціальному тиску p_1 .

Запалення неможливо, якщо або не виконується умова (5.164), або $T(0, \tau) < T_{li}$.

На закінчення приведемо чисельну оцінку параметрів $K_{gr,a}$ (5.145) і $\tau_{D,gr}$ (5.120). У якості речовини, що дифундує, візьмемо октан, який є основним компонентом бензину. Оцінка буде відповідати температурі 20°C. Крім того покажемо чисельну залежність $h_{1cr}(T)$ (5.165) для октану у випадку ізотермічної дифузії.

Коефіцієнт дифузії пари октану у повітрі будемо визначати, використовуючи емпіричне співвідношення

$$D_a = D_{a,0} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^2, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (5.168)$$

де $T_0 = 273 \text{ К}$; $D_{a,0}$ - значення коефіцієнта дифузії при температурі T_0 . У випадку октану довідкове значення $D_{a,0} = 5,5 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, у результаті при температурі 20 °C одержуємо $D_a = 6,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Для оцінки D_{gr} скористаємося співвідношенням (5.121), прийнявши в ньому $\left(\frac{h}{l_m} \right)^2 = 0,5$ і $r_V = 0,25$. У результаті одержимо $D_{gr} \approx 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Така величина D_{gr} згідно (5.120) дає характерний час виходу на стаціонарний режим масопереносу

$$\tau_{D,gr} = 1,25 \cdot 10^2 \cdot h^2, \text{ с} \quad (5.169)$$

(у формулі (5.169) товщина шару h береться в сантиметрах).

За такі часи величина коефіцієнта зменшення потоку шаром гранул прийме значення

$$K_{gr.a} \geq K_{gr.a.min} = 1 + 8 \cdot \frac{h}{\delta_D} = 1 + 8 \cdot Nu_D \cdot \frac{h}{l}. \quad (5.170)$$

Зі співвідношення (5.170) витікає, що при мінімальних значеннях $Nu_D \sim 1$ і характерних розмірах поверхонь $l \sim 1$ м послаблююча дія шару гранул у стаціонарному режимі стає помітною при товщині $h \sim 0,1$ м.

Перейдемо до побудови чисельної залежності критичного значення товщини захисного шару гранул, щодо можливості спалаху, $h_{1cr}(T)$ (5.165) для октану у випадку ізотермічної дифузії.

У ізотермічному випадку загальне співвідношення (5.165) спрощується до

$$h_{1.cr}(T) = \frac{l}{Nu_D} \cdot \frac{D_{gr}}{D_a} \cdot \frac{\ln\left(\frac{p - p_{1.LICL}}{p - p_{1s}(T)}\right)}{\ln\left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1.LICL}}\right)}, \quad (5.171)$$

що у межі $p \gg p_{1s} > p_a$ дає залежність

$$h_{1.cr.simple}(T) = \frac{l}{Nu_D} \cdot \frac{D_{gr}}{D_a} \cdot \frac{p_{1s}(T) - p_{1.LICL}}{p_{1.LICL} - p_{1a}}, \quad (5.172)$$

Тиск насиченої пари будемо визначати за емпіричною формулою Антуана:

$$p_s(t) = 10^{A_A - \frac{B_A}{t + C_A}}, \text{ кПа}, \quad (5.173)$$

де A_A , B_A , C_A – константи Антуана (свої для кожної рідини), а t – температура по шкалі Цельсія. У випадку октану константи рівняння (5.173) приймають значення $A_A = 6,09396$, $B_A = 1379,556$, $C_A = 211,896$, а само рівняння діє в інтервалі температур $-14 < t < 125,52^\circ\text{C}$.

Значення $p_{1.LICL} = r_{1.LICL} \cdot p$, де $r_{1.LICL}$ – об’ємна частка пального газу у повітрі на нижній концентраційній межі запалення. У випадку октану $r_{1.LICL} = 0,9\%$. Для парціального тиску пари пального у зовнішньому середовищі приймемо значення $p_{1a} = 0$, яке реалізує максимально можливу (по даному параметру) величину $h_{1cr}(T)$.

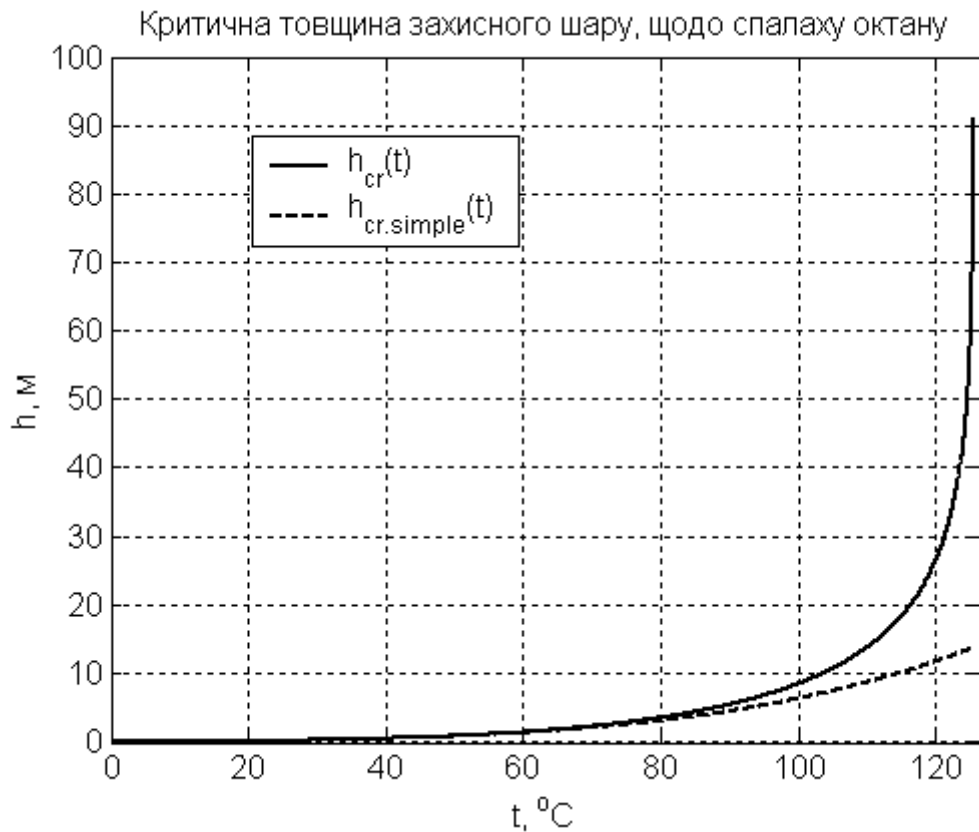


Рис. 5.12 Графіки критичної (щодо спалаху октану) товщини захисного шару, як функції температури, у випадках загальної та спрощеної залежності

На рис. 5.12 зображено графіки залежності критичного (щодо спалаху октану) значення величини товщини захисного шару гранульованого покриття від температури. Загальний тиск має величину $p = 1,01325 \cdot 10^5$ Па. Лінія $h_{1cr}(T)$

побудована за формулою (5.171), $h_{1cr, simple}(T)$ - за спрощеною формулою (5.172). Як і у попередніх оцінках прийнято, що $Nu_D = 1$, $l = 1$ м, відношення коефіцієнтів дифузії $D_{gr} / D_a = 0,125$.

Порівняння графіків рис. 5.12 показує у випадку октану помітне розходження критичної товщини захисного шару, розрахованої за загальною і спрощеною формулою, починаючи із температури 80°C . Критичні значення товщини захисного шару становлять $h_{1cr}(20^\circ\text{C}) = 0,067$ м, $h_{1cr}(50^\circ\text{C}) = 0,822$ м, $h_{1cr}(100^\circ\text{C}) = 8,46$ м, $h_{1cr}(125^\circ\text{C}) = 57,7$ м. Із них витікає, що подавити спалах пари октану введенням гранульованого покриття при температурах понад 50°C практично нереально.

5.2.3 Математичне моделювання переносу пари горючої рідини крізь двошарове покриття, що складається із шару гранульованого матеріалу і шару гелю

Як ми вже відзначали, варіантом ізоляції горючої рідини може бути гелеутворюючий склад, нанесений на її поверхню. Ізольовані властивості такого одиночного покриття в стаціонарній ситуації теоретично досліджені в роботі [46]. Також проводилися експериментальні дослідження цього процесу [48].

Гель ефективно ізолює пару. Однак існує проблема. Зазвичай гель важче рідини. У зв'язку із цим для забезпечення плавучості шару гелю у горючих рідинах було запропоновано використати легкий негорючий носій - гранульоване піноскло [220]. Досвіди показали, що бінарний шар піноскло-гель залишається стабільним на поверхні бензину протягом декількох діб.

Ізольована дія покриття, яке має тільки шар гранульованого (зернистого) середовища досліджено у роботі [52] і викладено у попередньому пункті. Задачею, розглянутою у даному пункті, є побудова математичної моделі процесу переносу пари рідини крізь двошарову систему, що складається з виступаючого над поверхнею рідини шару зернистого матеріалу і лежачого на ньому шару гелю. Буде отримана система рівнянь, яка описує цей процес у

квазістаціонарному режимі щодо газових фаз і нестационарному режимі щодо плівки гелю. Буде знайдене стаціонарне рішення цієї задачі, на основі якого отримані чисельні оцінки параметрів безпеки.

Відзначимо, що рішення описаної задачі у від самого початку стаціонарному варіанті викладено в роботі [50].

Схема аналізованої ситуації зображена на рис. 5.13.

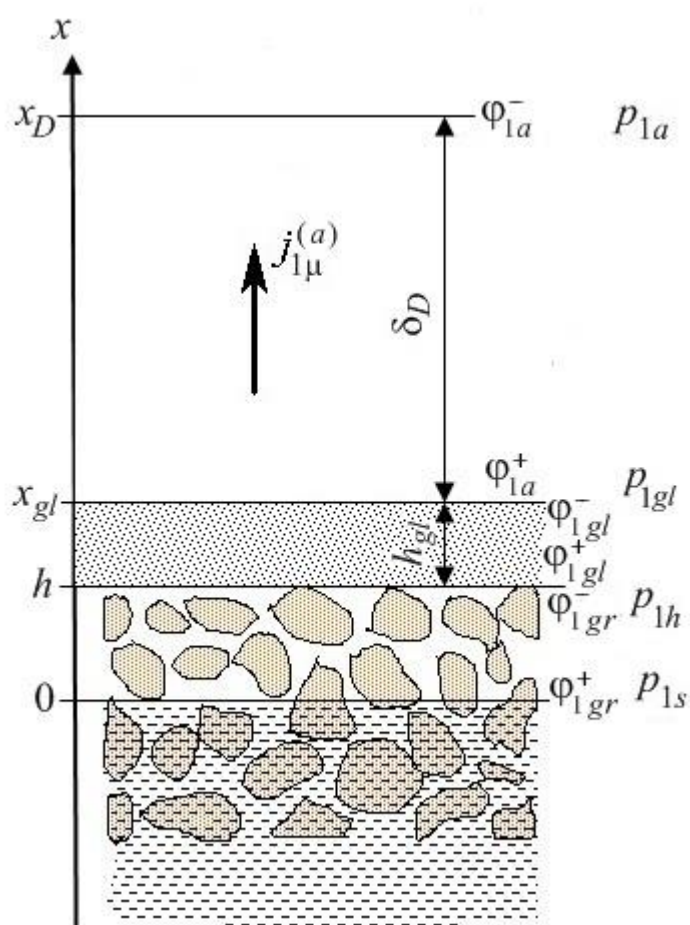


Рис. 5.13 Просторова схема задачі переносу пари пального через шар гранульованого матеріалу і гелю

Заштрихована область ($x < 0$) відповідає горючій рідині, у якій плаває шар гранул піноскла товщиною h_{gr} . Не занурена в рідину частина шару піноскла має товщину h . Шар гранул відділений від зовнішнього (повітряного) середовища шаром гелю товщиною h_{gl} . Він розташований у області

$h < x < x_{gl} = h + h_{gl}$. Над гелієвим шаром розташований перехідний шар товщиною δ_D , у межах якого концентрація пари пального ϕ_1 (моль·м⁻³) змінюється від свого значення у поверхні гелю ϕ_{1a}^+ до значень у зовнішньому просторі ϕ_{1a}^- . На схемі індекси при концентрації відповідають розташуванню у просторі: «a» - повітряний простір, «gl» - гелієвий шар, «gr» - порожнечі гранульованого шару; індекси «+» і «-» відображають розташування у нижній і верхній частині відповідного шару. $p_{1h} = p_1(h, \tau)$, $p_{1s} = p_1(0, \tau)$, $p_{1a} = p_1(x_D, \tau)$, $p_{1gl} = p_1(x_{gl}, \tau)$ – парціальні тиски пари пального на границях відповідних шарів, а $p_1(x, \tau)$ – парціальні тиски пари пального у точці з просторовою координатою x у момент часу τ .

Відразу відзначимо, що із закону Архімеда витікає, що висота h однозначно пов'язана з товщинами шарів гелю h_{gl} і гранульованого матеріалу h_{gr} , співвідношенням

$$h = h_{gr} \cdot \left(1 - \frac{\rho_{gr}}{\rho_f} \right) - h_{gl} \cdot \frac{\rho_{gl}}{(1 - r_V) \cdot \rho_f},$$

де ρ_{gr} , ρ_{gl} і ρ_f – густини матеріалу гранул, гелю і рідкого пального, відповідно, кг·м⁻³; r_V – об'ємна частка порожнеч у гранульованому (зернистому) матеріалі.

У досліджуваній ізотермічній системі існує три характерних часи, два із яких були обговорені у пункті 5.2.2. Це вже розглянуті характерний час дифузії пари крізь зернистий шар $\tau_{D.gr}$ (5.120) та час установалення процесу масопереносу у перехідному концентраційному шарі над поверхнею покриття (у даному випадку поверхнею гелю) – τ_a . У більшості випадків $\tau_a \leq \tau_{D.gr}$.

Третім новим характерним часом є характерний час установалення процесу масопереносу у шарі гелю – $\tau_{D.gl}$. Процес масопереносу у плівці гелю має дифузійну природу, через що оцінка величини цього часу має вигляд

$$\tau_{D,gl} = \frac{h_{gl}^2}{D_{gl}}, \text{ с}, \quad (5.174)$$

де D_{gl} - коефіцієнт дифузії молекул пального у гелієвому середовищі, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Як буде показано у подальшому, $D_{gl} \ll D_{gr}$, причому на декілька порядків.

Як і у пункті 5.2.2, масоперенос пари пального у газових фазах (тобто у порожнинах гранульованого шару і у повітряному середовищі над гелієвою плівкою) будемо розглядати у квазістаціонарному наближенні. Для цього проведемо усереднення опису по інтервалах часу $\Delta\tau$, де $\tau_{D,gr} \leq \Delta\tau$ (дивись (5.124)). В результаті у кожен момент масоперенос у газових фазах можна розглядати як стаціонарний процес з повільно мінливими концентраціями (парціальними тисками) на границях із гелієвою плівкою. Це означає, що молярні питомі потоки пального у межах газових фаз незмінні у просторі і можуть бути визначені за співвідношенням (5.137), яке додатково спрощується у зв'язку з ізотермічністю процесу.

Щільності мольного потоку пари пального крізь порожнечі гранульованого матеріалу ($j_{1\mu}^{(gr)}$) і від плівки гелю у зовнішній простір ($j_{1\mu}^{(a)}$) відповідають рівнянню (5.137), яке приймає вигляд:

$$j_{1\mu}^{(gr)} = \frac{D_{gr}}{h} \cdot \frac{p^{(gr)}}{R \cdot T} \cdot \ln \left(\frac{p^{(gr)} - p_{1h}}{p^{(gr)} - p_{1s}} \right), \quad 0 \leq x \leq h, \quad (5.175)$$

$$j_{1\mu}^{(a)} = \frac{D_a}{\delta_D} \cdot \frac{p}{R \cdot T} \cdot \ln \left(\frac{p - p_{1a}}{p - p_{1gl}} \right), \quad x_{gl} \leq x \leq x_D, \quad (5.176)$$

де щільності молярного потоку пари пального $j_{1\mu}^{(gr)}$ і $j_{1\mu}^{(a)}$ беруться у розрахунку на одиницю загальної площі перерізу шару, $\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; p_{1h} , p_{1s} , p_{1a} , p_{1gl} – парціальні тиски пари пального на границях відповідних шарів, P_a (дивись

рис. 5.13); p - незмінний загальний тиск газу у зовнішньому середовищі, Па. Зразу відмітимо, що парціальний тиск пари пального на її границі з рідиною $p_1(0, \tau)$ співпадає із тиском насиченої пари, яка є однозначною відомою функцією $p_{1s}(T)$ її температури T , К.

Величини парціальних тисків пов'язані із концентрацією пари пального рівнянням стану ідеального газу, у зв'язку з чим

$$p_{1a} = \varphi_{1a}^- \cdot R \cdot T, \quad (5.177)$$

$$p_{1gl} = \varphi_{1a}^+ \cdot R \cdot T, \quad (5.178)$$

$$p_{1h} = \varphi_{1gr}^- \cdot R \cdot T, \quad (5.179)$$

$$p_{1s} = \varphi_{1gr}^+ \cdot R \cdot T, \quad (5.180)$$

де φ_{1a}^- , φ_{1a}^+ , φ_{1gr}^- , φ_{1gr}^+ - концентрації пари пального на границях відповідних шарів, моль·м⁻³ (дивись рис. 5.13).

Величина $p^{(gr)}$ - незмінний у просторі загальний тиск газового середовища у порожнинах гранульованого шару, Па. Він зв'язаний із концентрацією пального $\varphi_1(x, \tau)$ і повітря $\varphi_2(x, \tau)$ співвідношенням

$$p^{(gr)}(\tau) = R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h [\varphi_1(x, \tau) + \varphi_2(x, \tau)] \cdot dx \quad (5.181)$$

Інтеграл (5.181) можна представити у вигляді трьох інтегралів

$$\begin{aligned}
p^{(gr)}(\tau) = & R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h [\varphi_1(x, \tau) - \varphi_1(x, 0)] \cdot dx + \\
& + R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h [\varphi_2(x, \tau) - \varphi_2(x, 0)] \cdot dx \\
& + R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h [\varphi_1(x, 0) + \varphi_2(x, 0)] \cdot dx.
\end{aligned} \tag{5.182}$$

Другий інтеграл формули (5.182) пропорційний зміні з часом кількості повітря у порожнинах гранульованого шару. Оскільки плівка гелю ізолює гранульований шар, другий доданок практично дорівнює нулю.

Третій інтеграл формули (5.182) співпадає з $p^{(gr)}(0)$ і тому він дорівнює загальному зовнішньому тиску p . Таким чином

$$p^{(gr)}(\tau) = R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h [\varphi_1(x, \tau) - \varphi_1(x, 0)] \cdot dx + p. \tag{5.183}$$

Інтеграл формули (5.183) пропорційний зміні з часом кількості пари пального у порожнинах гранульованого шару. Остання зростає, через те, що в той час як з поверхні рідини йде випаровування у порожнини гранул, ухід пари пального із цієї області крізь шар гелю нехтовно малий. Якщо в початковий момент часу пари пального у порожнинах було нехтовно мало, то формула (5.183) спрощується до

$$p^{(gr)}(\tau) = R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h \varphi_1(x, \tau) \cdot dx + p = \bar{p}_1(\tau) + p, \tag{5.184}$$

де $\bar{p}_1(\tau)$ - середнє по порожнинах гранульованого шару значення парціального тиску пари пального.

Через малий відтік пари пального з гранульованого шару середнє значення концентрації пари буде наближатись до рівноважної із рідиною, тоді тиск $p^{(gr)}(\tau)$ буде наближатись до свого максимально можливого значення

$$p_{\max}^{\{gr\}} = \max[p^{(gr)}(\tau)] = p_{1s} + p. \quad (5.185)$$

Наявність надлишкового тиску газового середовища у порожнинах гранульованого шару над атмосферним тиском p , накладає вимогу на товщину шару гелю.

$$\rho_{gl} \cdot g \cdot h_{gl} \geq R \cdot T \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h [\varphi_1(x, \tau) - \varphi_1(x, 0)] \cdot dx. \quad (5.186)$$

де g - прискорення вільного падіння, $\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$. Згідно із співвідношенням (5.185) вимога (5.186) безумовно виконується, якщо

$$h_{gl} \geq h_s \equiv \frac{p_s}{g \cdot \rho_{gl}}. \quad (5.187)$$

У разі невиконання вимоги (5.186) пари пального будуть зносити шар гелю і ніяка ізоляція не відбудеться.

Скориставшись співвідношеннями (5.177)-(5.180) для виключення тисків p_1 , можна привести формули (5.175), (5.176), до більш відомого вигляду. Для цього додатково треба врахувати те, що у квазістаціонарному режимі різниця тисків по різні боки шарів газової фази значно менша за величини тисків. Ця обставина дозволяє, розклавши логарифми по малим параметрам $[(p_{1s} - p_{1h})/(p^{(gr)} - p_{1s})]$ у формулі (5.175) та $[p_{1a}/p]$ і $[p_{1gl}/p]$ у формулі (5.176), замість формул (5.175) і (5.176) отримати співвідношення

$$j_{1\mu}^{(gr)} = \frac{D_{gr}}{h} \cdot \frac{p^{(gr)}}{p^{(gr)} - p_{1s}} \cdot (\varphi_{1gr}^+ - \varphi_{1gr}^-), \quad 0 \leq x \leq h, \quad (5.188)$$

$$j_{1\mu}^{(a)} = \frac{D_a}{\delta_D} \cdot (\varphi_{1a}^+ - \varphi_{1a}^-), \quad x_{gl} \leq x \leq x_D. \quad (5.189)$$

Відмітимо дві обставини, що стосуються складових формули (5.188). По перше, $\varphi_{1gr}^+ = \varphi_{1s}$, де $\varphi_{1s}(T)$ - концентрація насиченої пари пального при температурі T . По друге, у поширеному випадку, коли $p_{1s} \ll p^{(gr)}$, тобто коли навіть насичена пара пального складає малу частку пароповітряної суміші, формула (5.188) набуває більш відомий вигляд

$$j_{1\mu}^{(gr)} = \frac{D_g}{h} \cdot (\varphi_{1gr}^+ - \varphi_{1gr}^-), \quad 0 \leq x \leq h. \quad (5.190)$$

Стосовно співвідношення (5.189) відмітимо наступне. Воно стосується явища масовіддачі пари пального від поверхні гелю у повітря, яке (явище) зазвичай описується формулою

$$j_{1\mu}^{(a)} = \beta \cdot (\varphi_{1a}^+ - \varphi_{1a}^-), \quad x_{gl} \leq x \leq x_D, \quad (5.191)$$

де β – коефіцієнт масовіддачі цього процесу, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Коефіцієнт β , як зокрема витікає із порівняння формул (5.189) і (5.191), пов'язаний із шириною перехідної області δ_D співвідношенням [229]

$$\beta = \frac{D_a}{\delta_D}, \quad (5.192)$$

де ширина перехідної області, як це вже відмічалось раніше (наприклад у пункті 5.1.1), оцінюється співвідношенням (5.163) із пункту 5.2.2:

$$\delta_D = \frac{l}{\text{Nu}_D}. \quad (5.193)$$

Після усереднення опису по інтервалах часу $\Delta\tau$, де $\tau_{D,gr} \leq \Delta\tau$, масоперенос у шарі гелю у загальному випадку (через те, що як правило $\Delta\tau < \tau_{D,gl}$, дивись (5.174)) не набуде стаціонарного характеру. В результаті, внаслідок того, що молярний питомий потік молекул пального у гелі задовольняє рівнянню Фіка, тобто щільність цього потоку дорівнює

$$j_{1\mu}^{(gl)}(x, \tau) = -D_{gl} \cdot \frac{\partial \varphi_1(x, \tau)}{\partial x}, \quad h \leq x \leq x_{gl}, \quad (5.194)$$

поле концентрації пального у гелі $\varphi_1(x, \tau)$ задовольняє рівнянню нестационарної дифузії, яке у ізотермічному випадку (через незалежність D_{gl} від просторової координати) має вигляд:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial \tau} = D_{gl} \cdot \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2}, \quad h \leq x \leq x_{gl}. \quad (5.195)$$

Граничними умовами до рівняння (5.195) є неперервність молярного потоку пального $J_{1\mu}$, моль·с⁻¹, через границі і узгодженість значень концентрації пального (умова рівноваги фаз) на границі шару гелю із зовнішніми об'єктами.

Через те, що в даному описі щільність молярного потоку $j_{1\mu}$ в усіх середовищах визначається у розрахунку на одиницю площі загального перерізу,

неперервність потоку $J_{1\mu}$ означає неперервності щільності потоку $j_{1\mu}$. Таким чином граничні умови до рівняння (5.195), щодо потоку компонента мають вигляд:

$$-D_{gl} \cdot \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=h+0} = j_{1\mu}^{(gr)}, \quad \text{при } x = h, \quad (5.196)$$

$$-D_{gl} \cdot \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} \Big|_{x=x_{gl}-0} = j_{1\mu}^{(a)}, \quad \text{при } x = x_{gl}. \quad (5.197)$$

На границі порожнеч гранульованого матеріалу з гелієвим шаром виконується умова рівноваги фаз, у зв'язку із чим концентрації пального на цій границі зв'язані співвідношенням

$$\varphi_1(h+0, \tau) = \frac{\varphi_{1gr}^-}{k_1}, \quad \text{при } x = h, \quad (5.198)$$

де k_1 – коефіцієнт розподілу.

Аналогічна умова рівноваги фаз зв'язує між собою концентрації пари пального на границі гелю з повітрям:

$$\varphi_1(x_{gl}-0, \tau) = \frac{\varphi_{1a}^+}{k_2}, \quad \text{при } x = x_{gl}, \quad (5.199)$$

де k_2 – значення коефіцієнта розподілу на даній границі. Відмітимо, що коефіцієнт розподілу є функцією температури, що у зв'язку із ізотермічним характером процесу приводить до співвідношення $k_1 = k_2 = k$.

Підведемо проміжний підсумок. У квазістаціонарному ізотермічному наближенні потік пари пального у газових фазах (у гранульованому середовищі

і у зовнішньому повітряному шарі) визначається алгебраїчними співвідношеннями (5.175), (5.176) (або їх спрощеними алгебраїчними варіантами (5.188), (5.189), або (5.190), (5.189), при цьому рівняння (5.189) можна записати у вигляді (5.191)). Процес масопереносу у гелієвому шарі описується рівнянням у частинних похідних (5.195) із граничними умовами (5.196)-(5.199).

Якщо, скориставшись граничними умовами (5.198), (5.199), виключити із розгляду концентрації ϕ_{1gr}^- , ϕ_{1a}^+ , то стане очевидно, що в цілому задача звелась до рішення рівняння параболічного типу (рівняння нестационарної дифузії (5.195)) у плоскому шарі зі стаціонарними граничними умовами 3-го роду на обох його поверхнях. Основне ускладнення полягає у тому, що параметри у граничних умовах по різні боки шару відрізняються одне від одного.

Відзначимо, що завжди $j_{1\mu}^{(gr)} \geq j_{1\mu}^{(gl)} \geq j_{1\mu}^{(a)}$ і рівність ($j_{1\mu}^{(gr)} = j_{1\mu}^{(gl)} = j_{1\mu}^{(a)}$) досягається тільки при повному виході процесу масопереносу на стаціонарний режим. Цей вихід відбувається за час τ , що значно перевищує не тільки часи τ_a і $\tau_{D.gr}$, але і час $\tau_{D.gl}$ (5.174). Саме у стаціонарному режимі питомий потік пари пального у зовнішній простір ($j_{1\mu}^{(a)}$), як і концентрація пального у зовнішньому просторі (ϕ_{1a}^+), досягають свого максимально значення, тобто стаціонарний режим відповідає найгіршій ситуації щодо ізоляції пального. Остання обставина робить доцільним отримання стаціонарного рішення даної задачі для розгляду питань пожежної безпеки.

Стаціонарний режим масопереносу крізь шар гелю реалізується при часах $\tau \gg \tau_{D.gl}$. У цьому випадку рішення рівняння (5.192) щодо $j_{1\mu}^{(gl)}$ має вигляд:

$$j_{1\mu.st} \equiv j_{1\mu}^{(gl)} = \frac{D_{gl}}{h_{gl}} \cdot (\phi_{1gl}^+ - \phi_{1gl}^-), \quad h \leq x \leq x_{gl}, \quad (5.200)$$

де $\varphi_{1gl}^+ = \varphi_1(h+0, \tau)$, $\varphi_{1gl}^- = \varphi_1(x_{gl}-0, \tau)$ - значення концентрації пального у відповідних граничних поверхнях (дивись рис. 5.13). Граничні умови (5.196)-(5.199) набувають вигляд

$$j_{1\mu.st} = j_{1\mu}^{(gr)}, \quad \text{при } x = h, \quad (5.201)$$

$$j_{1\mu.st} = j_{1\mu}^{(a)}, \quad \text{при } x = x_{gl}. \quad (5.202)$$

$$\varphi_{1gl}^+ = \frac{\varphi_{1gr}^-}{k_1}, \quad \text{при } x = h, \quad (5.203)$$

$$\varphi_{1gl}^- = \frac{\varphi_{1a}^+}{k_2}, \quad \text{при } x = x_{gl}. \quad (5.204)$$

Сумісний розгляд рівнянь (5.190), (5.191), (5.200)-(5.204) дозволяє виразити загальний питомий стаціонарний молярний потік через концентрацію пари пального на зовнішніх границях системи:

$$j_{1\mu.st}(h_{gl}, h) = \frac{\beta \cdot (\varphi_{1s} - \varphi_{1a}^-)}{1 + \beta \cdot k \cdot \frac{h_{gl}}{D_{gl}} + \beta \cdot \frac{h}{D_g}}, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.205)$$

Співвідношенню (5.205), з огляду на формулу (5.192), можна надати форму

$$j_{1\mu.st}(h_{gl}, h) = \frac{j_{1\mu.st}(0,0)}{1 + k \cdot \frac{h_{gl}}{\delta_D} \cdot \frac{D_a}{D_{gl}} + \frac{h}{\delta_D} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}} = \frac{j_{1\mu.0}}{K_{gr.gl.a}}, \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.206)$$

де символом

$$j_{1\mu.0} = \beta \cdot (\varphi_{1s} - \varphi_{1a}^-), \text{ моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}. \quad (5.207)$$

позначено щільність потоку пального, що випаровується у повітряний простір з вільної поверхні рідкого палива, а безрозмірний параметр $K_{gr.gl.a}$ задається співвідношенням:

$$K_{gr.gl.a} = 1 + k \cdot \frac{h_{gl}}{\delta_D} \cdot \frac{D_a}{D_{gl}} + \frac{h}{\delta_D} \cdot \frac{D_a}{D_{gr}}. \quad (5.208)$$

Використовуючи співвідношення (5.191), (5.202) і (5.205), можна визначити концентрацію пари пального безпосередньо над поверхнею шару гелю

$$\varphi_{1a}^+ = \frac{\varphi_{1s} + (K_{gr.gl.a} - 1) \cdot \varphi_{1a}^-}{K_{gr.gl.a}} \approx \frac{\varphi_{1s}}{K_{gr.gl.a}}. \quad (5.209)$$

З формул (5.206) і (5.209) витікає, що нанесення шарів гранульованого матеріалу і гелю на поверхню горючої рідини у $K_{g.gl.a}$ разів зменшує і стаціонарний потік пари пального, і його концентрацію на вході в повітряний простір.

Приведемо чисельну оцінку параметрів $K_{gr.gl.a}$ і $\tau_{D,gl}$, у ході якої скористаємося тим, що властивості гелю, що цікавлять нас, мало відрізняються від відповідних властивостей води [254]. В якості речовини, що дифундує, візьмемо основний компонент бензину - октан. Оцінка буде відповідати температурі 20°C.

Значення коефіцієнта розподілу $k = k_2 \approx k_1$, можна одержати на підставі формули (5.204), беручи для концентрації φ_{1a}^+ максимально можливе значення φ_{1s} . При цьому для оцінки величини концентрації пального у воді φ_{1gl}^- використаємо довідникове значення коефіцієнта розчинності октану у воді k_m [255], а для оцінки концентрації насиченої пари пального φ_{1s} — емпіричну формулу Антуана (5.173). Згідно із останньою формулою при температурі

$t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ тиск насиченої пари $p_{1s} = 1,40\text{ кПа}$. Даному тиску у випадку ідеального газу відповідає концентрація

$$\varphi_{1s} = \frac{p_{1s}}{R \cdot T} = 0,57\text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (5.210)$$

де T - абсолютна температура пари, К.

У випадку октану $k_m = 1,5 \cdot 10^{-5}$ грам октану на грам води. Даній розчинності відповідає концентрація октану у воді

$$\varphi_{1gl}^- = \frac{k_m \cdot \rho_w}{\mu_1} = 0,13\text{ моль} \cdot \text{м}^{-3}. \quad (5.211)$$

В оцінці (5.211) використане низьке значення розчинності ($k_m \ll 1$); узяті значення густини води $\rho_w = 1000\text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ і молярної маси октану $\mu_1 = 114 \cdot 10^{-3}\text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Використовуючи результати (5.210), (5.211), одержуємо оцінку коефіцієнта розподілу октану при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$k = \frac{\varphi_{1s}}{\varphi_{1gl}^-} = 4,4, \quad (5.212)$$

Коефіцієнт дифузії D_{gl} будемо оцінювати по формулі коефіцієнта дифузії броунівської частки (молекули октану) у рідині (воді):

$$D_{gl} = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot v_w \cdot r_o}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \quad (5.213)$$

де $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – стала Больцмана; ν_w – коефіцієнт кінематичної в'язкості води, м²·с⁻¹; r_o – ефективний радіус частки, що дифундує, м. Скориставшись тим, що при температурі 20°C довідникове значення $\nu_w = 1,005 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹, а оціночне значення $r_o = 3,8 \cdot 10^{-10}$ м, із виразу (5.213) отримаємо $D_{gl} = 5,6 \cdot 10^{-10}$ м²·с⁻¹.

Маючи чисельне значення D_{gl} можна надати співвідношенню (5.174) (визначення характерного часу дифузії октану у гелієвому шарі) розрахункову форму

$$\tau_{D,gl} = 1,8 \cdot 10^3 \cdot h_{gl}^2, \text{ с}, \quad (5.214)$$

у якій товщина гелієвого шару h береться в міліметрах.

Коефіцієнт дифузії пари октану в повітрі D_a оцінений у попередньому пункті 5.5.2 згідно із співвідношенням (5.168). Там показано, що $D_a \approx 6,3 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹. У цьому ж пункті на основі співвідношення (5.121) зроблена оцінка коефіцієнта дифузії пального у гранульованому середовищі: $D_{gr} \approx 0,8 \cdot 10^{-6}$ м²·с⁻¹.

Підставляючи отримані значення величин k , D_{gl} , D_{gr} , D_a у формулу (5.208), використовуючи (5.193) і (5.121), одержимо оцінку величини мінімального значення коефіцієнта зменшення потоку шарами гранульованого матеріалу і гелю

$$K_{gr,gl,a} = 1 + 5,0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h_{gl}}{\delta_D} + \frac{h}{\delta_D} \cdot \frac{1}{r_V} \cdot \left(\frac{l_m}{h} \right)^2 = 1 + Nu_D \cdot \left(5,0 \cdot 10^4 \cdot \frac{h_{gl}}{l} + 8 \cdot \frac{h}{l} \right), \quad (5.215)$$

де всі довжини беруться у однакових одиницях виміру.

З огляду на те, що мінімальне значення $Nu_D \sim 1$, зі співвідношення (5.215) одержуємо, що при характерних розмірах поверхонь $l \sim 1$ м

послаблююча дія гелієвого шару є ефективною вже при $h_{gl} \sim 0,1$ мм навіть у стаціонарному режимі. Аналогічний ефект послаблення шаром тільки гранульованого середовища відповідає величинам h більшим на 4 порядки.

5.3 Висновки

1. На основі законів тепло- і масообміну побудовано математичну модель теплозахисної дії вологого гелю, у якій процес висихання гелю розглядається з врахуванням масопереносу водяної пари крізь прошарок сухого гелю, що утворюється, яка враховує принципову відмінність висихання гелю від звичайного випаровування води, особливістю якої є зведення моделі у випадку термічно тонкого шару гелю до системи звичайних (а не у частинних похідних) диференціальних рівнянь відносно часу.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Виведено загальне рівняння стаціонарного дифузійного масопереносу крізь зернисте середовище. Отримано просту універсальну оцінку зверху величини коефіцієнта дифузії крізь зернисте середовище, що дозволяє прогнозувати захисні властивості зернистого матеріалу, щодо зменшення небезпечного масопереносу.

6. Вперше 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 квазістаціонарному 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.

7. Вперше побудовано математичну 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, яка у квазістаціонарному 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.

РОЗДІЛ 6

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИБОРУ ПОКРИТТІВ І ЕКРАНІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

У даному розділі будуть надані загальні рекомендації щодо вибору теплозахисних покриттів для запобігання нагрівання поверхонь внаслідок теплового впливу пожежі. Рекомендації стосуватимуться нестационарній ситуації і будуть пов'язані із визначенням межі вогнестійкості, тобто того часу через який у якомусь із місць системи буде досягнутий критичний рівень параметру системи (температури для неживих об'єктів, або питомого теплового потоку, що потрапляє на поверхню живих об'єктів). Також розглядатиметься питання вибору захисного покриття, що забезпечить заданий рівень межі вогнестійкості.

До розгляду беруться поглинаючі, відбиваючі покриття і покриття, що спучуються.

Зразу відмітимо, що чисто відбиваючі покриття для захисту неживих об'єктів менш зручні ніж поглинаючі покриття, бо при однаковій межі вогнестійкості складніші і займають значно більше місця. Одночасно відбиваючі покриття кращі за поглинаючі при захисті живих об'єктів, бо при фіксованій межі вогнестійкості виграють по можливості організації мобільного захисту (мобільний відбиваючий екран, теплозахисний костюм).

Із сказаного витікає, що для пасивного захисту неживих об'єктів зручніше використовувати інертні поглинаючі покриття та покриття, що спучуються. Основним механізмом передачі тепла у обох цих видах покриттів є теплопровідність. Основним параметром, що характеризує швидкість зміни температури при теплопровідності є коефіцієнт температуропровідності, який дорівнює

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1}, \quad (6.1)$$

де λ - коефіцієнти теплопровідності матеріалу покриття, Вт м⁻¹ К⁻¹; c_p - питома масова ізобарні теплоємності матеріалу захисного шару, Дж м⁻³ К⁻¹; ρ - густина матеріалу захисного покриття, кг·м⁻³.

Характерний час, через який відбувається суттєва зміна температури на захисному шарі товщиною h , є

$$\tau_0 = \frac{h^2}{a}, \text{ с.} \quad (6.2)$$

Із оцінки (6.2) витікає, що збільшення межі вогнестійкості (остання має порядок τ_0) можна досягати або збільшуючи товщину захисного шару. або зменшуючи коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Звернемо увагу на наступну обставину. Згідно із формулою (6.1) мінімальне значення коефіцієнта a можна досягти на матеріалах із малими коефіцієнтами теплопровідності λ . Як правило, мале значення λ мають пористі матеріали. Однак в них малою разом із λ є і густина матеріалу ρ при практично незмінній величині c_p , тобто приблизно $\lambda \propto \rho$. Виявляється, що із зростанням пористості (наприклад, при спучуванні) коефіцієнт теплопровідності a змінюється несуттєво (на десятки відсотків), в той час як коефіцієнт теплопровідності зменшується у рази. Це означає, що при спучуванні виграш у часі захисної дії досягається в основному внаслідок зростання (у рази) товщини захисного шару h .

Основні області використання вогнезахисних матеріалів із врахуванням їх особливостей показані у таблиці 6.1. [122, 123]

Далі ми перейдемо до рекомендацій щодо визначення межі вогнестійкості (при фіксованій товщині) інертного поглинаючого покриття із заданими властивостями його матеріалу і заданими критичними значеннями температури по різні боки покриття.

Таблиця 6.1

Області застосування засобів пасивного вогнезахисту

Вогнезахисний матеріал	Переваги	Недоліки	Клас вогнестійкості і область застосування
Вогнезахисні цементно-вермикулітові штукатурки	Висока межа вогнестійкості, низька вартість матеріалу, екологічність при експлуатації і відсутність токсичних продуктів горіння, можливість використання на відкритому повітрі	Трудомісткість робіт по нанесенню, складність відновлення та ремонту, низькі декоративні якості, слабка адгезія до поверхонь, понижена вібростійкість	До R240 . Для сталевих конструкцій нескладної конфігурації (колони, балки)
Вогнезахисні плити і листові волокнисті матеріали	Висока межа вогнестійкості і великий термін експлуатації, підвищена вібростійкість за рахунок механічного кріплення до конструкцій, ремонтоздатність, відсутність корозійного впливу на метал, добрі декоративні властивості, екологічність при експлуатації і відсутність токсичних продуктів горіння, точний контроль товщини вогнезахисного шару, сухий спосіб монтажу	Необхідність влаштування систем кріплення, обмежене застосування для вогнезахисту конструкцій складної конфігурації	До R300 . Для сталевих конструкцій нескладної конфігурації (колони, балки)
Склади інтумесцентного типу	Мінімальна товщина і вагове навантаження на конструкцію, технологічність робіт по вогнезахисту, ремонтоздатність, вібростійкість, добрі декоративні властивості	Обмежені умови експлуатації, висока токсичність продуктів горіння	До R90 . Для сталевих конструкцій будь-якої конфігурації

6.1 Захист термічно товстого тіла інертним поглинаючим покриттям

Нагадаємо, що термічно товстим вважається тіло, яке задовольняє вимозі (2.1), в якій в якості часу τ необхідно підставляти максимальне значення межі вогнестійкості.

Будемо аналізувати ситуацію нагріву від гарячого зовнішнього середовища із сталою ефективною температурою. Це задача 3-го роду, рішення якої вимагає знання величин температури гарячого середовища t_f і коефіцієнта тепловіддачі α . Як показано у підрозділі 2.1, відносна надлишкова температура на поверхні захисту (2.37)

$$\theta_* \equiv \frac{t_*(\tau) - t_0}{t_{\max} - t_0},$$

де $t_*(\tau)$ - температура поверхні, є функцією $\theta_* = \theta_*(Fo, Bi, K)$ трьох незалежних

критеріїв: критерію Фур'є $Fo = \frac{a \cdot \tau}{h^2}$ (2.104), критерію Біо $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$ (2.30),

критерію відносної теплової активності $K = \sqrt{\frac{\lambda_* c'_*}{\lambda c'}}$ (2.23).

Явний вид функції $\theta_* = \theta_*(Fo, Bi, K)$ при довільних значеннях параметрів (Fo, Bi, K) невідомий. Відома аналітична залежність $\theta_* = \theta_*(Fo, Bi, 0)$, яка відповідає діє поверхні захисту, як абсолютного теплоізолятора [124]. У зв'язку з цим при $K > 0$ виконується нерівність $\theta_*(Fo, Bi, 0) > \theta_*(Fo, Bi, K)$, тобто оцінки, отримані за відомою залежністю $\theta_* = \theta_*(Fo, Bi, 0)$ дають завищене значення температури (у заданий момент часу), або занижене значення межі вогнестійкості (при заданому рівні температури).

Графік відомої залежності $\theta_* = \theta_*(Fo, Bi, 0)$ наведено на рис. 6.1. На наступному рис. 6.2 наведено графіки відносної надлишкової температури на гарячій поверхні захисного покриття. На обох рисунках кожній кривій лінії відповідає фіксоване значення критерію Bi , вказане на лінії.

Із сказаного витікає, що у разі захисту термічно товстого тіла (виконання вимоги (2.1)) для знаходження верхньої межі температури (нижньої межі вогнестійкості) треба діяти за наступним алгоритмом.

Порядок визначення температур в заданий момент часу τ в заданій точці обов'язково містить три кроки:

- 1) розраховуються параметри $Fo = \frac{a \cdot \tau}{h^2}$ і $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$;

- 2) використовуючи графік відповідної температури (рис. 6.1 для холодної і рис. 6.2 для гарячої поверхні покриття) по Fo і Bi знаходиться відповідна надлишкова температура θ ;

- 3) розраховується шукана температура: $t = t_0 + \theta \cdot (t_{\max} - t_0)$.

Після цього знайдені значення температур бажано порівняти з допустимими (знайдене по рис. 6.1 з допустимим для поверхні, яку захищають, а знайдене по рис. 6.2 з допустимим для матеріалу захисного шару).

Порядок визначення межі вогнестійкості τ по заданому рівню температури $t = t_{cr}$ в заданій точці також обов'язково містить три кроки:

- 1) розраховуються параметри $\theta_{cr} \equiv \frac{t_{cr} - t_0}{t_{\max} - t_0}$ і $Bi = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda}$;

- 2) використовуючи графік відповідної температури (рис. 6.1 для холодної і рис. 6.2 для гарячої поверхні покриття) по θ_{cr} і Bi знаходиться відповідне значення критерію $Fo = Fo_{cr}$;

- 3) розраховується шукана межа вогнестійкості $\tau_{cr} = Fo_{cr} \cdot \frac{h^2}{a}$.

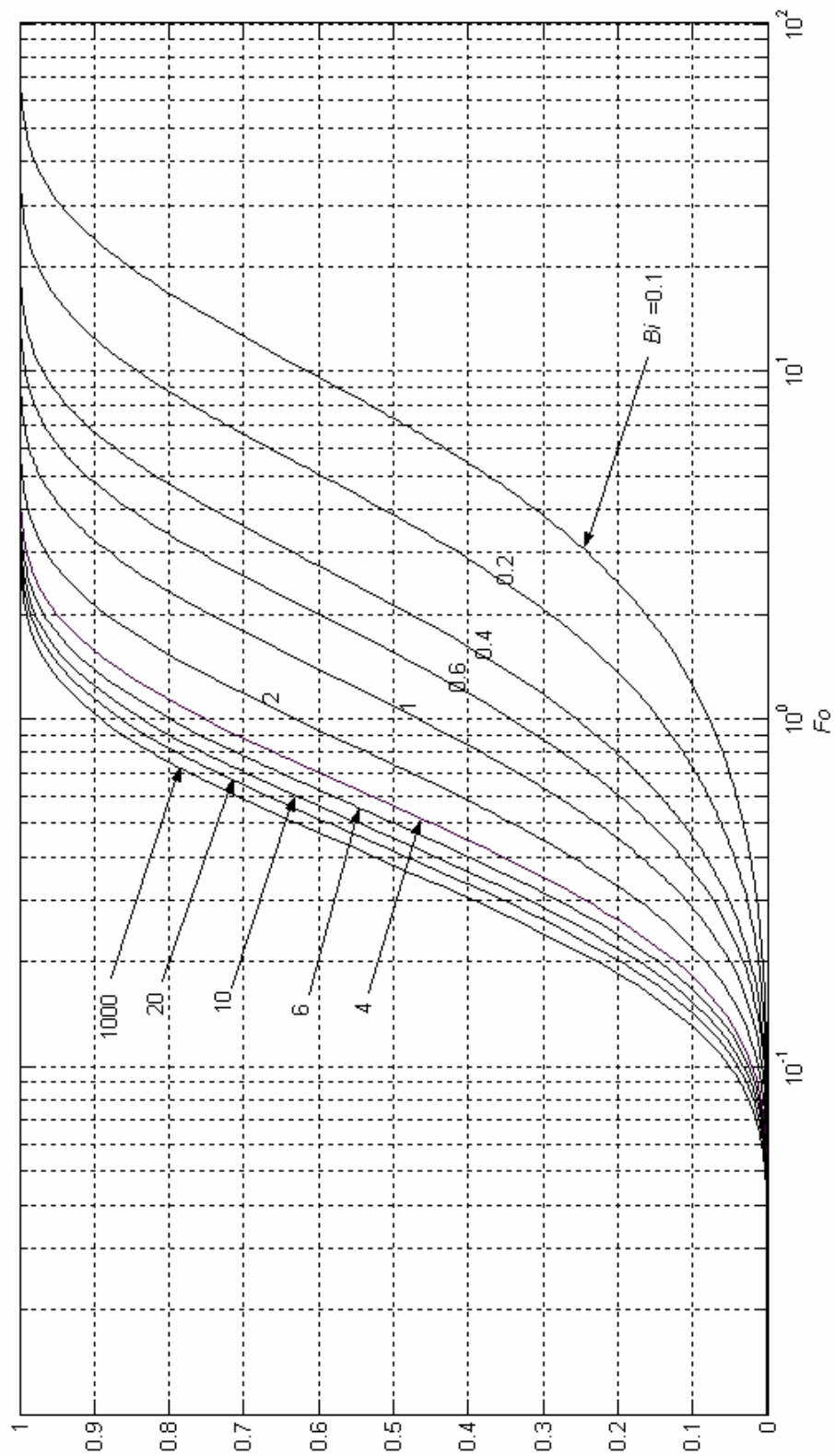


Рис. 6.1 Графіки залежності відносної надлишкової температури поверхні захисту від критерію Фур'є Fo при фіксованих значеннях критерію Біо Bi

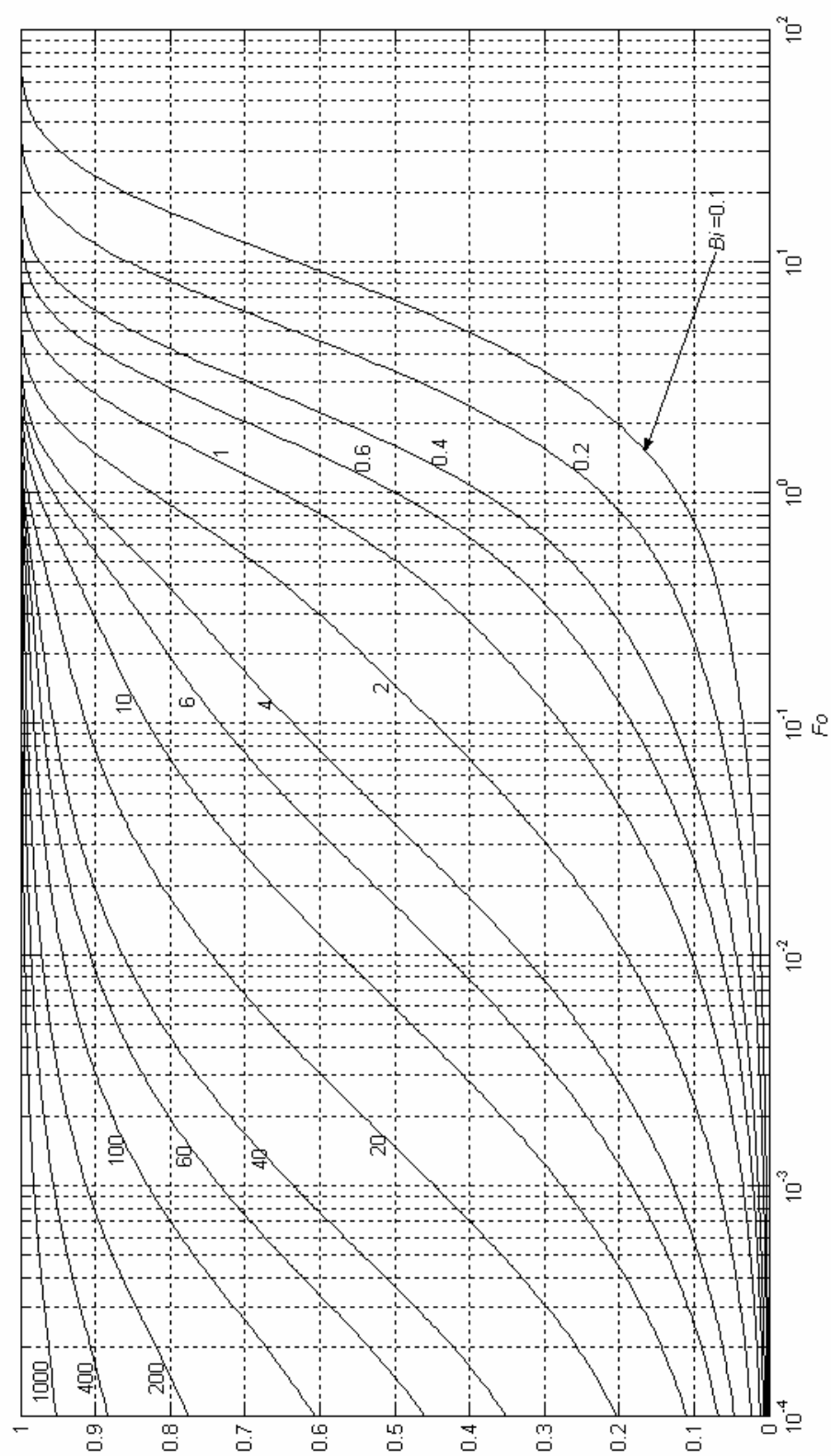


Рис. 6.2 Графіки залежності відносної надлишкової температури гарячої поверхні захисного покриття від критерію Фур'є Fo при фіксованих значеннях критерію Біо Bi

Межові значення температур (або меж вогнестійкості), отримані з використанням графіків рис.6.1, рис.6.2, відрізняються від дійсних з відносною точністю $\sim K = \sqrt{\frac{\lambda_* c'_*}{\lambda c'}}$. Як правило, матеріали ізолятори тепла мають відносно малі значення, як λ , так і c' , у порівнянні із іншими матеріалами, особливо з металами (дивись додаток А). Це означає, що якщо цікавитися точними значеннями температур (або меж вогнестійкості), то треба вміти відтворювати залежність $\theta_*(Fo, Bi, K)$ для будь якого фіксованого значення параметрів (Fo, Bi, K) . Таку залежність можна знайти, чисельно вирішивши при допомозі ЕОМ систему рівнянь нестационарної теплопровідності (1.1) - (1.5). Через те, що кількість змінних (Fo, Bi, K) більша двох, не існує зручної для користувачів форми зберігання даної інформації. Через поширеність ПЕОМ можна скористатися відповідною програмою (текст її у середовищі Matlab наведено у додатку Е), у якій напряду вводяться значення фізичних характеристик матеріалів. Крім того можна змінювати розрахункові режими пожеж, під дією яких знаходиться захищений матеріал. Наприклад, у підрозділі 2.4 наведені результати моделювання захищеної дії покриття від впливу газового середовища, температура якого визначалася за інтегральною моделлю пожежі у приміщенні.

У додатках Е і Є наведено тексти програм із розрахунку у середовищі Matlab залежності від часу температур поверхонь об'єктів, у разі, коли температура газового середовища $t_f, ^\circ\text{C}$, змінюється із часом за законом

$$t_f(\tau) = t_{\max} - (t_{\max} - t_0) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_f}\right), ^\circ\text{C}, \quad (6.3)$$

де τ_f - характерний час наближення температури газового середовища до свого асимптотичного значення $t_{\max}$ (додаток Е), та за одною із номінальних формул - формулою стандартної пожежі [119]

$$t_f(\tau) = t_{f.st}(\tau) = 345 \cdot \lg(8 \cdot \tau + 1) + t_0, ^\circ\text{C}, \quad (6.4)$$

у яку час τ підставляється у хвилинах (додаток Є). Відмітимо, що у випадку стандартної пожежі коефіцієнту тепловіддачі надають значення $\alpha = 25 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. Варіант програми додатку Є надається з метою можливості порівняння розрахункових результатів із результатами сертифікаційних випробувань для будівельних конструкцій.

Важливою перевагою цих програм є можливість врахування залежності теплофізичних характеристик використовуваних матеріалів від температури.

Зразу відмітимо, що програми додатків Е і Є моделюють термічний захист тіл довільної товщини. Це означає, що при користуванні цими програмами у випадку термічно товстих тіл треба вводити значення товщини тіла h_* , що задовольняє вимозі (2.1).

Наведемо алгоритм користування програмами у випадку моделювання термічного захисту при допомозі вогнезахисної штукатурки «Неоспрей», яка витримує температуру у 1300°C і має наступні значення теплофізичних параметрів: $\lambda = 0,11 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho = 490 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 1,0 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$.

Першим розглянемо захист соснової балки від пожежі, що змінюється згідно із залежністю (6.3).

Алгоритм дії наступний. (Додаток Е)

1) Вводимо параметри газового середовища: $t_{\max} = 950^\circ\text{C}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\tau_f = 10 \text{ с}$, $\alpha = 10 \text{ Вт/}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2) Вводимо параметри соснової балки: $\lambda_* = 0,16 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho_* = 550 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p*} = 2,72 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $h_* = 10 \text{ см}$.

3) Вводимо параметри захисного матеріалу: $\lambda = 0,11 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho = 490 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 1,0 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $h = 10 \text{ мм}$.

Графіки залежності від часу температур поверхонь балки і захисного покриття наведено на рис. 6.3. На ньому символами t_f , t_s , t_{*s} і $t_{*s, free}$ позначені температури гарячого середовища, гарячої поверхні покриття, поверхні балки під захисним шаром і поверхні балки у разі відсутності захисту, відповідно.

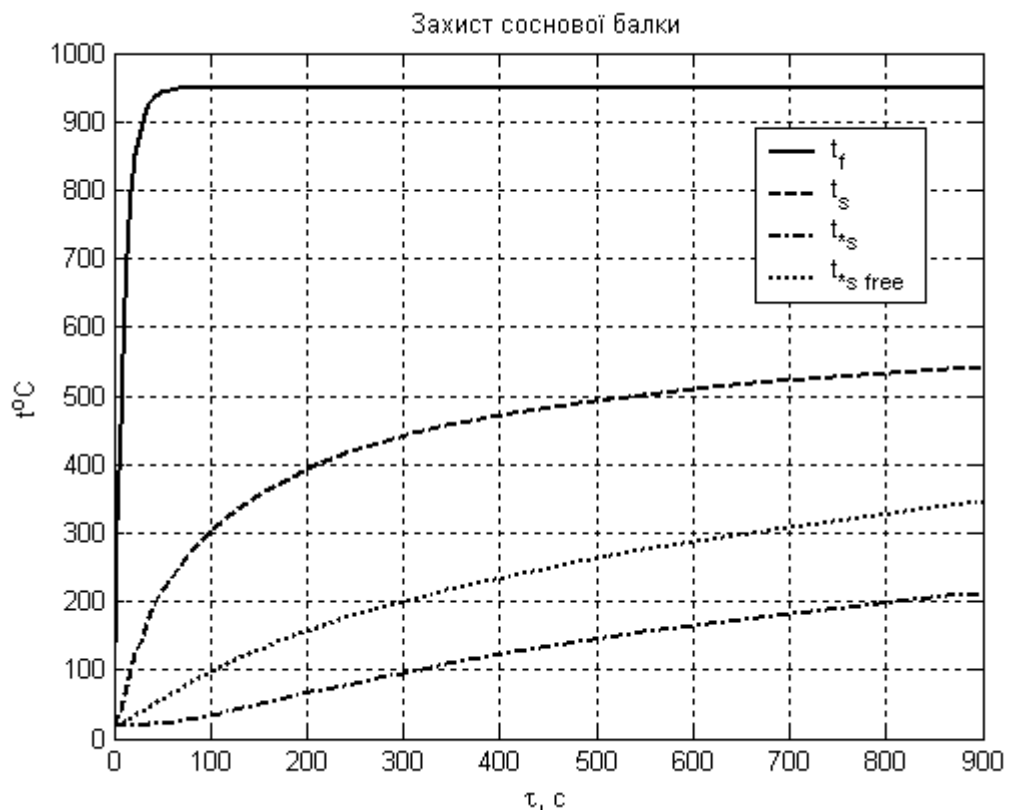


Рис. 6.3 Графіки залежності від часу температур поверхонь при тепловому впливі на захищену поглинаючим покриттям дерев'яну балку

Згідно з лінією t_{*s} із рис. 6.3, якщо брати для сосни $t_{cr} = 200 ^\circ\text{C}$, то межа вогнестійкості захищеної балки становитиме $\tau_{cr} \approx 807 \text{ с} \approx 13,5 \text{ хв}$. Поверхня незахищеної балки нагрівається до цієї температури за в 2,7 рази менший час $\tau_{cr} \approx 298 \text{ с} \approx 5,0 \text{ хв}$. Аналогічний процес з вдвоє товщам покриттям ($h = 20 \text{ мм}$) дає час захисту $\tau_{cr} \approx 1847 \text{ с} \approx 30,8 \text{ хв}$.

В якості другого прикладу розглянемо захист плити з піщаного бетону у випадку пожежі, що змінюється згідно із залежністю (6.4) стандартної пожежі (Додаток Є).

Алгоритм дії наступний.

- 1) Вводимо параметри газового середовища: $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.
- 2) Вводимо параметри плити з бетону піщаного:
 $\lambda_*(t) = 1,05 - 5,8 \cdot 10^{-4} \cdot t$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho_* = 1900 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p*}(t) = 770 + 0,63 \cdot t$, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $h_* = 20 \text{ см}$.
- 3) Вводимо параметри захисного матеріалу: $\lambda = 0,11 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$,
 $\rho = 490 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_p = 1,0 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $h = 10 \text{ мм}$.

Результати розрахунків надаються графічно (рис. 6.4).

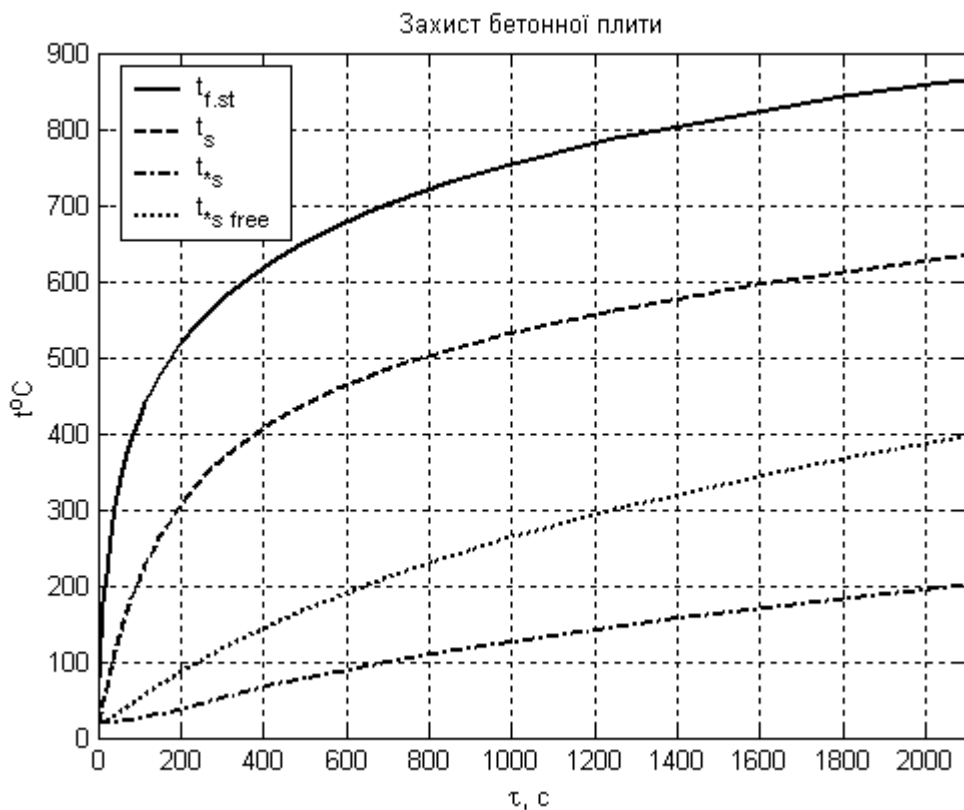


Рис. 6.4 Графіки залежності від часу температури поверхонь при тепловому впливі на захищену поглинаючим покриттям бетонну плиту

Символами $t_{f.st}$, t_s , t_{*s} і $t_{*s.free}$ позначені температури гарячого середовища, гарячої поверхні покриття, поверхні плити під захисним шаром і поверхні плити у разі відсутності захисту, відповідно.

Згідно із рис. 6.4, якщо брати для піщаного бетону $t_{cr} = 200^\circ\text{C}$, то межа вогнестійкості захищеної плити становитиме $\tau_{cr} \approx 2080 \text{ с} \approx 34,7 \text{ хв}$. Поверхня незахищеної плити нагрівається до цієї критичної температури за у 3,2 рази менший час $\tau_{cr} \approx 644 \text{ с} \approx 10,7 \text{ хв}$. Аналогічний процес з вдвічі товщим покриттям ($h = 20 \text{ мм}$) дає час захисту $\tau_{cr} \approx 4240 \text{ с} \approx 70,7 \text{ хв}$.

Відмітимо, що при термічному захисті металевих об'єктів через високу теплопровідність металів варіант термічно товстого тіла практично не реалізується. Як правило, металеві конструкції ведуть себе, як термічно тонкі тіла, для яких реалізується межа малих значень критерію Біо Bi_* .

6.2 Захист термічно тонкого тіла інертним поглинаючим покриттям

Нагадаємо, що термічно тонким вважається тіло, яке задовольняє вимозі (2.74)

$$Bi_* = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_*} \ll 1, \quad (6.5)$$

де l - характерний розмір задачі теплообміну тіла, м; λ_* - коефіцієнт теплопровідності матеріалу ТТТ, $\text{Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, а в якості α береться значення більшого із коефіцієнтів тепловіддачі від тіла у зовнішнє середовище.

При виконанні умови (6.5) ТТТ можна описувати єдиною температурою. Для темпу нагріву такого тіла важливою виявляється не його форма, а відношення об'єму тіла V до площі теплового контакту із гарячим середовищем F_c

$$\delta_* \equiv \frac{V}{F_c}, \text{ м.} \quad (6.6)$$

Ця величина має назву зведеною товщиною тіла. Так у випадку двобічного нагрівання металевго листа $\delta_* = h_*/2$, де h_* - товщина листа.

Припускається, що межа вогнестійкості захищеного ТТТ крім теплофізичних властивостей матеріалів тіла і захисного покриття в основному залежить лише від двох геометричних розмірів - зведеної товщини тіла δ_* і товщини захисного покриття h . Така ситуація робить можливим, вирішивши теплофізичну задачу захисту плоского ТТТ плоскими шарами захисного матеріалу, зафіксувавши це рішення у термінах δ_* і h , розповсюдити його на випадки захисту ТТ тіл складнішої форми.

Геометрично проста плоска задача розглядалася у підрозділі 2.2. Там показано, що у випадку сталого зовнішнього впливу відносна надлишкова температура захищеної поверхні ТТ тіла $\theta \equiv \frac{t_*(\tau) - t_0}{t_{\max 1} - t_0}$ (2.102) є заданою

аналітично у вигляді ряду (2.105) функцією 5-ох критеріїв

$$\theta = \theta(Fo, Bi_1, Bi_2, C, \theta_{f2}), \text{ де } Fo = \frac{a \cdot \tau}{h^2} \quad (2.104), \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot h}{\lambda} \quad (2.85), \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 \cdot h}{\lambda}$$

$$(2.86), \quad C = \frac{c_{p*} \cdot \rho_* \cdot h_*}{c_p \cdot \rho \cdot h} \quad (2.87), \quad \theta_{f2} \equiv \frac{t_{f2} - t_0}{t_{\max 1} - t_0} \quad (2.103).$$

Якщо знехтувати тепловою взаємодією із другим середовищем, що формально досягається вимогою $Bi_2 = 0$, все одне залишиться залежність від трьох критеріїв (Fo, Bi_1, C) , що унеможлиблює просте (графічне або табличне) представлення результатів. Для вирішення задачі визначення захисної дії поглинаючого покриття можна скористатися вже згадуваними відповідними програмами для ПЕОМ у середовищі Matlab (Додатки Е і Є).

Наведемо порядок користування програмами на прикладі моделювання термічного захисту сталевго пластини при допомозі вогнезахисної штукатурки «Неоспрей». Розрахунок проведемо для випадку стандартної пожежі, яка передбачається у додатку Є.

Алгоритм дії наступний.

1) Вводимо параметри газового середовища: $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\alpha = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2) Вводимо параметри пластини з вуглецевої сталі [120]: коефіцієнт теплопровідності $\lambda_*(t) = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \cdot t$, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho_* = 7850 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $c_{p*}(t) = 425 + 0,773 \cdot t - 1,69 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 2,22 \cdot 10^{-6} \cdot t^3$, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, і зведена товщина пластини δ_* , яка у випадку двобічного обігріву становить половину її товщини. Так, якщо $h_* = 10,74 \text{ мм}$, то $\delta_* = h_*/2 = 5,37 \text{ мм}$.

3) Вводимо параметри захисного матеріалу (штукатурки «Неоспрей»): $\lambda = 0,11 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\rho = 490 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_p = 1,0 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $h = 35,5 \text{ мм}$.

Отримані графіки залежності від часу температур поверхні пластини і захисного покриття наведено на рис. 6.5.

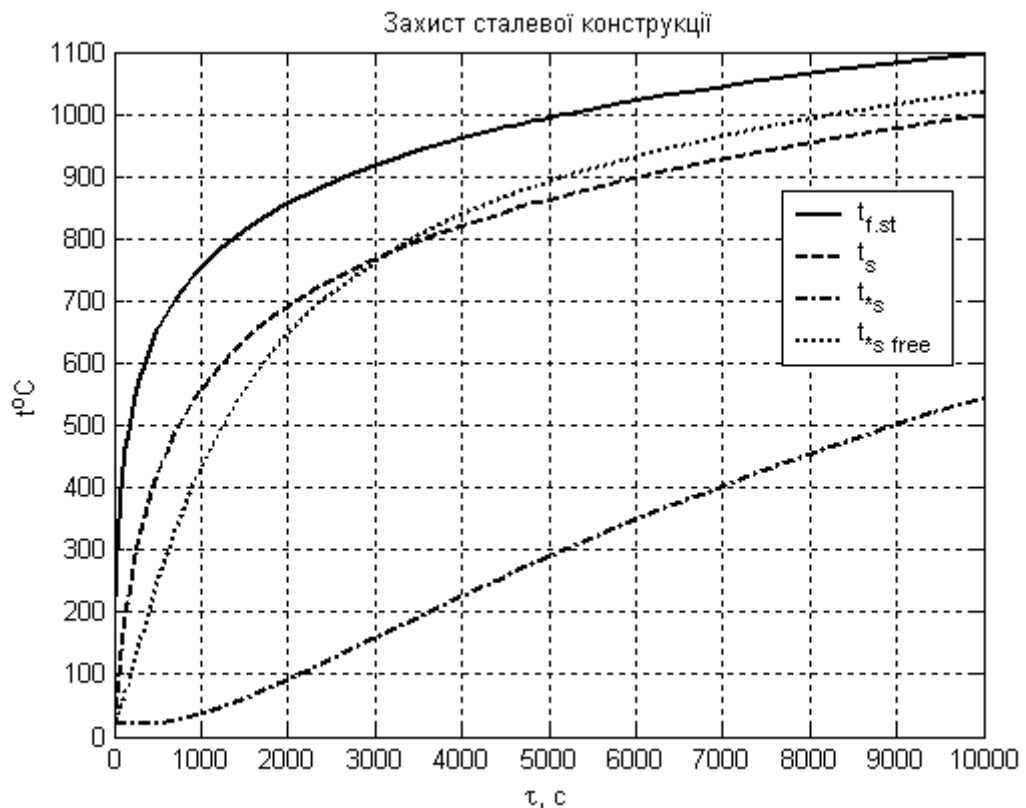


Рис. 6.5 Графіки залежності від часу температур поверхонь при тепловому впливі на захищену поглинаючим покриттям сталеву ТТ пластину у режимі стандартної пожежі

Символами $t_{f.st}$, t_s , t_{*s} і $t_{*s.free}$ позначені температури гарячого середовища, гарячої поверхні покриття, поверхні захищеної пластини і поверхні пластини у разі відсутності захисту, відповідно.

Згідно із цими графіками, якщо брати для сталі $t_{cr} = 500^\circ\text{C}$, то межа вогнестійкості захищеної конструкції становитиме $\tau_{cr} \approx 8970 \text{ с} = 149,5 \text{ хв.}$, що у 7,2 рази перевищує межу вогнестійкості пластини у разі відсутності теплового захисту, коли $\tau_{cr} \approx 1244 \text{ с} \approx 20,7 \text{ хв.}$.

Межу вогнестійкості можна визначити при наявності сертифіката відповідності на вогнезахисний склад. Додаток до такого сертифікату на вогнезахисне покриття «Неоспрей» наведено на рис. 6.6 [122].

Згідно із першим значимим рядком таблиці 1 з рис. 6.6 межа вогнестійкості по втраті несучої здатності сталевій балки із зведеною товщиною $\delta_* = 5,37 \text{ мм}$ при середній товщині сухого шару вогнезахисного покриття $h = 35,5 \text{ мм}$ має позначку $R 180$, тобто становить 180 хв.

Порівняння значень межі вогнестійкості отриманих у двох останніх випадках, а саме за допомогою комп'ютерного моделювання ($\tau_{cr} \approx 149,5 \text{ хв.}$) і за результатами сертифікаційних експериментальних випробувань ($\tau_{cr} = 150 \text{ хв.}$), демонструє високу якість моделі (відносне розходження модельного і експериментального результатів становить 0,3%).


 ДЕРЖАВНИЙ КОМІТЕТ УКРАЇНИ З ПИТАНЬ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
 ТА СПОЖИВЧОЇ ПОЛІТИКИ
 ДЕРЖАВНА СИСТЕМА СЕРТИФІКАЦІЇ УкрСЕПРО

Серія ГС

ДОДАТОК

до сертифіката відповідності / свідоцтва про визнання
Приложение к сертификату соответствия / свидетельству о признании

№ UA1.016.0013474-12

« 01 » лютого 2012

Таблиця 1. Зведена товщина сталевих балок і умови нанесення покриття вогнезахисного 'Неоспрей' для забезпечення межі вогнестійкості сталевих балок від R 150 до R 180

№ з/п	Межа вогнестійкості сталевих будівельної конструкції, хвилини (години)	Зведена товщина сталевих балки, не менше, мм	Середня витрата (за даними ТОВ ПТК "А+В") суміші з водою/ сухої суміші, не менше, кг/м ²	Середня товщина сухого шару вогнезахисного покриття, не менше, мм
1	R 150 (2,5)	5,37	17,4/14,2	35,5
2		6,95	15,72/13,1	32,75
3	R 180 (3,0)	5,37	21,12/17,6	44,0
4		6,95	18,48/15,4	38,5

Таблиця 2. Зведена товщина сталевих колон і умови нанесення покриття вогнезахисного 'Неоспрей' для забезпечення межі вогнестійкості сталевих колон від R 120 до R 180

№ з/п	Межа вогнестійкості сталевих будівельної конструкції, хвилини (години)	Зведена товщина сталевих колони, не менше, мм	Середня витрата (за даними ТОВ ПТК "А+В") суміші з водою/ сухої суміші, не менше, кг/м ²	Середня товщина сухого шару вогнезахисного покриття, не менше, мм
1	R 120 (2,0)	3,43	13,44/11,2	28,0
2		5,76	12,53/10,44	26,1
3	R 150 (2,5)	3,43	15,74/13,12	32,8
4		5,76	14,45/12,04	30,1
5	R 180 (3,0)	3,43	18,0/15,0	37,5
6		5,76	16,42/13,68	34,2


 Керівник органу з сертифікації
 Підписувач обов'язково підтверджує


 підпис

А.В. Кучмійов
 ініціали, прізвище

№ 016863

Рис. 6.6 Додаток до сертифікату відповідності на вогнезахисне покриття
 «Неоспрей»

6.3 Захист поверхні тіла покриттям, що спучується

Захист покриттям, що спучується, розглянуто у розділі 4.

Через те, що основним механізмом переносу тепла у інтумесцентних покриттях, як і у інертних поглинаючих, є теплопровідність основною причиною зростання межі вогнестійкості при спучуванні є не зменшення коефіцієнта теплопровідності, а зростання товщини захисного шару у порівнянні з товщиною до спучування. У зв'язку зі сказаним, основним параметром, що визначає межу вогнестійкості таких покриттів є кінцева (тобто та, що утворилася у результаті спучування) товщина захисного шару. Основним параметром, що визначає межу вогнестійкості, є коефіцієнт спучування k_v .

Чисельний прогноз межі вогнестійкості можна зробити або спираючись на комп'ютерне рішення відповідної математичної моделі, яка відповідає даному інтумесцентному вогнезахисному складу, або використовуючи експериментальні дані випробувань даного складу.

Алгоритм дії (у разі наявності адекватної комп'ютерної моделі фіксованого вогнезахисного інтумесцентного складу) полягає у введенні у відповідну ЕОМ програму вільних параметрів моделі, до яких відносяться параметри зовнішнього гарячого середовища, початкова товщина інтумесцентного складу, теплофізичні і геометричні характеристики об'єкта захисту і початкові температури.

Розгляд реалізації такого алгоритму визначення межі вогнестійкості τ_{cr} у випадку неорганічного покриття СК-1 з використанням викладеної у Додатку Д програми для середовища Matlab наведено у підрозділі 4.3.

Алгоритм дії наступний.

1) Вводимо параметри газового середовища: $t_{\max} = 950^\circ\text{C}$, $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $\tau_f = 30\text{ с}$, $\alpha = 10\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. (Температура середовища моделюється співвідношенням (6.3))

2) Вводимо параметри соснової дошки, яку захищають від впливу пожежі: $\lambda_* = 0,16 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, $\rho_* = 550 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, $c_{p*} = 2,72 \text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, $h_* = 1,5 \text{ см}$ при однобічному нагріванні.

3) Вводимо вільні параметри захисного матеріалу: $h_0 = 3 \text{ мм}$ – початкова товщина захисного шару. Відмітимо, що максимальне значення коефіцієнта спучування (у СК-1 $k_{V.\max} \approx 4$) є константою захисного складу.

Результати моделювання представлені на рис. 6.7. Символами t_f , t_s і t_{*s} позначені температури гарячого середовища, гарячої поверхні покриття, поверхні дошки під захисним шаром, відповідно.

Згідно із цими графіками, при критичному рівні температури деревини $t_* = t_{cr} = 200^\circ\text{C}$, межа вогнестійкості захищеної поверхні становитиме $\tau_{cr} \approx 848 \text{ с} \approx 14,1 \text{ хв}$.

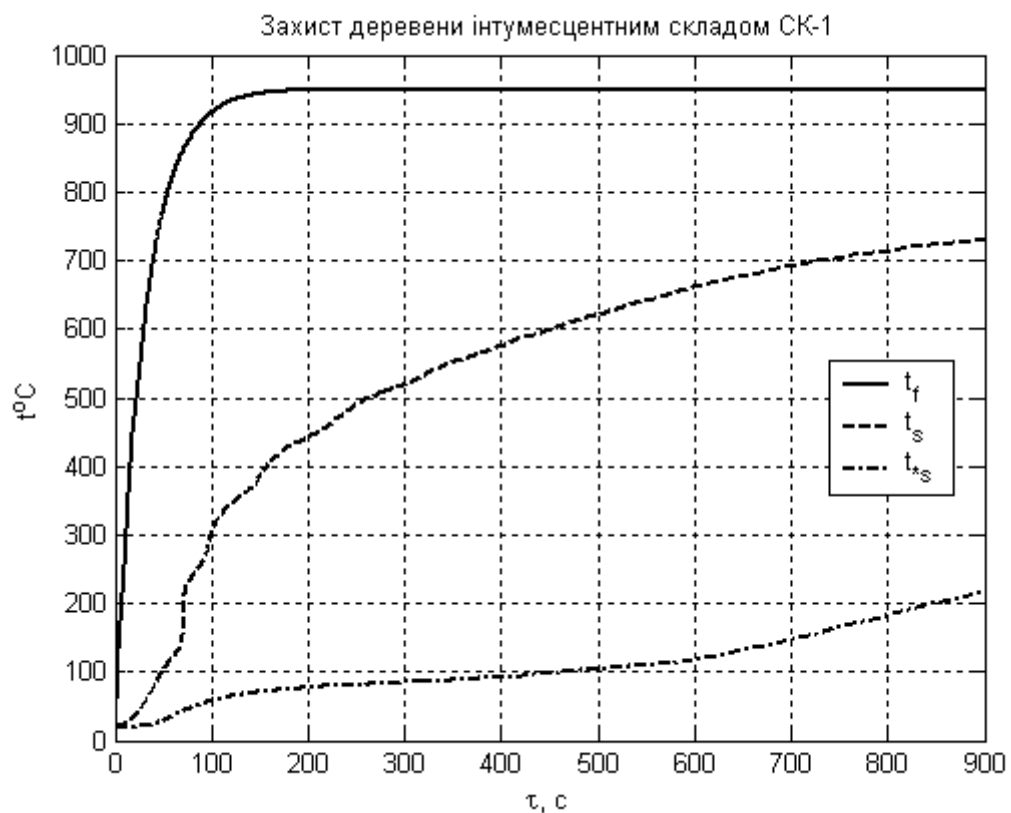


Рис. 6.7 Графіки залежності температур від часу у випадку захисту соснової дошки інтумесцентним покриттям СК-1

На даний момент основним способом визначення межі вогнестійкості користувачами є визначення за даними експериментальних випробувань спучуваних покриттів. Продемонструємо порядок таких дій на прикладі вогнезахисного інтумесцентного складу Defender M Solvent, властивості якого характеризуються таблицею 6.2. [122]

Таблиця 6.2

Товщина покриття (мм) на основі вогнезахисного складу Defender M Solvent в залежності від необхідної межі вогнестійкості і зведеної товщини металу для проектної температури 500°C

Зведена товщина металоконструкції, мм	2,8	3,4	4,2	5,2	7,2	10,0	14,2
R 15	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
R 30	0,46	0,41	0,41	0,36	0,31	0,26	0,21
R 45	1,76	1,66	1,56	1,41	1,26	1,06	0,86
R 60	-	-	-	-	2,21	1,86	1,51

Із таблиці 6.2 витікає, що для забезпечення межі вогнестійкості 45 хвилин по втраті несучої здатності сталеву конструкцією (рядок R 45), що буде знаходитись під дією стандартної пожежі, при зведеній товщині цієї конструкції $\delta_* = 10,0$ мм треба нанести шар покриття Defender M Solvent, що у сухому стані матиме товщину 1,06 мм.

При використанні цієї таблиці при потраплянні значень заданих параметрів в інтервали між рядками (або стовбцями) для визначення шуканого параметру не можна використовувати метод лінійної інтерполяції, що пов'язано із суттєвою нелінійністю залежностей. Слід вибирати найближче більш жорстке обмеження. Наприклад, якщо задатися межею вогнестійкості у 40 хвилин (R 40) для металоконструкції, яка має зведену товщину $\delta_* = 5,0$ мм, треба взяти значення товщини шару краски для R 45 і $\delta_* = 4,2$ мм, тобто 1,56 мм.

6.4 Захист тіла відбиваючими екранами

Чисто відбиваючі покриття є незручними для захисту неживих об'єктів, бо при однаковій межі вогнестійкості займають значно більше місця ніж поглинаючі. Одночасно відбиваючі покриття кращі за поглинаючі при захисті живих об'єктів, бо при фіксованій межі вогнестійкості виграють по можливості організації мобільного захисту (мобільний відбиваючий екран, теплозахисний костюм).

При використанні відбиваючих екранів для захисту живих об'єктів обмежуючою величиною є значення питомого теплового потоку q_{cr} , яке здатен витримувати об'єкт захисту. Через це критичним часом τ_{cr} є час досягнення питомим результуючим тепловим потоком $q_*(\tau)$, який падає на об'єкт захисту, значення q_{cr} . Інакше кажучи, для знаходження τ_{cr} треба, знаючи залежність $q_*(\tau)$, вирішити рівняння

$$q_*(\tau_{cr}) = q_{cr}. \quad (6.7)$$

Аналітичні рішення рівняння (6.7) щодо знаходження межі вогнестійкості τ_{cr} відсутні навіть у найпростішому випадку одношарового відбиваючого екрану із повітряним прошарком. Знаходження τ_{cr} вимагає використання відповідних комп'ютерних програм. Тексти таких програм у середовищі Matlab викладені у Додатку Г, який відноситься до розділу 3.

Загальний алгоритм знаходження τ_{cr} містить два кроки: 1) у відповідну комп'ютерну програму вводяться основні параметри задачі; 2) на основі виданого комп'ютерною програмою графіка залежності $q_*(\tau)$ для заданого значення q_{cr} вирішується рівняння (6.7).

До основних параметрів задачі відносяться: а) температура і ступінь чорноти гарячого середовища T_f і ε_f та поверхні тіла T_* і ε_* , відповідно; б) параметри кожного із i ($i=1, 2$) відбиваючих шарів: товщина h_{si} , середня

густина матеріалу ρ_{si} , середня питома ізобарна теплоємність матеріалу c_{psi} , ступені чорноти поверхонь відбиваючого шару ε'_{si} і ε''_{si} ; в) параметри прошарків.

Параметри прошарків наступні: якщо прошарок повітряний, то єдиним параметром, який необхідно задати, є його товщина x_i ; якщо прошарок заповнений теплоізоляційним матеріалом і є оптично тонким, то необхідно задавати товщину прошарку h_i , середню густину матеріалу ρ_i , середню питома ізобарна теплоємність матеріалу c_{pi} і коефіцієнт поглинання променистого потоку κ (якщо чисельне значення κ невідоме, то з відносною точністю $\kappa \cdot h_i$ можна прийняти $\kappa = 0$).

Приклади застосування наведеного алгоритму знаходження межі вогнестійкості наведені у розділі 3.

Випадок одно- і двошарових відбиваючих екранів із повітряними прошарками із відповідними чисельними значеннями параметрів задачі привів до залежності $q_*(\tau)$, яка відображена на рис. 3.7.

Графіки, наведені на рис. 3.7, наглядно показують, що при дотриманні умови непрозорості відбиваючих шарів межа вогнестійкості двошарового екрану, сума товщини шарів якого дорівнює товщині відповідного одношарового екрану (при збігу всіх інших параметрів), більш ніж у 2 рази перевищує межу вогнестійкості одношарового екрану. Так час захисту при потраплянні у полум'я ($T_f = 1000 + 273$ K) складає для двошарового екрану $\tau_{cr} \approx 186$ с, а для одношарового екрану сумарної товщини $\tau_{cr} \approx 75$ с.

Приклад застосування загального алгоритму знаходження межі вогнестійкості у випадку одношарового відбиваючого екрану із теплопровідним оптично тонким прошарком наведено у підрозділі 3.4. Відповідна залежність $q_*(\tau)$ відображена на рис. 3.16. Тут час захисту при потраплянні у полум'я ($T_f = 1000 + 273$ K) складає $\tau_{cr} \approx 60$ с.

Приклад застосування загального алгоритму знаходження межі вогнестійкості у випадку двошарового відбиваючого екрану із теплопровідними оптично тонкими прошарками наведено у підрозділі 3.5. Відповідна залежність $q_*(\tau)$ відображена на рис. 3.19.

Можна провести порівняння графіків з рис. 3.19 із відображеними на рис. 3.16 результатами одношарового екрану, який має такі ж властивості матеріалів і товщину відбиваючого шару, що дорівнює сумарній товщині відбиваючих шарів двошарового екрану, а також товщину прошарку, що дорівнює сумарній товщині прошарків двошарового екрану. Таке порівняння показує, що час захисту двошарового екрану майже у 1,5 рази перевищує час захисту відповідного одношарового екрану, тобто при потраплянні у полум'я ($T_f = 1000 + 273 \text{ K}$) межа вогнестійкості двошарового екрану становитиме $\tau_{cr} \approx 90 \text{ с}$.

Приклад застосування загального алгоритму знаходження межі вогнестійкості у випадку напівважкого теплозахисного костюма (що складається із відбиваючого термічно тонкого оптично непрозорого шару і двох теплопровідних оптично тонких прошарків), повітряного прошарку і теплопровідного оптично тонкого шару одягу розглянуто у підрозділі 3.6. Відповідна залежність $q_*(\tau)$ відображена на рис. 3.22. Характерний час захисту, при потраплянні у полум'я ($T_f = 1000 + 273 \text{ K}$) складає $\tau_{cr} \approx 160 \text{ с}$.

Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільш суттєво час захисту залежить від ступенів чорноти обох боків всіх відбиваючих шарів. Особливо це стосується зовнішнього відбиваючого шару. Так при зростанні ε'_{s1} від 0,2 до 1 τ_{cr} зменшується у рази.

6.5 Висновки

1. Для випадку захисту поверхні термічно товстого тіла шаром поглинаючого покриття надано алгоритми: визначення нижньої границі межі вогнестійкості у разі використання графіків критеріального рівняння нагрівання

шару покриття; визначення межі вогнестійкості у разі використання розробленої комп'ютерної програми процесу прогріву.

2. Надано алгоритм визначення межі вогнестійкості у разі захисту поверхні термічно тонкого тіла інертним поглинаючим покриттям з використанням як даних сертифікаційних вимірів, так і комп'ютерної програми процесу прогріву. У випадку захисту конструкцій із вуглецевої сталі відносне розходження межі вогнестійкості, розраховане за моделлю і визначене за результатами сертифікаційних вимірів при стандартному режимі пожежі, не перевищує декілька відсотків.

3. Надано алгоритм визначення межі вогнестійкості у разі захисту поверхні покриттям із здатного до спучування матеріалу, у разі використання, як таблиці сертифікаційних вимірів властивостей захисного матеріалу, так і комп'ютерної програми, що моделює процес спучування.

4. Надано алгоритм визначення часу захисту у разі застосування відбиваючих екранів. Розглянуті системи з одним та двома відбиваючими шарами та повітряними або теплопровідними оптично тонкими прошарками. Аналіз результатів розрахунків показує, що найбільш суттєво час захисту залежить від ступенів чорноти обох боків всіх відбиваючих шарів. Так при зростанні ступеня чорноти зовнішньої поверхні зовнішнього відбиваючого шару від 0,2 до 1,0 час захисту зменшується у рази.

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 металевої 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 убують з часом. Отримано формули розрахунку всіх доданків цього ряду і показано, що основною відмінністю даної задачі від відомої ситуації однобічного 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 у випадку стандартної пожежі. 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. — М.: Физматлит, 2007.—416 с.
2. Беззапонная О.В., Головина Е.В., Акулов А.Ю., Калач А.В., Шарапов С.В., Калач Е.В. Пути совершенствования огнезащитных терморасширяющихся составов для использования на объектах нефтегазового комплекса // Пожаровзрывобезопасность. —2017.—Т. 26, №12.— С. 14–24.
3. Ненахов С.А., Пименова В.П., Натейкина Л.И. Влияние наполнителей на структуру пенококса на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. —2009.—Т. 18, №7.— С. 51–58.
4. Цапко Ю.В., Кравченко А.В., Кривенко П.В., Ніколаєнко М.В. Основні тенденції створення вогнезахисних спучуючи композицій для будівельних конструкцій // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. –Вип. №65. – С. 142-147.
5. Яремина Т.Ю., Гравит М.В., Дмитриева Т.Ю. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол // Пожаровзрывобезопасность. - 2012. - Т.21., №8. - С. 56-60.
6. Киреев А.А., Чернуха А.А. Подбор гелеобразующих систем для получения вспучивающихся огнезащитных покрытий // Проблемы пожарной безопасности. — 2008. — Вып. 24. — С. 54-60.
7. Григорьян Б.Б., Цвиркун С.В., Григорьян М.Б. Определение теплофизических характеристик огнезащитной эффективности огнезащитного покрытия «Эндотерм 210104» // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2011.- № 7. – С. 39-45.
8. Новак С.В., Круковский П.Г., Григорьян Н.Б. Оценка огнезащитной способности вермикулито-цементной плиты «Эндотерм 210104» стандартизированными методами // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека - 2017. - №1(3). – С. 11-19.

9. Балакин В.М., Селезнев А.М., Белов В.В. Сравнительная оценка огнезащитных свойств вспениваемых покрытий на основе фосфатов аммония и водорастворимых аммонийных солей аминотетрафосфоновых кислот // Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т.23., №11. — С. 34-41.

10. Гравит М.В. Исследование влияния различных факторов на коэффициент вспучивания органорастворимых огнезащитных покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2013. — №6. — С. 12-16.

11. Завьялов Д.Е., Зыбина О.А., Митрофанов В.В., Мнацаканов С.С. Сравнительное изучение поведения фосфатов аммония в огнезащитных вспучиваемых композициях // Журнал прикладной химии. - 2012. - Т.85, вып. 1. - С. 157-159.

12. Завьялов Д.Е., Нечаев К.В., Зыбина О.А., Бабкин О.Э., Мнацаканов С.С. Реакции в огнезащитных вспучиваемых красках в присутствии углеродных нанотел // Лакокрасочные материалы и их применение. - 2012. - № 10. - С. 38-39.

13. Зыбина О.А., Якунина И.Е., Бабкин О.Э., Мнацаканов С.С., Войнолович Е.Д. Специфические реакции ингредиентов в огнезащитных вспучиваемых лакокрасочных композициях // Лакокрасочные материалы и их применение. - 2014. - № 12. - С. 30-33.

14. Трифонова О.Н. Оптимизация огнезащиты металлических конструкций // Пожаровзрывобезопасность - 2013. - Т. 22, № 1. - С. 56–62.

15. Чернуха А.А. Экспериментальное исследование температуропроводности вспучиваемых огнезащитных покрытий для древесины // Проблемы пожарной безопасности. - 2011. - Вып. 30. - С. 263-267.

16. Киреев А.А. Термогравиметрические исследования огнетушащих и огнезащитных гелей // Проблемы пожарной безопасности. - 2006. - Вып. 20. - С. 86-89.

17. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Огнезащита стальных конструкций плитным материалом PYRO-SAFE AESTUVER T // Пожаровзрывобезопасность - 2016. - Т. 25, № 11. - С. 8-16.

18. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Инженерный метод расчета огнестойкости стальных конструкций с огнезащитой из минераловатных плит «ROCKWOOL CONLIT» // Пожарная безопасность. – 2006.- № 4. - С. 78-85.

19. Шутов Ф.А., Круглов Е.Ю., Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Влияние теплоизоляции из полимерного пенокомпозиата "PENOCOM" на огнестойкость ограждающих деревянных каркасных конструкций // Пожаровзрывобезопасность - 2016. - Т. 25, № 1. - С. 28-37.

20. Мелихов А.С., Болодьян И.А. Применение огнезащитных покрытий для повышения огнестойкости металлоконструкций и противопожарной защиты кабелей на объектах, где обращаются большие количества кислорода // Пожарная безопасность. – 2018.- № 3. - С. 24-30.

21. Бессонов Н.М., Еремина Т.Ю., Дмитриева Ю.Н., Крашенинникова М.В. Расчетный метод определения пределов огнестойкости металлоконструкций, покрытых огнезащитным вспучивающимся составом // Пожарная безопасность. – 2007. - №1. – С. 89-96.

22. Баженов С.В., Наумов Ю.В. Прогнозирование динамики нагрева металлических конструкций с огнезащитной обработкой по результатам определения теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий (лабораторный метод) // Пожарная безопасность. – 2005. - №1. – С. 50-54.

23. Ройтман В.М. Особенности проектирования огнестойкости конструкций и зданий при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Пожаровзрывобезопасность - 2013. - Т. 22, № 7. - С. 47–54.

24. Ковалев А.И. Определение характеристики огнезащитной способности покрытий железобетонных перекрытий для различных температурных режимов пожара // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2013.- № 13. – С. 4-9.

25. Кораблев В.А., Минкин Д.А., Шарков А.В., Романов Н.Н. Тепловой режим огнезащитной шторы в условиях интенсивного теплового воздействия // Пожаровзрывобезопасность. - 2017. - Т.26., №4. - С. 29-36.

26. Ковальов А.І., Качкар Є.В., Зоценко Н.В., Долішній Ю.В. Експериментальне дослідження вогнезахисної здатності покриття «AMOTHERM STEEL WB» при температурному режимі вуглеводневої пожежі // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2014. – №17. – С. 53-60.
27. Круковский П.Г., Качкар Е.В., Ковалев А.И. [и др.] Эффективность вспучивающихся огнезащитных покрытий железобетонных конструкций при различных режимах пожара // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2010. – №21. – С. 75-83.
28. Андронов В.А., Рибка Є.О. Дослідження вогнегасник властивостей реактивних покриттів для металевих конструкцій з урахуванням температурних режимів реальних пожеж // Проблемы пожарной безопасности. - 2011. - Вып. 29. - С. 8-17.
29. Писарский М.О., Шаршанов А.Я. Моделювання динаміки небезпечних факторів пожежі у приміщенні // Проблемы пожарной безопасности. - 2002. - Вып. 11. - С. 174-177.
30. Писарский М.А., Шаршанов А.Я. Особливості моделювання швидкості вигорання // Проблемы пожарной безопасности. - 2004. - Вып. 15. - С. 168-171.
31. Шаршанов А.Я. Расчет защиты массивного тела теплозащитным покрытием // Проблемы пожарной безопасности. - 2006. – Вып. 20. - С. 254-258.
32. 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.
33. Шаршанов А.Я. Расчет защиты термически тонкого тела теплозащитным покрытием // Проблемы пожарной безопасности. – 2007. - Вып. 21. - С. 301-305.
34. Шаршанов А.Я. Теоретические аспекты высыхания геля при пожаре // Проблемы пожарной безопасности. – 2008. - Вып. 23. - С. 221-229.

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

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

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

38. 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

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

44. 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.

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

46. 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.

47. Шаршанов А.Я. Замедление массопереноса зернистой средой // Проблемы пожарной безопасности. - 2017. - Вып. 41. - С. 206-210.

48. 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.

49. Шаршанов А.Я. Теплозащитное действие случайно-неоднородного слоя // Проблемы пожарной безопасности. - 2018. - Вып. 43. - С. 189-194.

50. 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.

51. Шаршанов А.Я. О критериях пожарной безопасности // Проблемы пожарной безопасности. - 2018. - Вып. 44. - С. 176-182.

52. Шаршанов А.Я. Математическое моделирование неизотермической диффузии паров горючей жидкости сквозь зернистое покрытие // Проблемы пожарной безопасности. - 2019. - Вып. 45. - С. 179-192.

53. 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.

54. Патент № 133144 UA. Спосіб гасіння горючих або легкозаймистих рідин плавучою зернистою системою / Дадашов І.Ф., Кіреєв 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.

55. Рябова І.Б., Сайчук І.В., Шаршанов А.Я. Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі: Навчальний посібник. - Харків: АПБУ, 2002. – 352 с.

56. Тарахно О.В., Шаршанов А.Я. Фізико-хімічні основи використання води у пожежній справі. Навчальний посібник. - Харків, 2004. - 252 с.

57. Шаршанов А.Я., Рябова І.Б. Термодинаміка і теплопередача у цивільній безпеці: Навчальний посібник. - Харків: НУЦЗУ, КП “Міська друкарня”, 2013. – 380 с.

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

59. 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.

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. Collin A., Lechene S., Boulet P., Parent G. Water mist and radiation interactions: application to a water curtain used as a radiative shield // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. - 2010. - Vol. 57, Issue 8. - P. 537–553.

71. Benbrik A., Cherifi M., Meftah S., Khelifi M. S., Sahnoune K. Contribution to fire protection of the LNG storage tank using water curtain // International Journal of Thermal and Environmental Engineering. - 2010. - Vol. 2, No. 2. - P. 91–98.

72. Boulet P., Collin A., Parent G. Heat transfer through a water spray curtain under the effect of a strong radioactive source // Fire Safety Journal. - 2006. - Vol. 41, No. 1. - P. 15–30.

73. Choi C.L. Radiation blockade effects by water curtain // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. - 2004. - Vol. 6, No. 4. - P. 248–254.

74. Xishi Wang, Qiong Tan, Zhigang Wang, Xiangxiao Kong, Haiyong Cong. Preliminary study on fire protection of window glass by water mist curtain // International Journal of Thermal Sciences. - 2018. - Vol. 125. - P. 44–51.

75. Buchlin J.-M. Thermal shielding by water spray curtain // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. - 2005. - Vol. 18, No. 4-6. - P. 423–432.

76. Yang W., Parker T., Ladouceur H. D., Kee R. J. The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression // Fire Safety Journal. - 2004. - Vol. 39, Issue 1. - P. 41-66.

77. Tseng C. C., Viskanta R. Absorptance and transmittance of water spray_mist curtains // Fire Safety Journal. - 2007. - Vol. 42, Issue 2. - P. 106–114.

78. Cheng Hao, Hadjisophocleous G. V. Experimental study and modeling of radiation from compartment fires to adjacent buildings // Fire Safety Journal. - 2012. - Vol. 53. - P. 43–62.

79. Pei Zhu, Xishi Wang, Zhigang Wang, Haiyong Cong, Hiaomin Ni. Experimental and numerical study on attenuation of thermal radiation from large-scale pool fires by water mist curtain // Journal of Fire Science. - 2015. - Vol. 33, No. 4. - P. 269–289.

80. Cheung W. Y. Radiation blockage of water curtain // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. - 2009. - No. 1.- P. 7–13.

81. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами // Пожаровзрывобезопасность. - 2012. - Т. 21, № 7. - С. 73-82.

82. Виноградов А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Ч. 2 // Пожаровзрывобезопасность. - 2013. - Т. 22, № 4. - С. 72-84.

83. Виноградов А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами // Пожаровзрывобезопасность - 2013. - Т. 22, № 6. - С. 74-85.

84. Шимко В.Ю. Использование водопленочных теплозащитных экранов для защиты от теплового излучения при горении проливов сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность. - 2013. - Т. 2, № 12. - С. 63–67.

85. Брушлинский Н.Н., Усманов М.Х., Шимко В.Ю., Карпов В.Л., Курбанов А.Х. Метод защиты от распространения пожаров опасных газов и радионуклидов // Пожаровзрывобезопасность. - 2014. - Т. 23, № 5. - С. 72–75.

86. Брушлинский Н.Н., Усманов М.Х., Шимко В.Ю. Экраны "СОГДА" – гарантия эффективности тепловой защиты и тушения пожаров // Технология машиностроения. - 2010. - № 4. - С. 65–66.

87. Шимко В.Ю. Использование конструкции на основе водопленочных экранов для повышения пожаровзрывобезопасности объектов хранения и распределения сжиженного природного газа // Пожаровзрывобезопасность. - 2014. - Т. 23, № 1. - С. 58–61.

88. Ахмедов А.Б., Шимко В.Ю., Пузач С.В. Ослабление лучистого теплового потока противопожарной преградой "СОГДА" // Пожаровзрывобезопасность. - 2018. - Т. 27, № 4. - С. 58–66.

89. Желяк В.І., Наливайко М.А., Лазаренко О.В., Кінтер С.Я. Методи захисту пожежних від теплового випромінювання вогнища пожежі // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2014. – №16. – С. 30-35.

90. Жартовський В.М., Цапко Ю.В. Профілактика горіння целюлозовмісних матеріалів. Теорія та практика. – К., 2006. – 248 с.

91. Гудович О.Д., Лагода О.В. Багатоплановість випробувань вогнезахисних засобів для деревини // Наук. вісн. УкрНДІПБ. – К., 2002. – № 2(6). – С. 205–208.

92. Бельцева Т.Г., Корольченко О.Н. Показатели воспламеняемости огнезащитной древесины // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 4. – С. 31–33.

93. Тычино Н.А. Высокоэффективные огнезащитные средства комбинированного действия для обработки древесины: дис. д-ра наук по пожарной и промышленной безопасности: 05.26.03 / Николай Алексеевич Тычино; БГТУ. – М., 2006. – 263 с.

94. Степовая Л.П., Шутов Г.М. Огнестойкая модифицированная древесина // Механическая технология древесины: Республиканский межведомственный сборник. – Минск: Вышэйшая школа, 1980. – 165 с.

95. Тычино Н.А. Технологический процесс получения атмосфероустойчивых огне- и биозащищенных пиломатериалов // Проблемы пожарной безопасности: ред. А.В. Антонова. – Киев.: МВД Украины, 1995. – С. 327–328.

96. Зуйков В.Е., Козлов В.Н., Бабуркин А.А., Тычино Н.А., Ситко К.К., Шаплыко В.И. Новый способ получения трудногорючей древесины // Совершенствование огнезащиты древесины и целлюлозных материалов: тезисы докладов на 2-ой научно-технической конференции. – К., 1987. – С. 36.

97. Sunder S. S., Gann R. G., Grosshandler W. L., Lew H. S., Bukowski R. W., Sadek F., Gayle F. W., Gross J. L., McAllister T. P., Averill J. D., Lawson J. R., Nelson H. E., Cauffman S. A. Final report on the collapse of the World Trade Center towers / NIST NCSTAR 1. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster. — Washington : U. S. Government Printing Office, 2005. — 248 p. DOI: 10.6028/nist.ncstar.1.

98. Пронин Д.Г., Конин Д.В. Проблемы применения стальных и железобетонных несущих конструкций высотных зданий с точки зрения их огнестойкости // Пожаровзрывобезопасность. - 2018. - Т. 27, № 1. - С. 50–57.

99. Ройтман В.М. О механизме прогрессирующего обрушения высотного здания ВТЦ-7 во время событий 11 сентября 2001 года в Нью-Йорке // Пожаровзрывобезопасность. - 2015. - Т. 24, № 10. - С. 37–44.

100. Забегаев А.В., Ройтман В.М. Анализ стойкости башен Всемирного торгового центра против комбинированных особых воздействий типа «удар-взрыв-пожар» при атаке террористов 11 сентября 2001 г. // Пожаровзрывобезопасность. - 2001. - Т. 10, № 6. - С. 54–59.

101. World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations. — New York, Federal Emergency Management Agency (FEMA), 403_May 2002.

102. Pasman H.J., Kirillov I.A., Roytman V.M. et al. Hazards and Risk Analysis for Aircraft Collision with High-Rise Building : NWO project 047.011.2001.035, TNO, Netherlands.

103. Roytman V.I., Pasman H.J., Lukashevich I.E. The concept of evaluation of building resistance against combined hazardous effects “impact – explosion – fire” after aircraft crash // Fire and Explosion Hazards: Proceedings of the Fourth International Seminar. - Londonderry, NI, UK, 2003. - P. 283–293.

104. Paul F. Mlakar, Donald D. Dusenberry, James R. Harris, Gerald Haynes, Long T. Phan, Mete A. Sozen. The Pentagon building performance in the 9/11 crash // Resilience of Cities to Terrorist and other Threats: Learning from 9/11 and further Research Issues. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Urban

Structures Resilience under Multi-Hazard Threats. Lessons of 9/11 and Research Issues for Future Work. Russia, Moscow, 16 July – 18 July 2007. - Springer, 2008. - P. 113–134.

105. Roytman V.M., Lukashevich I.E. Engineering method for prompt assessment of structural resistance against combined hazard effects // Resilience of Cities to Terrorist and other Threats: Learning from 9/11 and further Research Issues. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Urban Structures Resilience under Multi-Hazard Threats: Lessons of 9/11 and Research Issues for Future Work. Russia, Moscow, 16 July – 18 July 2007. - Springer, 2008. - P. 239-256.

106. Теличенко В.И., Ройтман В.М. Становление научных основ комплексной безопасности строительства // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2011. - № 6. - С. 28–30.

107. Теличенко В.И., Ройтман В.М. Обеспечение стойкости зданий и сооружений при комбинированных особых воздействиях с участием пожара – базовый элемент системы комплексной безопасности // Предотвращение аварий зданий и сооружений: сб. науч. тр. Вып. 9. - М.: Вельд, 2010. - С. 15-29.

108. Ройтман В.М. Особенности обеспечения безопасности людей в зданиях и сооружениях при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. тр. Междунар. науч. конф., Москва, 19-21 октября 2011 г. - В 2 т. - М.: МГСУ, 2011. - Т. 1. - С. 453-456.

109. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Метод определения эффективности средств огнезащиты железобетонных конструкций тоннельных сооружений // Пожарная безопасность. – 2005.- № 3. - С. 30-37.

110. Григорьян Б.Б., Цвиркун С.В., Григорьян М.Б. Определение характеристики огнезащитной способности покрытий «НАТРЕСК» и «ЭНДОТЕРМ 210104» для защиты металлических конструкций // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2012.- № 12. – С. 18-23.

111. Ковальов А.І., Качкар Є.В., Зобенко Н.В., Тищенко О.М. Особливості застосування покриттів металевих конструкцій при різних температурних режимах пожежі // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2014. – №16. – С. 135-139.

112. Ковальов А.І. Обґрунтування параметрів вогнезахисного штукатурного покриття для захисту залізобетонних перекриттів // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека - 2017. - №1(3). – С. 20-27.

113. Беліков А.С., Маладика І. Г., Борсук О. В., Іщенко І. І. Підвищення вогнестійкості металевих конструкцій як шлях забезпечення вогнезахисту будівель // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2014. – №18. – С. 38-42.

114. Хасанов И.Р., Иващук Р.А. Применение методов регулярного теплового режима для оценки толщины огнезащитного покрытия, обеспечивающей заданный предел огнестойкости металлоконструкции // Пожарная безопасность. – 2019.- № 1. - С. 35-44.

115. Фадеев В.Е. Исследование предела огнестойкости экранных стен // Пожарная безопасность. – 2019.- № 2. - С. 49-53.

116. Голованов В.И., Павлов В.В., Пехотиков А.В. Защита железобетонных тубингов автодорожных тоннелей от хрупкого разрушения при пожаре // Пожарная безопасность. – 2008.- № 2. - С. 50-55.

117. Голиков А.Д., Черкасов Е.Ю., Данилов А.И., Сиваков И.А. Способ огнезащиты обделки транспортных тоннелей из чугуновых тубингов // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. - №25(12) – С. 22-29.

118. <http://thermalinfo.ru/svojstva-aterialov/teploizolyatsiya/teploprovodnost-plotnost-i-temperatura-primeneniya-teploizolyatsii-na-osnove-aerogelya>

119. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010 Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT).

120. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT).

121. ДСТУ-Н Б EN 1999-1-2:2010 Єврокод 9. Проектування алюмінієвих конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1999-1-2:2007, IDT).
122. Вахитова Л.Н., Калафат К.В. Огнезащита стальных конструкций. - Украинский центр стального строительства. – 2013. - 150 с.
123. Калафат К.В., Билык А.С., Беляев Н.А., Ковалевская Э.А.. Расчет огнестойкости стальных конструкций и проектирование огнезащиты в соответствии с Еврокодом 3 и национальными приложениями Украины. - Украинский центр стального строительства. – 2014. - 83 с.
124. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967.- 600 с.
125. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
126. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
127. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел.. – М.: Наука, 1974. – 294 с.
128. Ненахов С.А., Пименова В.П. Терминологические проблемы в области огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность. - 2012. - Т.21., №10. - С. 41-47.
129. Ненахов С.А., Пименова В.П. Влияние концентрации газообразующего агента на закономерности развития пенококса огнезащитных составов // Пожаровзрывобезопасность. - 2010. - Т.19., №3. - С. 14-26.
130. Zav'yalov D.E., Zyбина O.A., Chemova N.S., Varlamov A.V., Mnatsakanov S.S. Pire Intumescent compositions Based on the Intercalated Graphite // Russian Journal of Applied Chemistry. - 2010. - V.83, № 9. - P. 1679-1682.
131. Балакин В.М., Селезнев А.М., Белов В.В. Сравнительная оценка огнезащитных свойств вспенивающихся покрытий на основе фосфатов аммония и водорастворимых аммонийных солей аминотимленфосфоновых кислот // Пожаровзрывобезопасность. - 2014. - Т. 23, № 11. - С. 34–41.

132. Киреев А.А., Чернуха А.А. Подбор гелеобразующих систем для получения вспучивающихся огнезащитных покрытий // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Х., 2008. – Вып. 24. – С. 54–60.

133. Беликов А.С., Шаломов В.А., Трифонов И.В., Борсук Е.В., Дзецина Е.В. Внедрение средств огнезащиты для повышения огнестойкости строительных конструкций // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2015. – №20. – С. 19-26.

134. Maciulaitis R., Grigonis M., Malauskienė J. The impact of the aging of intumescent fire protective coatings on fire resistance // Fire Safety Journal. – 2018. – V. 98. – P. 15-23.

135. Теплоухов А.В., Зверев В.Г., Гаращенко А.Н. Методика и результаты оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность. - 2016. - Т.25., №1. - С. 9-16.

136. Гравит М.В. Оценка парового пространства пенококса огнезащитных вспучивающихся покрытий // Пожаровзрывобезопасность. - 2013. - Т.22., №5. - С. 33-38.

137. Натейкина Л.И. Минимальная толщина огнезащитного покрытия вспенивающегося типа // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2016. - № 3. –С. 22-24.

138. Ненахов С.А., Пименова В.П. Физико-химия вспучивающихся огнезащитных покрытий на основе полифосфата аммония // Пожаровзрывобезопасность. - 2010. - Т.19., №8. - С. 11-58.

139. Круковский П.Г., Григорьян Б.Б., Цвиркун С.В. Определение теплофизических характеристик вспучивающегося огнезащитного покрытия методом обратных задач теплопроводности // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2008.- № 1. – С. 49-54.

140. Круковский П.Г., Ковалев А.И. Методика определения характеристики огнезащитной способности вспучивающихся огнезащитных

покрытий на бетонных перегородках расчетно-экспериментальным методом // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2011. – № 7. – С. 170-184.

141. Григорьян Н.Б., Полищук В.Д., Круковский П.Г., Новак С.В. Оценка огнезащитной способности вспучивающегося огнезащитного покрытия «ФЕНИКС СТС» // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2014. – №17. – С. 34-38.

142. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход). – К.: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 224 с.

143. Баженова Е.Н. Математическое моделирование физико-химических процессов во вспучивающихся огнезащищенных полимерных материалах: автореф. канд. физ.-мат. наук. – Ижевск: Ижевский гос. техн. Ун-т., 2002. – 23 с.

144. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Рудзинский В.П. Математическое моделирование работы водосодержащих вспучивающихся огнезащитных покрытий // Пожаровзрывобезопасность. - 2003. - Т. 12., №1. -.С. 39-46.

145. Одяг пожежника захисний. Загальні технічні вимоги та методи випробувань: ДСТУ 4366:2005 [Чинний від 2005-01-07]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 35 с. – (Національний стандарт України).

146. Специальная защитная одежда пожарных от повышенных тепловых воздействий. Общие технические требования. Методы испытаний: НПБ – 161:97. - [Введен 1997-01-12]. – М., ВНИИПО МВД России, 1997. – 47 с.

147. Болібрух Б.В. Удосконалення методів оцінки показників якості спеціальних матеріалів захисного одягу пожежників: Автореф. дис. канд. техн. наук: 21.06.02 / Б.В. Болібрух ; Львів. ін-т пожеж. безпеки. - Л., 2004. - 19 с. - укр.

148. Лин А.С., Мичко А.А., Штайн Б.В., Бормецкий А.М. Обґрунтування розміщення контрольних точок для визначення температури підкостюмного простору на манекені // Пожежна безпека. - 2013. - №22. - С. 167-171.

149. Лин А.С., Мичко А.А., Клим'юк М.М., Івахов А.В. Удосконалення обладнання та методики полігонних випробувань для оцінювання термозахисних властивостей захисного одягу пожежників // Пожежна безпека. - 2012. - №20. - С. 98-104.

150. Лиин А.С. Обґрунтування способу оцінки термозахисних властивостей захисного одягу пожежників // Пожежна безпека: теорія і практика. - 2014. - №16. - С. 67-71.

151. Ковалишин В.В. Розробка сигналізатора теплового потоку для захисного одягу пожежників: автореф. дис. канд. техн. наук: 21.06.02 / В.В Ковалишин; Держ. служба України з надзвичайн. ситуацій, Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. - Львів, 2014. - 16 с. - укр.

152. Болібрux Б.В., Штайн Б.В., Лозинський Р.Я., Лин А.С., Васютяк А.О. Визначення температурних режимів підкостюмного простору теплозахисного одягу пожежника під час гасіння пожеж в закритих приміщеннях // Пожежна безпека. - 2013. - №22. - С. 24-31.

153. Штайн Б.В., Болібрux Б.В., Лозинський Р.Я. Теоретичне обґрунтування поширення теплоти в пакеті матеріалів та повітряному прошарку захисного одягу // Науковий вісник УкрНДІПБ. - 2012. - №2. - С. 150-155.

154. Гаврило О.А. Математичне моделювання нестационарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з водольодяною системою охолодження // Пожежна безпека: Зб. наук. праць, ЛПБ; УкрНДІПБ МНС України.– Львів, 2002.– №3.– С. 76-82.

155. Гаврило А.А., Марийчук И.Ф., Ревякін А.В. Теоретические исследования динамики расхода жидкости в системе охлаждения ног пожарного // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2002. – №2. – С. 217-222.

156. Вольський В.А., Гаврило А.А., Марийчук И.Ф. Энергетические показатели пожарных при передвижении в аварийной обстановке // Горноспасательное дело: Сб.науч.тр. НИИГД “Респиратор”. – Донецк, 2003. – С. 51-56.

157. Гаврило А.А., Болибрух Б.В., Карпекин В.В. Допустимая продолжительность работы при эрготермических нагрузках // Пожежна безпека: Зб. наук. праць, ЛПБ; УкрНДІПБ МНС України.– Львів, 2003.– №3.– С. 101-106.

158. Гаврило А.А. Моделирование динамики температур в системах местного охлаждения защитной одежды пожарных // Пожежна безпека: Зб. наук. праць, ЛПБ; УкрНДІПБ МНС України.– Львів: 2004.– №4.– С. 20-25.

159. Гаврилко О.А. Обґрунтування параметрів захисного одягу для застосування під час проведення пожежно-рятувальних робіт: Автореф. дис. канд. тех. наук: 21.06.02 / О.А. Гаврилко ; Укр. НДІ пожеж. безпеки. - К., 2004. – 25 с. - укр.

160. Клименко Ю.В. Теоретические основы тепловых расчетов противотепловой одежды для горноспасателей // Науковий вісник ГНА України. – Дніпропетровськ, 2001. – №3. – С. 70-73.

161. Клименко Ю.В., Марийчук И.Ф., Карпекин В.В. Определение параметров водоледяного аккумулятора холода для противотепловой одежды горноспасателей // Науковий Вісник НГАУ України. – Дніпропетровськ, 2002. – С. 62–68.

162. Костенко В.К. Обґрунтування шляхів підвищення захисту рятувальників від теплового ураження // Вісті Донецького гірничого інституту. - 2015. – №1(36)-2(37). – С. 74-81.

163. Гаврилко О.А. Математична модель тепломасопереносу в газотеплозахисному костюмі з водольодяними акумуляторами холоду // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - №627. - С. 38-40.

164. Havrylko A., Bilinskiy B., Dendarenko Y. Processes of heat and mass transfer in gas and heat protective suit with ice-water cold-storage accumulators // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. - №888. - С. 43-51.

165. Пат. 2264242 Российская Федерация, МПК7 А 62 С 5/033. Способ тушения пожара и состав для его осуществления / Борисов П.Ф., Росоха В.Е., Абрамов Ю.А., Киреев А.А., Бабенко А.В.; заявитель и патентообладатель Академия пожарной безопасности Украины. – №2003237256/12; заявл. 23.12.2003; опубл. 20.11.10.2005, Бюл. №32.

166. Кіреєв О.О., Бабенко О.В. Обґрунтування вибору систем для дослідження явища гелеутворення при розробці нових рідинних засобів пожежогасіння // Проблеми пожарной безопасности. – 2002. – Вып. 12. – С. 107-110.

167. Киреев А.А., Романов В.Н., Тарасова Г.В. Исследование концентрационных областей быстрого гелеобразования в огнетушащих системах на основе силиката натрия // Проблеми пожарной безопасности. – 2004. – Вып. 15. – С. 190-194.

168. Кіреєв О.О. Вогнезахисні властивості силікатних гелеутворюючих систем // Науковий вісник будівництва.. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2006. – Вип. 37. – С. 188-192.

169. Кіреєв О.О., Муравйов С.Д., Бабенко О.В. Використання гелеутворюючих для попередження, локалізації та ліквідації пожеж та загорянь // Хранение и переработка зерна. – 2003. – №12(54). – С. 52-54.

170. Гудович О.Д., Лагода О.В. Багатоплановість випробувань вогнезахисних засобів для деревини // Наук. вісн. УкрНДІПБ. – К., 2002. – №2(6). – С. 205–208.

171. Чернуха А.А., Киреев А.А., Тарасова Г.В. Влияние состава покрытия и условий нанесения на целостность огнезащитного покрытия // Проблеми пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Х., 2007. – Вып. 21. – С. 292-296.

172. Киреев А.А., Жерноклёв К.В., Савченко А.В. Перспективные направления снижения экономического и экологического ущерба при тушении пожаров в жилом секторе // Науковий вісник будівництва: [зб. наук. праць]. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ, АБУ, 2005. – Вип. 31. – С. 295–299.

173. Киреев А.А., Щербина О.Н., Савченко А.В. Пути совершенствования методов тушения пожаров в жилом секторе // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков: АО “Фолио”, 2004 – Вып. 16. – С. 90-94.

174. Киреев А.А., Жерноклёв К.В., Савченко А.В. Перспективные направления снижения экономического и экологического ущерба при тушении пожаров в жилом секторе // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. – Харків: ХДТУБА, ХОТБ, АБУ, 2005. – Вип. 31– С. 295–299.

175. Савченко О.В., Кіреєв О.О., Альбоций В.М., Данільченко В.А. Дослідження вогнезахисної дії гелевих плівок на матеріалах, розповсюджених у житловому секторі // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков: УГЗУ, 2006. – Вып. 19. – С. 127–131.

176. Кіреєв О.О., Савченко О.В., Тарасова Г.В., Александров О.В. Дослідження теплозахисної дії гелевих плівок // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков: АО “Фолио”, 2005. – Вып. 18. – С. 82-86.

177. Савченко О.В., Кіреєв О.О., Луценко Ю.В. Вогнезахисна дія гелеутворюючої системи силікат натрію-хлорид кальцію на вироби з текстилю // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Харьков: УГЗУ, 2007. – Вып. 21. – С. 228-233.

178. Киреев А.А., Тарасова Г.В., Жерноклёв К.В. Исследование массовой скорости выгорания древесины огнезащитной гелеобразующей системой $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 - \text{MgCl}_2$ // Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Хімія, хімічна технологія та екологія. 2006. – №43. – С. 65-70.

179. Чернуха А.А., Киреев А.А., Бондаренко С.Н., Кириченко А.Д. Исследование огнезащитной эффективности покрытий на основе ксерогелевой композиции // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Х., 2009. – Вып. 26. – С. 166-171.

180. Киреев А.А., Чернуха А.А., Кириченко А.Д. Термогравиметрические исследования огнезащитного действия ксерогелевых

покрытий для древесины // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Х., 2008. – Вып. 23. – С. 73-78.

181. Чернуха А.А. Экспериментальное исследование температуропроводности вспучивающихся огнезащитных покрытий для древесины // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – Х., 2011. – Вып. 30. – С. 263–267.

182. Чернуха А.А., Киреев А.А., Скородумова О.Б. Исследование процессов формирования огнезащитного покрытия // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”: зб. наук. пр.; тематичний випуск “Хімія, хімічна технологія та екологія”. – Х., 2009. – Вип. 40. – С. 32–37.

183. Киреев А.А., Савельев Д.И. Гелеобразные покрытия – эффективные средства оперативной огнезащиты. Обзор // Пожежна безпека: теорія і практика: зб. наук. пр. – Черкаси, 2015. – Вып. 20. – С. 33-41.

184. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарных парках. М.: ВНИПО, 2000. - 79 с.

185. НАПБ 05.035-2004. Інструкція щодо гасіння пожеж в резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. Київ: УНДІПБ. 2004. - 79 с.

186. Руководство по тушению нефти и нефтепродуктов в резервуарах и резервуарных парках. М.: ВНИИПО, 1999. - 46 с.

187. Статут дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби. Київ, МНС України. - 2012. - 42 с.

188. Баратов А.Н., Иванов Е.Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: Химия. 1979. - 368 с.

189. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. - 264 с.

190. Carlson G.P. What's all the talk about class A foam? // Fire Eng. - 1991. - V. 144, № 10. - P. 10–12.

191. Антонов А.В., Боровиков В.О., Орел В.П. та ін. Вогнегасні речовини: посібник. К.: Пожінформтехніка, 2004. - 176 с.
192. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П., Воевода С.С., Шароварников С.А. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов. М.: Калан, 2002. - 448 с.
193. Ковалишин В.В., Васильєва О.Е., Козяр Н.М. Пінне гасіння. Львів: СПОЛОМ, 2007. С. 137-138.
194. Бобков С.А., Бабурин А.В., Комраков П.В. Физико-химические основы развития и тушения пожаров: учеб. пособ. М.: АГПС МЧС РФ, 2014. - 210 с.
195. Ivanković T., Hrenović J. Surfactants in the environment // Arh. Hig. Rad. Toksikol. - 2010. - Vol. 61. №1. - P. 95-110.
196. Olkowska E., Polkowska Ż., Namieśnik J. Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges // Chem. Rev. - 2011.- Vol. 111. №9. - P. 5667–5700.
197. Scott M.J., Jones M.N. The biodegradation of surfactants in the environment // Biochim. Biophys. Acta. - 2000. - Vol. 1508. №1-2. - P. 235-251.
198. Ying G.G. Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment // Environ. Int. - 2006. - Vol. 32. №3. - P. 417-431.
199. Щербань Н.Г. Биохимические механизмы нарушений в организме теплокровных под воздействием химических соединений // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2012. - № 5/6 (59). - С. 29-33.
200. Щербань Н.Г., Жуков В.И., Мясоедов В.В. Биохимические аспекты экологической патологии, связанной с химическим загрязнением поверхностных источников водоснабжения. – Харьков, 2011. – 175 с.
201. Деденко М.М., Машович А.Я., Зяятдинов О.М. Исследование твердеющих пен, предназначенных для ликвидации последствий аварий на ОАО «Сибреактив». [Текст] // Проблемы деятельности правоохранительных органов и Государственной противопожарной службы: Труды Всероссийской науч.-практ. конф. - Иркутск.: В СИ МВД РФ. – 2001. - С. 190-191.

202. Деденко М.М., Машович А.Я. Предотвращение чрезвычайных ситуаций при разливах нефтепродуктов быстротвердеющими пенами [Текст] // Деятельность правоохранительных органов и ГПС в современных условиях, проблемы и перспективы развития. Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. - Иркутск.: В СИ МВД РФ. - 2004. - С. 172-175.

203. Деденко М.М. Снижение загрязнения атмосферы при аварийных разливах горючих жидкостей. [Текст]: Науч.-практ. журн. // Вестник В СИ МВД России. - 2005, № 4 (35) - С. 75-80.

204. Вспененный гель кремнезема, применение вспененного геля кремнезема в качестве огнетушащего средства и золь-гель способ его получения. Пат. 2590379 RU. Абдурагимов И.М., Виноградов А.В., Виноградов В.В. и др. Заяв. ООО «СОПОТ». №2015110625/05; 26.03.2015; опубл. 10.07.2016, Бюл. №19.

205. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Пути повышения экологических характеристик средств тушения горючих жидкостей // Техногенно-экологична безпека. – 2017. – №1. – С. 39-43.

206. Дадашов И.Ф., Лобойченко В.М., Киреев А.А. Сравнительная оценка экологического ущерба при использовании гелеобразующих систем различного состава в пожаротушении горючих жидкостей // Вісник КрНУ ім. Остагоградського. – 2018. – Вып. 1(108). – С. 123-129.

207. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам органических токсичных жидкостей // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2017. – Вып. 25. – С. 22-27.

208. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Исследование изолирующих свойств гелеобразного слоя по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей // “Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку”, Матеріали 19 Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ. – 2017. – С. 136-139.

209. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Жерноклёв К.В., Трегубов Д.Г., Ковалёв А.А. Экспериментальное исследование влияния скорости ветра на

изолирующие свойства гелеобразного слоя по отношению к парам токсичных и горючих жидкостей // Проблемы надзвичайних ситуацій. – 2018. – Вып. 27. – С. 17-24.

210. Купка В.Ю., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Пути повышения эффективности тушения пожаров класса В // Проблемы пожарной безопасности. - 2012.- №31. - С. 105–108.

211. Купка В.Ю., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Исследование стойкости гелевых слоёв на поверхностях горючих жидкостей // Проблемы пожарной безопасности. - 2012. - №32. - С. 84-88.

212. Купка В.Ю., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Выбор носителя для обеспечения плавучести гелеобразного слоя на поверхности горючих жидкостей // Проблемы пожарной безопасности. - 2013. - №33. – С. 98–103.

213. Popov M., Zakrevskaya M. L., Vaganov V. Performance of Lightweight Concrete based on Granulated Foamglass // Sci. Eng. – 2017. – v. 96. –N1. – P. 1-7.

214. Limbachiya M., Meddah M.S., Fotiadou M.S. Performance of granulated foam glass concrete // Construction and Building Materials. – 2011. – v. 28 – P. 759-768.

215. Ящишин Й.М., Вакула Я.І., Жеплинський Т.Б. та ін. Технологія скла; за ред. Й.М. Ящишина. Ч.ІІІ: Технологія скляних виробів [підруч.]. - Львів: «Растр-7», 2011. - 416 с.

216. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.

217. Орлов Д.Л. Пеностекло – теплоизоляционный материал XXI века // Стекло мира. 2003. №2. С. 69-70.

218. Щукіна Л.П., Рищенко М.І., Міхеєнко Л.О. та ін. Технологічні параметри отримання легкого керамзиту методом екструзії // Вісник НТУ «ХПІ». - 2015. - №50. - С. 127-133.

219. Скло для отримання піноматеріалу. Пат. 62750 Україна. Рищенко М.І., Міхеєнко Л.О., Щукіна Л.П. та ін.; заяв. та патентовл. НТУ «ХПІ». № u 201102441; заявл. 01.03.2011; опубл. 12.09.2011, Бюл. №17. 4 с.

220. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Михеенко Л.А. Выбор лёгкого силикатного носителя для гелевого огнетушащего слоя при пожаротушении // Керамика: наука и жизнь. – 2016. – №2(31). – С. 44-51.

221. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование испарения бензина через слой гранулированного пеностекла // Проблемы пожарной безопасности. – 2017. – Вып. 42. – С. 27-31.

222. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Исследование испарения бензина через слой гранулированного пеностекла // “Пожежна безпека. Проблеми та перспективи”, Збірник доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції, Харків. – 2018. – С. 3-5.

223. Дадашов И.Ф., Киреев А.А. Экспериментальне дослідження впливу шару гранульованого піноскла на горіння бензину // Пожежна безпека. – 2017. – Вып. 31. – С. 36-42.

224. Дадашов И.Ф. Экспериментальное исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение органических жидкостей // Проблемы пожарной безопасности. – 2018. – Вып. 43. – С. 38-44.

225. Дадашов И.Ф., Трегубов Д.Г., Киреев А.А., Тарахно Е.В. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение жидких углеводородов // Вестник Кокшетавского технического института комитета по ЧС МВД республики Казахстан. – 2018. – №4(32). – С. 47-54.

226. Дадашов И.Ф. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение жидкостей ряда алканов // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, №3. – С. 320-326.

227. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Жерноклёв К.В. Исследование влияния толщины слоя гранулированного пеностекла на горение органических жидкостей // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції “Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій”, ЧПБ НУЦЗУ, Черкаси. – 2018. – С. 165-167.

228. Дадашов И.Ф., Шаршанов А.Я., Киреев А.А. Замедление испарения жидкости слоем гранулированного материала, нанесенного на её поверхность // Проблемы пожарной безопасности. - 2017. - Вып. 41. - С.53-58.

229. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. - М.: Наука, 1967.- 491 с.

230. Дадашов И.Ф., Киреев А.А., Трегубов Д.Г. Экспериментальное исследование скорости выгорания и условий тушения модельного очага пожара класса В при поочередном применении гранулированного пеностекла и гелеобразующего огнетушащего вещества // Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. – 2018. – №2(6). – С. 70-78.

231. Пат. 123563 UA. Спосіб гасіння резервуарів з горючими та легкозаймистими рідинами / Дадашов І.Ф., Кіреєв О.О., Тарадуда Д.В. – заявник і патентовласник НУЦЗУ. – №201710836. Заявл. 06.11.2017; Надр. 26.02.2018; Бюл. 4. – 4 с.

232. Пат. 128050 UA. Спосіб гасіння пожеж горючих та легкозаймистих рідин в резервуарах / Дадашов І.Ф., Ковальов О.О., Кіреєв О.О. – заявник і патентовласник НУЦЗУ. – №201804056. Заявл. 13.04.2018; Надр. 27.08.2018; Бюл. 16. – 3 с.

233. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. - М.: ВПТШ МВД СССР, 1987.- 440 с.

234. Аветисян В.Г., Шаршанов А.Я. Особенности использования пневматической подушки при работе с нагретыми поверхностями // Проблемы пожарной безопасности Сб. науч. тр.- Харьков: АЦЗУ.- Вып. 16.-Харьков: Фолио, 2004. – С. 25-30.

235. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. М.: Академия ГСП МВД России, 2000. – 118 с.

236. Батцер Г. Введение в химию высокомолекулярных соединений [Текст]: [перевідне видання]; пер. с нім.: Л.С. Гальбрайха, Л.З. Роговиной ; під ред. З.А. Роговина. – Москва: Вид-во іностр. літ., 1960. – 256 с.

237. Вихорева Г.А., Роговина С.З., Акопова Т.А., Зеленецкий С.Н., Гальбрайт Л.С. // Высокомол. соед. Б. - 1996. - Т. 38. - Л 10. – С. 1781.
238. Federal Register. 14 CFR Part 25 – Airworthness standards. Transport category air-planes / Federal Aviation Administration. Certification Specifications for Large Aero-planes – CS-25 /ED Decision 2003/2/RM Final 17/10/2003 /In: European Aviation Safety Agency. 2003. – 473 p.
239. Спэрроу Э.М., Сэсс Р.Д. Теплообмін излучением. – Л.: Энергия, 1971. – 294 с.
240. Поповский Д.В., Охломенко В.Ю. Боевая одежда и снаряжение пожарного: Методическое пособие. Под общей редакцией В.А. Грачева - М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. – 86 с.
241. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Т. 7. Теория упругости. - М.: Наука, 1987. – 248 с.
242. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Т. 6. Гидродинамика. - М.: Наука, 1986. – 736 с.
243. Абрамов Ю.А., Киреев А.А., Щербина О.Н. Термогравиметрическое исследование огнезащитного действия на древесину гелей системы $MgCl_2 + Na_2O \cdot 2,7SiO_2$ // Пожежна безпека. – 2006. - №9. - С. 42-47.
244. Киреев А.А., Романов В.Н., Александров А.В. Определение областей быстрого гелеобразования в огнетушащих системах: $Na_2O \cdot nSiO_2 = MgCl_2 - H_2O$ и $Na_2O \cdot nSiO_2 - FeSO_4 - H_2O$ // Проблемы пожарной безопасности. – 2004. – Специальный выпуск. – С. 34–37.
245. Ross R.H., Honkohen D.L., Salaymeh S.R. // Trans. Amer. Nucl. Soc. -1991. - V. 63. – P. 218-220.
246. Абрамов Ю.О., Кіреєв О.О., Щербіна О.М. Дослідження впливу товщини шару гелю на його вогнегасні властивості // Пожежна безпека. – 2006. - № 8. - С. 159-162.
247. Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.

248. Лаптев Г.Ф. Элементы векторного исчисления. – М.: Наука, 1975. – 336 с.
249. Назаров О.О., Кулешов М.М. Пожежогасіння та аварійно-рятувальні роботи. Довідник. – Х.: АЦЗУ, 2006. – 376 с.
250. Аварії на радіаційно, хімічно та біологічно небезпечних об'єктах. Довідник / Грек А.М., Сакун О.В., Григорєв О.М. та ін. – Х.: ФВП НТУ «ХП», 2012. – 172 с.
251. Довідник рятувальника. / За загальною редакцією В.І. Балогі. – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 712 с.
252. Бочаров В.В., Раевская М.В. Использование перфторированных ПАВ в пенообразователях – «второе пришествие». Галогенорганика с наихудшим сценарием развития для обитателей земли // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, №10.– С. 75-82.
253. Безродный И.Ф. Экология пожаротушения – пока это только слова // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, №6. – С. 85-90.
254. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1974. – 352 с.
255. Справочник химика. / Под ред. Б.Н. Никольского. – [2-е изд.]. – Т-2. - Ленинград: Госхимиздат, 1963. —1169 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця 1

Характерні величини фізичних параметрів деяких речовин і матеріалів

Найменування речовин і матеріалів	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/}(\text{м}\cdot\text{К})$	$c'_p, \text{МДж/}(\text{м}^3\cdot\text{К})$	$a, 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$	$\sqrt{\lambda \cdot c'_p}, \text{кДж/}(\text{с}^{0,5}\cdot\text{м}^2\cdot\text{К})$	$\tau_0 = \frac{h^2}{a}, \text{с}$ ($h=1 \text{ см}$)	Межова темпер. викорис тання, $^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Метали та сплави							
Алюміній	0	210	2,3	91	22	1,1	
	100	205	2,5	82	23	1,2	
	300	230	2,8	82	25	1,2	
Дюралюміній (Al-95.5%, Cu – 4%, Mn – 0.5%)	20	165	2,5	66	20	1,5	
Залізо	20	67,5	3,6	19	16	5,3	
	200	61,2	3,8	16	15	6,3	
	600	43,8	4,4	10	14	10	
Латунь (Cu – 70%, Zn – 30%)	20	108	3,3	33	19	3,0	
Мідь	20	396	3,4	120	37	0,83	
	100	392	3,5	110	37	0,91	
	600	345	4,0	86	37	1,2	
Олово чисте	20	64	1,6	40	10	2,5	
Срібло	20	410	2,6	160	33	0,63	
Свинець	20	34,6	1,5	23	7,2	4,3	
Сталь вуглецева (C – 1%)	0	58	3,6	16	14	6,3	
	800	24	7,3	3,3	13	30	
Сплав інвар	20	10,7	3,7	2,9	6,3	34	
Чавун (C – 4%)	20	52	3,1	17	13	5,9	
Будівельні матеріали							
Аглоперліто-бетон	100	0,70	1,5	0,47	1,0	210	
Бетон на гранітному щебені	100	1,53	1,8	0,85	1,6	120	100
Бетон на вапняному щебені	100	1,35	1,8	0,75	1,6	130	100

1	2	3	4	5	6	7	8
Бетон піщаний	100	0,99	1,6	0,62	1,3	160	100
Газобетон на молотому піску	100	0,10	0,47	0,21	0,22	480	100
Керамзитобетон	100	0,24	0,87	0,28	0,47	360	100
		0,26	0,95	0,27	0,50	370	
		0,39	1,4	0,28	0,74	360	
Перлитобетон	100	0,30	1,0	0,30	0,55	330	100
Пісок сухий	0 - 40	0,35	1,1	0,32	0,62	310	
Пісок вологий (W = 10%)	0 - 40	0,66	2,8	0,24	1,4	420	
Скло звичайне	20 - 80	0,8	1,7	0,47	1,2	210	80
Цегла червона	100	0,47	1,4	0,34	0,81	290	100
Цегла силікатна	100	0,82	1,6	0,51	1,1	200	100
Штукатурка цементна	20	1,1	1,5	0,73	1,3	140	100
Штукатурка вапняна	0	0,7	1,3	0,54	0,95	190	100
Вогнетривкі, теплоізоляційні та інші матеріали							
Цегла динасова	500	1,3	1,6	0,81	1,4	120	1700
Цегла шамотна	500	1,1	1,8	0,61	1,4	160	1350
Ксерогель (сухий гель)		0,25	0,25	1,0	0,25	100	
Гума технічна	20	0,146	2,4	0,06 1	0,59	1600	-45 ÷ +90
Дереви на при потоці тепла	поперек волокон		0,17		0,11	0,50	910
	вздовж волокон	20	0,48	1,5	0,32	0,85	310
Пробкові плити	20	0,048	0,31	0,15	0,12	670	
Текстоліт	20	0,28	2,0	0,14	0,75	710	-60÷ +125

Додаток Б

Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні термічно товстого тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при пожежі у приміщенні

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) Спочатку у текст файла «GoCallback0.m» вводяться чисельні значення всіх параметрів захисного тіла і покриття.

3) Потім активується файл «Start15.m» і за допомогою інтерфейса, що з'явиться, вводяться всі параметри, що задають розвиток пожежі у приміщенні, і час розгляду. Після натиску кнопки «Поїхали» програма почне обраховуватися і далі видасть результат (графіки залежностей параметрів від часу пожежі).

```
.....
function cg=cpm(y)
% average total gas heat, j/(kgm*K)
global cp4 cp5 cp6 cp7 cp8 cp9 cp10 cp_t
cg=(y(4)*cp4+y(5)*cp5+y(6)*cp6+y(7)*cp7+y(8)*cp8++y(9)*cp9++y(10)*cp10+y(11)*cp_t)./y(1)
;
```

```
.....
function d22=d2(y1,y2,y3)
% друга різн. у,   y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "y"
%-----
d22=y1+y3-2*y2;
```

```
.....
function Data0 %GUI
%----- global variables -----
global hFig0 hEd01 hBut00 hFig1 hFig2
%----- figure and axes -----
% First axes for graphing
hFig0=figure('Position',[80 80 600 390],
'Name','Моделюван. динаміки НФП - основне вікно', 'HandleVisibility','Callback',
'Menubar','none', 'CloseRequestFcn','MyClose', 'Tag','tag_fig0');
hAxes01=axes('Parent',hFig0,'Color',[1 1 1], 'Units','pixels','Position',[10 20 360
288],'FontSize',10,'Visible','off');
%-----paint picture-----
TX=imread('Paint_fire.jpg','jpg'); image(TX); set(hAxes01,'TickDir','out')
col=get(hFig0,'Color'); set(hAxes01,'XColor',col); set(hAxes01,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
```

```

xfm1=385; yfm1=115;
hFm01=uicontrol(hFig0,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
200 190]); hTxtFm01=uicontrol(hFig0,'Style','text', 'BackgroundColor',[0.7 0.7
0.7], 'Position',[xfm1+10 yfm1+160 180 20], 'FontSize',12, 'String','Ввод початкових даних');
hEd01=uicontrol(hFig0,'Style','edit', 'BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+75 yfm1+10 60
20], 'HorizontalAlignment','left'); hTxtEd01=uicontrol(hFig0,'Style','text', 'BackgroundColor',[0.7
0.7 0.7], 'Position',[xfm1+45 yfm1+30 120 20], 'String','Часовий інтервал, с');
%----- pushbuttons -----
hBut01=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[xfm1+10 yfm1+110 180 40],
'String','Приміщен. і газообмін', 'Callback','GoData1');
hBut02=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[xfm1+10 yfm1+60 180 40],
'String','Осередо пожежі і газове гасін.', 'Callback','GoData2');
%----- pushbutton -----
hBut00=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[440 45 100 40], 'String','ПОЇХАЛИ',
'Callback','GoCallback00');
%----- text field -----
hTxt01=uicontrol(hFig0,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[100 330 400
50], 'FontName','Arial Cyr', 'FontSize',16, 'String','Визначен. Небезпечних факторів пожежі в
інтегральній моделі');

.....
function Data1 %GUI - вікно вводу даних газообміну
%----- global variables -----
global hEd01 hFig1
global hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
%----- figure and axes -----
hFig1=figure('Position',[100 100 670 400], 'Name','Моделюван. динаміки НФП – заданн.
параметрів газообміну ', 'Menubar','none', 'Tag','tag_fig1');
hAxes11=axes('Parent',hFig1,'Color',[1 1 1], 'Units','pixels', 'Position',[5 55 440 325], 'FontSize',10,
'Visible','off');
%----- paint picture -----
TX=imread('Fire_vent.jpg','jpg');
image(TX); set(hAxes11,'TickDir','out')
col=get(hFig1,'Color'); set(hAxes11,'XColor',col); set(hAxes11,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
xfm1=455; yfm1=315;
hFm11=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
210 65]);
hTxtFm11=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+15
yfm1+45 180 15], 'String','Температура повітр., C');
hEd101=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+30 yfm1+5 60
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd01=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+30
yfm1+25 60 15], 'String','внешнего');
hEd102=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+125 yfm1+5 60
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd02=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+125
yfm1+25 60 15], 'String','початкова ');
%----- 2-nd frame -----
xfm2=455; yfm2=240;
hFm12=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm2 yfm2
210 65]);

```

```

hTxtFm12=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+15
yfm2+45 180 15],'String','Витрата примусової вентиля, м3/с');
hEd103=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+30 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd03=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+30
yfm2+25 60 15],'String','припл., W+');
hEd104=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+125 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd04=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+125
yfm2+25 60 15],'String','відт., W-');
%----- 3-th frame -----
xfm3=455; yfm3=165;
hFm13=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm3 yfm3
210 65]);
hTxtFm13=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm3+15
yfm3+45 180 15],'String','Розміри приміщен. ');
hEd105=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm3+15 yfm3+5 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd05=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm3+15
yfm3+25 50 15],'String','A, м');
hEd106=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm3+80 yfm3+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd06=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm3+80 yfm3+25 50 15],'String','B, м');
hEd107=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm3+145 yfm3+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd07=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm3+145 yfm3+25 50 15],'String','H, м');
%----- 4-th frame -----
xfm4=455; yfm4=50;
hFm14=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75],...
'Position',[xfm4 yfm4 210 105]);
hTxtFm14=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+85 180 15],'String','Параметри отворів');
hEd108=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd08=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+65 50 15],'String','c1, м');
hEd109=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+80 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd09=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+80 yfm4+65 50 15],'String','h1, м');
hEd110=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+145 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd10=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+145 yfm4+65 50 15],'String','b1, м');
hEd111=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd11=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+25 50 15],'String','c2, м');
hEd112=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+80 yfm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');

```



```

hTxtEd12=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[x_fm4+80 y_fm4+25 50 15],'String','h2, м');
hEd113=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[x_fm4+145 y_fm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd13=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[x_fm4+145 y_fm4+25 50 15],'String','b2, м');
%----- one pushbutton -----
hBut11=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton', 'Position',[120 15 150 30],...
    'String','Повернен. до основного вікна','Callback','Goback0');

```

```

function Data2

```

```

% інтегр. модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% газообмін крізь два отвори, примусова ventilation
%----- global variables -----
global hFig2 hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupmenu2 hFm231 hRbut21 hRbut22
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%----- figure and axes -----
hFig2=figure('Position',[60 60 665 390], 'Name','Моделюван. динаміки НФП - параметри, що
задають осередок пожежі і гасін.', 'Menubar','none', 'Tag','tag_fig2');
hAxes21=axes('Parent',hFig2,'Color',[1 1 1],'Units','pixels', 'Position',[95 290 211 92],'FontSize',10,
'Visible','off');
%----- paint picture -----
TX=imread('Fire_formula.jpg','jpg'); image(TX); set(hAxes21,'TickDir','out')
col=get(hFig2,'Color'); set(hAxes21,'XColor',col); set(hAxes21,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
x_fm1=395; y_fm1=10;
hFm21=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm1 y_fm1
260 380]);
%----- one pushbutton -----
hBut21=uicontrol(hFig2,'Style','pushbutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+30
y_fm1+345 205 30],'FontSize',14,'String', 'Параметри пального', 'Callback','FuelProperty');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+335 240 4]);
hEd201=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+305 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd01=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+300 180 30], 'String','Питома теплота згор. - Qн, кДж/кг');
hEd202=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+265 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd02=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+260 180 30], 'String','Питома швидкість вигор. - um, кг/(м2 с)');
hEd203=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+230 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd03=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+230 180 20], 'String','Коефіцієнт повноти згор. - kсг');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+220 240 4]);
hEd204=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+190 60
20],'HorizontalAlignment','left');

```

```

hTxtEd04=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+185 180 30],'String','Димоутворююча здатність. - D, Нп м2/кг');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+175 240 4]);
hEd205=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+135 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd05=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+125 180 40],'String','Маса кисню, для повного згор. 1 кг пального - L_O2, кг/кг');
hTxtEd20_6_7_8_9=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],
'Position',[xfm1+10 yfm1+85 240 30], 'String','Маса газу, що виділ. при повному згор. 1 кг
пального, кг/кг');
hEd206=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+10 yfm1+45 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd06=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+65 50 15], 'String','L_CO2');
hEd207=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+73 yfm1+45 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd07=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+73
yfm1+65 50 15], 'String','L_CO');
hEd208=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+199 yfm1+45 50
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd08=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+199
yfm1+65 50 15], 'String','L_H2O');
hEd209=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+136 yfm1+45 50
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd09=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+136
yfm1+65 50 15], 'String','L_HCl');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+30 240 4]);
hEd210=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd10=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+5 180 20], 'String','Повна маса пального, кг');
%----- 2-nd frame -----
xfm2=15; yfm2=195;
hFm22=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm2 yfm2
365 85]);
hTxtFm21=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+10
yfm2+30 345 50], 'FontSize',14, 'String','Параметри, що задають площу пожежі');
hEd211=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+55 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd11=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+5 yfm2+5
50 20], 'String','F0, м2');
hEd212=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+175 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd12=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+125
yfm2+5 50 20], 'String','F1, м2/c');
hEd213=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm2+295 yfm2+5 60 20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd13=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm2+245 yfm2+5 50 20], 'String','F2, м2/c2');
%----- 3-rd frame -----

```

```

x_fm3=15; y_fm3=50;
hFm23=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm3 y_fm3
365 140]);
hTxtFm23=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+10
y_fm3+110 345 25],'FontSize',14, 'String','Параметри системи газового гасін. ');
hPopupMenu2=uicontrol(hFig2,'Style','popupmenu','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+10
y_fm3+60 105 20],'String',{'CO2','N2','Ar','газу нема'},
'HorizontalAlignment','left','Callback','GoCallbackPopmen2', 'Value',4);
hTxtPopupMenu2=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+10
y_fm3+80 105 25],'String','Оберіть газ для гасін. ');
x_fm31=x_fm3+10; y_fm31=y_fm3+5;
hFm231=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Visible','off',
'Position',[x_fm31-1 y_fm31-1 105+2 40+2]);
hRbut21=uicontrol(hFig2,'Style','radiobutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'String','Включ.
ручне','Position',[x_fm31 y_fm31+20 105 20],
'HorizontalAlignment','left','Visible','off','Value',1,'Callback','GoCallbackRbut21');
hRbut22=uicontrol(hFig2,'Style','radiobutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'String','Увімкнути.
автомат.','Position',[x_fm31 y_fm31 105 20], 'HorizontalAlignment','left',
'Visible','off','Callback','GoCallbackRbut22');
%-----
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    stFm_Rb21_22='off';
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
elseif get(hRbut21,'Value')==1
    stFm_Rb21_22='on';
    st214='on';st215_16='off';st217='on';
else
    stFm_Rb21_22='on';
    st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hFm231,'Visible',stFm_Rb21_22); set(hRbut21,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hRbut22,'Visible',stFm_Rb21_22);
hEd214=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+80 60
20], 'Visible',st214,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd14=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+75 165 30],'Visible',st214,'String','Масова витрата гас. газу, кг/с');
hEd215=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+45 60
20],'Visible',st215_16,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd15=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+40 165 30], 'Visible',st215_16,'String','Інерційність системи гасін., с');
hEd216=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+10 60
20],'Visible',st215_16,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd16=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+5 165 30],'Visible',st215_16,'String','Порогова температура системи гасін., C');
hEd217=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+25 60
20], 'Visible',st217,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd17=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+20 165 30],'Visible',st217,'String','Момент увімкнен. системи гасін., с');
%----- two pushbutton -----
hBut22 =uicontrol(hFig2,'Style','pushbutton', 'Position',[120 10 150 30], 'String','Повернен. до
основного вікна', 'Callback','Goback0');

```

```

function dy=eq_in_2ab(t,y) %пожежа у приміщенні
% інтегр. модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% і газообміну два отвори, примусової ventilation
% +захисний поглин. екран на термічно товстому тілі
dy=zeros(65,1);
%-----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 lam1 a1 den2 cp2 lam2 a2 h1 h2 dx1 dx2;
global Tf2 alf2 qrr;
%-----
% fire rooms parametrs
global R0 T0 T_beg Pa alf den_a;
global V k; k=1.4; %gas adeabat koefficient
global cp4; cp4=9.2e2; % cp j/(kg*K)
global cp5; cp5=1.05e3;
global cp6; cp6=1.03e3;
global cp7; cp7=1.02e3;
global cp8; cp8=2.01e3;
global cp9; cp9=7.8e2;
global cp10; cp10=5.2e2;
global cpa;
global x4a x5a x6a x7a x8a x9a x10a;
cpa=x4a*cp4+x5a*cp5+x6a*cp6+x7a*cp7+x8a*cp8+x9a*cp9+x10a*cp10;
global Wa Wg; % м3/с
global cp_t; % cp tush, j/(kg*K)
global gz Fw; gz=9.81;
global LO2 LCO2 LCO LH2O LHCl tet Qn D;
LN2=0.0; LAr=0;
kc=1.0e-8;%м/с
ig=5.1e5;%J/kg
%-----
f=zeros(65,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; cpv2=den2*cp2; fr1=a1/dx1^2; fr2=a2/dx2^2;
%-----
f(1)=1/V*((Ga(y)+Wa*den_a)+G_tus(y,t)+psi(y,t)-(Gg(y)+Wg*y(1)));
f(2)=(k-1)/V*((Qn*tet-(1-tet)*ig)*psi(y,t)+cpa*T0*(Ga(y)+Wa*den_a)+...
cp_t*T_beg*G_tus(y,t)-cpm(y).*Tm(y).*(Gg(y)+Wg*y(1))-Qw(y)-Q_rad(y));
f(3)=1/V*(D*psi(y,t)-y(3).*(Gg(y)./y(1)+Wg+kc*Fw));
f(4)=1/V*(x4a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(4)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))-tet*psi(y,t)*LO2);
f(5)=1/V*(x5a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(5)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LN2);
f(6)=1/V*(x6a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(6)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LCO2);
f(7)=1/V*(x7a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(7)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LCO);
f(8)=1/V*(x8a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(8)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LH2O);
f(9)=1/V*(x9a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(9)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LHCl);
f(10)=1/V*(x10a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(10)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LAr);
f(11)=1/V*(G_tus(y,t)-y(11)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1)));
f(12)=-psi(y,t); f(13)=-(y(13)-Tm(y))/tau_aut;
f(14)=key_aut(y); f(15)=0;
f(16)=1/cpv1/dx1*(Tm(y)+qrr/alf-y(16))/(1/alf+dx1/2/lam1)-(y(16)-y(17))*fr1;
f(17)=d2(y(16),y(17),y(18))*fr1; f(18)=d2(y(17),y(18),y(19))*fr1;

```

```

f(19)=d2(y(18),y(19),y(20))*fr1; f(20)=d2(y(19),y(20),y(21))*fr1;
f(21)=d2(y(20),y(21),y(22))*fr1; f(22)=d2(y(21),y(22),y(23))*fr1;
f(23)=d2(y(22),y(23),y(24))*fr1; f(24)=d2(y(23),y(24),y(25))*fr1;
f(25)=(y(24)-y(25))*fr1-1/cpv1/dx1*(y(25)-y(26))/(dx1/2/lam1+dx2/2/lam2);
f(26)=1/cpv2/dx2*(y(25)-y(26))/(dx1/2/lam1+dx2/2/lam2)-(y(26)-y(27))*fr2;
f(27)=d2(y(26),y(27),y(28))*fr2; f(28)=d2(y(27),y(28),y(29))*fr2;
f(29)=d2(y(28),y(29),y(30))*fr2; f(30)=d2(y(29),y(30),y(31))*fr2;
f(31)=d2(y(30),y(31),y(32))*fr2; f(32)=d2(y(31),y(32),y(33))*fr2;
f(33)=d2(y(32),y(33),y(34))*fr2; f(34)=d2(y(33),y(34),y(35))*fr2;
f(35)=d2(y(34),y(35),y(36))*fr2; f(36)=d2(y(35),y(36),y(37))*fr2;
f(37)=d2(y(36),y(37),y(38))*fr2; f(38)=d2(y(37),y(38),y(39))*fr2;
f(39)=d2(y(38),y(39),y(40))*fr2; f(40)=d2(y(39),y(40),y(41))*fr2;
f(41)=d2(y(40),y(41),y(42))*fr2; f(42)=d2(y(41),y(42),y(43))*fr2;
f(43)=d2(y(42),y(43),y(44))*fr2; f(44)=d2(y(43),y(44),y(45))*fr2;
f(45)=(y(44)-y(45))*fr2-1/cpv2/dx2*(y(45)-Tf2)/(dx2/2/lam2+1/alf2);
f(46)=1/cpv2/dx2*(Tm(y)+qrr/alf-y(46))/(1/alf+dx2/2/lam2)-(y(46)-y(47))*fr2;
f(47)=d2(y(46),y(47),y(48))*fr2; f(48)=d2(y(47),y(48),y(49))*fr2;
f(49)=d2(y(48),y(49),y(50))*fr2; f(50)=d2(y(49),y(50),y(51))*fr2;
f(51)=d2(y(50),y(51),y(52))*fr2; f(52)=d2(y(51),y(52),y(53))*fr2;
f(53)=d2(y(52),y(53),y(54))*fr2; f(54)=d2(y(53),y(54),y(55))*fr2;
f(55)=d2(y(54),y(55),y(56))*fr2; f(56)=d2(y(55),y(56),y(57))*fr2;
f(57)=d2(y(56),y(57),y(58))*fr2; f(58)=d2(y(57),y(58),y(59))*fr2;
f(59)=d2(y(58),y(59),y(60))*fr2; f(60)=d2(y(59),y(60),y(61))*fr2;
f(61)=d2(y(60),y(61),y(62))*fr2; f(62)=d2(y(61),y(62),y(63))*fr2;
f(63)=d2(y(62),y(63),y(64))*fr2; f(64)=d2(y(63),y(64),y(65))*fr2;
f(65)=(y(64)-y(65))*fr2-1/cpv2/dx2*(y(65)-Tf2)/(dx2/2/lam2+1/alf2);
dy=f;

```

```

.....
function Fff=Ff(t)
% Ff(t)-fire area, m2
% Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2 < Ffl
% Ffl - площа пола, м2
global Ffl Ff0 dFf1 dFf2;
Fff0=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2;
Fff=min(Fff0,Ffl);

```

```

.....
function Gtt=G_tus(y,t)
%витрата газу з системи газового гасін., кг/с
global t_begin_t; %gasiniya begin time, c
global G_t; % gasiniya витрата, кг/с
global T_cr; %межа спрацьовуван. по температурі, К
y14_cr=2*T_cr;
Gtt=G_t*(0.5+1/pi*atan(500*(y(14)-y14_cr/2))+0.5+1/pi*atan(100*(t-t_begin_t)));

```

```

.....
function Gaa2=Ga(y)
%приток повітр. крізь два отвори
global hh den_a gz;
Gaa2=Ga1(y,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Ga1(y,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Gaa1=Ga1(y,hd,hu,b)
% витрата повітр., kg/c, b-ширина отвору
%hd,hu-висоти нижнього та верхнього країв отворів, м

```

```

global den_a gz;
if hn(y)<hd Gaa1=0;
    elseif hn(y)>hu
        Gaa1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y(1)))*b*((hn(y)-hd)^1.5-(hn(y)-hu)^1.5);
    else Gaa1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y(1)))*b*(hn(y)-hd)^1.5;
end;

```

```

.....
function Gag=Ga_g(y)
%graf help agree function приток повітр. крізь два отвори, кг/с
Gag(:,1)=Ga_gg(y(:,1),y(:,2));

```

```

.....
function Gagg2=Ga_gg(y1,y2)
%graf help agree function приток повітр. крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Gagg2=Ga_gg1(y1,y2,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Ga_gg1(y1,y2,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----

```

```

function Gagg1=Ga_gg1(y1,y2,hd,hu,b)
%graf help agree function витрата повітр., кг/с
%hd,hu-висоти нижнього та верхнього країв отворів, м, b-ширина отвору, м
global den_a gz;
if hn_gg(y1,y2)<hd Gagg1=0;
    elseif hn_gg(y1,y2)>hu
        Gagg1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y1))*b*((hn_gg(y1,y2)-hd).^1.5-(hn_gg(y1,y2)-hu).^1.5);
    else Gagg1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y1))*b*(hn_gg(y1,y2)-hd).^1.5;
end;

```

```

.....
function Ggg2=Gg(y)
%відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Ggg2=Gg1(y,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Gg1(y,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----

```

```

function Ggg1=Gg1(y,hd,hu,b)
% відтік газів крізь отвір (витрата), кг/с
global den_a gz;
if hn(y)<hd
    Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y(1).*(den_a-y(1)))*b*((hu-hn(y)).^1.5-(hd-hn(y)).^1.5);
    elseif hn(y)>hu Ggg1=0;
    else Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y(1).*(den_a-y(1)))*b*(hu-hn(y)).^1.5;
end;

```

```

.....
function Ggg=Gg_g(y)
%graf help agree function відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
Ggg(:,1)=Gg_gg(y(:,1),y(:,2));

```

```

.....
function Ggg2=Gg_gg(y1,y2)
%graf help agree function відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Ggg2=Gg_gg1(y1,y2,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Gg_gg1(y1,y2,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----

```

```

function Ggg1=Gg_gg1(y1,y2,hd,hu,b)

```

```
%graf help agree function відтік газів, kg/c
global den_a gz;
if hn_gg(y1,y2)<hd
    Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y1.*(den_a-y1))*b.*...
    ((hu-hn_gg(y1,y2)).^1.5-(hd-hn_gg(y1,y2)).^1.5);
elseif hn_gg(y1,y2)>hu Ggg1=0;
else Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y1.*(den_a-y1))*b.*(hu-hn_gg(y1,y2)).^1.5;
end;
```

```
.....
function Goback0 %GUI
global hFig0
if isempty(findobj('Tag','tag_fig0')) Data0
else figure(hFig0)
end;
```

```
.....
function GoCallback00
% перевірка і попереджен. про неповноту вводу
%----- global variables -----
global hEd01 hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
global hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
global hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22
global hFig0 hFig1 hFig2
%----- перевірка присутності вікон вводу -----
if isempty(findobj('Tag','tag_fig1')) Data1;
end;
if isempty(findobj('Tag','tag_fig2')) Data2;
end;
%-----
%global index;%index - індекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
%-----
k01=isempty(str2num(get(hEd01,'String')));
k101=isempty(str2num(get(hEd101,'String')));
k102=isempty(str2num(get(hEd102,'String')));
k103=isempty(str2num(get(hEd103,'String')));
k104=isempty(str2num(get(hEd104,'String')));
k105=isempty(str2num(get(hEd105,'String')));
k106=isempty(str2num(get(hEd106,'String')));
k107=isempty(str2num(get(hEd107,'String')));
k108=isempty(str2num(get(hEd108,'String')));
k109=isempty(str2num(get(hEd109,'String')));
k110=isempty(str2num(get(hEd110,'String')));
k111=isempty(str2num(get(hEd111,'String')));
k112=isempty(str2num(get(hEd112,'String')));
k113=isempty(str2num(get(hEd113,'String')));
k201=isempty(str2num(get(hEd201,'String')));
k202=isempty(str2num(get(hEd202,'String')));
k203=isempty(str2num(get(hEd203,'String')));
k204=isempty(str2num(get(hEd204,'String')));
```

```

k205=isempty(str2num(get(hEd205,'String')));
k206=isempty(str2num(get(hEd206,'String')));
k207=isempty(str2num(get(hEd207,'String')));
k208=isempty(str2num(get(hEd208,'String')));
k209=isempty(str2num(get(hEd209,'String')));
k210=isempty(str2num(get(hEd210,'String')));
k211=isempty(str2num(get(hEd211,'String')));
k212=isempty(str2num(get(hEd212,'String')));
k213=isempty(str2num(get(hEd213,'String')));
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    k214_215_216_217=0;
elseif get(hRbut21,'Value')==1
k214_215_216_217=isempty(str2num(get(hEd214,'String')))|isempty(str2num(get(hEd217,'String'))
);
else
k214_215_216_217=isempty(str2num(get(hEd214,'String')))|isempty(str2num(get(hEd215,'String'))
)|isempty(str2num(get(hEd216,'String')));
end;
%-----
if k01
    figure(hFig0);
    errorldg('Не введено часовий інтервал.','Поверни до введен.','on');
elseif k101|k102|k103|k104|k105|k106|k107|k108|k109|k110|k111|k112|k113
    figure(hFig1);
    errorldg('Введено не всі дані щодо газообміну.','Поверни до введен.','on');
elseif k201|k202|k203|k204|k205|k206|k207|k208|k209|k210|k211|k212|k213|k214_215_216_217
    figure(hFig2);
    errorldg("Введено не всі дані щодо осередку та гасін.','Поверни до введен.','on');
else GoCallback0;
end;

```

```

.....
function GoCallback0
% solution of eq_in_12 -інтегр.модель пожежі з врахуван. витрати пального
% +захисний поглин. екран на термічно товстому тілі
% tt- time, c – незалежний аргумент
%-----
% y1-denm y2-pm y3-miu y4-denO2, y5-denN2
% y6-denCO2 y7-denCO y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush y12 - m_burn
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work y15- вільна змінна
%-----
% y16,y17,...,y24,y25 - температури 1-го,...,10-го шарів першого прошарку, K
% y26,y27,...,y44,y45 - температури 1-го,...,20-го шарів другого прошарку, K
% y46,y47,...,y64,y65 - температури 1-го,...,20-го вільного шару, K
%----- global variables -----
global hEd01 hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
global hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
global hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22
%-----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 lam1 a1 den2 cp2 lam2 a2;

```



```

den1=5e2; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг К)
lam1=0.2;% lam1- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 1-го прошарку, Вт/(м К)
a1=lam1/(den1*cp1); % a1 - коефіцієнт температуропровідності матеріалу 1-го прошарку,
м2/с
den2=2e3; % густина матеріалу 2-го прошарку, кг/м3
cp2=1.0e3; % теплоємність матеріалу 2-го прошарку, Дж/(кг К)
lam2=1.0; % lam2- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 2-го прошарку, Вт/(м К)
a2=lam2/(den2*cp2); % a2 - коефіцієнт температуропровідності матеріалу 2-го прошарку,
м2/с
%-----
global h1 h2 dx1 dx2;
h1=2e-2; % h1-толщина 1-го прошарку, м
n1=10; %n1- кількість шарів розбит. 1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина шару розбит. 1-го прошарку, м
h2=10e-2; % h2-толщина 2-го прошарку, м
n2=20; %n2- кількість шарів розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина шару розбит. 2-го прошарку, м
%-----
global Tf2; % температура середовища за стіною, К
Tf2=20+273;
global alf2 qrr;
alf2=10; % коефіцієнт тепловіддачі за стіною, Вт/(м2 К)
qrr=0*1e3; % фоновий рівень променистого питомого теплового потоку, Вт/м2
%-----fire rooms parametrs -----
global Pa den_a T0 T_beg R0 alf;
Pa=1.01e5; %тиск повітр., Па
%T0 - температура зовнішнього повітр., К
%T_beg - початкова температура повітр., К
R0=8314; %universal gas constant, J/(kmol*K)
alf=10; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
global V h Ffl Fw;
global Qn u_m LO2 LCO2 LCO LH20 LHCl tet D;
global Ff0 dFf1 dFf2; %площа пожежі Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2 < Ffl
%Ff0=0.5; dFf1=0.1; dFf2=0.01;
%-----
global index;%index - індекс вибору гас. газу
global cp_t; %ізобарн. теплоємність гас. газу
global G_t; %гас. витрата, кг/с
global t_begin_t; %гас. begin time, с
global tau_aut; % automatic time, с
global T_cr; %поріг спрацьовуван. по температурі, К
%-----
%---get string information from edit fields and convert string to number---
tf=str2num(get(hEd01,'String')); % tf - time, s
T0=273+str2num(get(hEd101,'String')); % T0 - температура зовнішнього повітр.
T_beg=273+str2num(get(hEd102,'String')); % tem_begin – початкова температура повітр., К
W_in=str2num(get(hEd103,'String')); % W_in - in вимушена витрата, м3/с
W_out=str2num(get(hEd104,'String')); % W_out - out вимушена витрата, м3/с
A_=str2num(get(hEd105,'String')); % A_ - довжини приміщен., м
B_=str2num(get(hEd106,'String')); % B_ - ширина приміщен., м
H_=str2num(get(hEd107,'String')); % H_ - висота приміщен., м

```

```

c_1=str2num(get(hEd108,'String')); % c_1 - висота ниж. кр.1-го отвору, м
h_1=str2num(get(hEd109,'String')); % h_1 - висота 1-го отвору, м
b_1=str2num(get(hEd110,'String')); % b_1 - ширина 1-го отвору, м
c_2=str2num(get(hEd111,'String')); % c_2 -висота ниж. кр.2-го отвору, м
h_2=str2num(get(hEd112,'String')); % h_2 - висота 2-го отвору, м
b_2=str2num(get(hEd113,'String')); % b_2 - ширина 2-го отвору, м
%-----
Qn=1000*str2num(get(hEd201,'String')); % Qn - питома теплота згор., Дж/кг
u_m=str2num(get(hEd202,'String')); % u_m – питома швидкість вигор., кг/(с м2)
tet=str2num(get(hEd203,'String')); % tet - коеф. повноти згор.
D=str2num(get(hEd204,'String')); % D - коеф. Димоутвор. здатності, Непер*м2/с
LO2=str2num(get(hEd205,'String')); % LO2 - мас.О2/мас. пального
LCO2=str2num(get(hEd206,'String')); % LCO2 - мас.СО2/мас. пального.
LCO=str2num(get(hEd207,'String')); % LCO - мас.СО/мас. пального.
LH2O=str2num(get(hEd208,'String')); % LH2O - мас.Н2О/мас. пального.
LHCl=str2num(get(hEd209,'String')); % LHCl - мас.НCl/мас. пального.
m0=str2num(get(hEd210,'String')); % m0 - %begining fuel mass, kg
Ff0=str2num(get(hEd211,'String')); % Ff0 - м2, % Ff(t)- площа пожежі, м2
dFf1=str2num(get(hEd212,'String')); % dFf1 - м2/с % Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2, м2
dFf2=str2num(get(hEd213,'String')); % dFf2 - м2/с2
%-----
index=get(hPopupMenu2,'Value');
global cp6 cp5 cp10; % j/(kg*K)
switch index
case 1
    cp_t=cp6; G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
    if get(hRbut22,'Value')==1
        tau_aut=str2num(get(hEd215,'String')); T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
        t_begin_t=1e15;
    else tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
    end;
case 2
    cp_t=cp5; G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
    if get(hRbut22,'Value')==1
        tau_aut=str2num(get(hEd215,'String')); T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
    t_begin_t=1e15;
    else tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
    end;
case 3
    cp_t= cp10; G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
    if get(hRbut22,'Value')==1
        tau_aut=str2num(get(hEd215,'String')); T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
    t_begin_t=1e15;
    else
        tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
    end;
case 4
    cp_t= 0; G_t=0; tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=1e15;
end;
%-----
V=A_*B_*H_; %volume, м3
h=H_/2; %половина висоти приміщен.

```

```

Ffl=A_*B_;% площа підлоги, м2
Fw=2*(A_*B_+A_*H_+B_*H_);% площа огорожі, м2
den_a=Pa/T0*29/R0;% density out air, kg/m3
den_begin=Pa/T_beg*29/R0;% початкова густина повітр., kg/m3
global Wa Wg;%forses ventilation, м3/с
Wa=W_in;%вимушена витрата до, м3/с
Wg=W_out;%вимушена витрата із, м3/с
global hh;%параметри прорізів
hh(1,1)=c_1; hh(1,2)=hh(1,1)+h_1; hh(1,3)=b_1;%hh(:,1),hh(:,2)- висоти ниж та верх країв
прорізів
hh(2,1)=c_2; hh(2,2)=hh(2,1)+h_2; hh(2,3)=b_2;%hh(:,3)- ширини прорізів
global x4a x5a x6a x7a x8a x9a x10a x11a;% air mass part O2, N2, CO2, CO, H2O, HCl, Ar
x4a=0.232; x5a=0.755; x6a=0.0; x7a=0.0; x8a=0.0; x9a=0.0; x10a=0.013; x11a=0.0;
%-----
y1=den_begin; y2=Pa; y3=0;
y4=x4a*y1; y5=x5a*y1; y6=x6a*y1; y7=x7a*y1; y8=x8a*y1; y9=x9a*y1; y10=x10a*y1;
y11=x11a*y1; y12=m0; y13=T_beg; y14=0; y15=0;
T0=T_beg;
y16=T0; y17=T0; y18=T0; y19=T0; y20=T0; y21=T0; y22=T0; y23=T0; y24=T0; y25=T0;
y26=T0; y27=T0; y28=T0; y29=T0; y30=T0; y31=T0; y32=T0; y33=T0; y34=T0; y35=T0;
y36=T0; y37=T0; y38=T0; y39=T0; y40=T0; y41=T0; y42=T0; y43=T0; y44=T0; y45=T0;
y46=T0; y47=T0; y48=T0; y49=T0; y50=T0; y51=T0; y52=T0; y53=T0; y54=T0; y55=T0;
y56=T0; y57=T0; y58=T0; y59=T0; y60=T0; y61=T0; y62=T0; y63=T0; y64=T0; y65=T0;
%----- Numerical solution -----
% solution of fire_eq_12 -----
%[T,Y]=ode15s('eq_in_12',[0 tf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13 y14]);
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[T,Y]=ode15s('eq_in_2ab',[0 tf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13 y14...
y15 y16 y17 y18 y19 y20.y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30 y31 y32...
y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40 y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49 y50...
y51 y52 y53 y54 y55 y56 y57 y58 y59 y60 y61 y62 y63 y64 y65],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,psi_g(Y,T))
title('Швидкість Fire velocity')
xlabel('\tau, c');
ylabel('\psi , кг/с');
grid on;
%-----
figure;
plot(T,Tm_g(Y)-273,T,Y(:,16)-273,'-',T,Y(:,46)-273,'-', T,Y(:,26)-273);
legend('t_{m}','t_{зовн. поверхні захисного шару}',...
't_{поверхні тіла без захисту}','t_{поверхні тіла із захистом}');
ylabel('t,{o}C');
xlabel('\tau, c'); grid on;
.....

function GoCallbackPopmen2
%відпрацюван. видимості вводу гас. засобів
global hPopmenu2 hFm231 hRbut21 hRbut22
global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----

```

```

if get(hPopupmenu2,'Value')==4
    stFm_Rb21_22='off'; st214='off';st215_16='off';st217='off';
elseif get(hRbut21,'Value')==1
    stFm_Rb21_22='on'; st214='on';st215_16='off';st217='on';
else
    stFm_Rb21_22='on'; st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hFm231,'Visible',stFm_Rb21_22); set(hRbut21,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hRbut22,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)

```

```

.....
function GoCallbackRbut21
global hPopupmenu2 hRbut21 hRbut22
global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----

```

```

if get(hRbut21,'Value')==1
    set(hRbut22,'Value',0);
else
    set(hRbut22,'Value',1);
end;
%-----
if get(hPopupmenu2,'Value')==4
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
else
    st214='on';st215_16='off';st217='on';
end;
%-----
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)

```

```

.....
function GoCallbackRbut22
global hPopupmenu2 hRbut21 hRbut22 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----

```

```

if get(hRbut22,'Value')==1
    set(hRbut21,'Value',0);
else
    set(hRbut21,'Value',1);
end;
%-----
if get(hPopupmenu2,'Value')==4
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
else
    st214='on';st215_16='on';st217='off';

```

```

end;
%-----
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)

```

```

.....
function GoData1 %GUI
global hFig1
if isempty(findobj('Tag','tag_fig1')) Data1
else figure(hFig1)
end;

```

```

.....
function GoData2 %GUI
global hFig2
if isempty(findobj('Tag','tag_fig2')) Data2
else figure(hFig2)
end;

```

```

.....
function hnn=hn(y)
% висота нейтральної зони, м
global den_a h Pa gz;
hnn=h-(y(2)-Pa)/gz/(den_a-y(1)+0.0001);

```

```

.....
function hng=hn_g(y)
%graf help agree function висота нейтральної зони, м
hng(:,1)=hn_gg(y(:,1),y(:,2));

```

```

.....
function hngg=hn_gg(y1,y2)
%graf help agree function висота нейтральної зони, м
global den_a h Pa gz;
hngg=h-(y2-Pa)/gz/(den_a-y1+0.0001);

```

```

.....
function K_t=K_tus(y)
% гасін. коефіцієнт
% y1-denm y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush
global index; %index - індекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
switch index
case 1 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.39-(y(11)+y(6))./y(1))));
case 2 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.85-(y(11)+y(5))./y(1))));
case 3 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.67-(y(11)+y(10))./y(1))));
case 4 K_t=1;
end;

```

```

.....
function K_t_gg=K_tus_gg(y1,y5,y6,y10,y11)
% гасін. коефіцієнт
% y1-denm y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush
global index; %index - індекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar

```

```

switch index
case 1 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.39-(y11+y6)./y1)));
case 2 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.85-(y11+y5)./y1)));
case 3 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.67-(y11+y10)./y1)));
case 4 K_t_gg=1;
end;

```

```

.....
function keyy=key_aut(y)
% function ключ системи автоматичного гасін: y14'=key_aut(y)
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
global T_cr; %поріг спрацьовуван. по температурі, K;
y14_cr=4*T_cr;
keyy=(-y(14).^2-y(13)+T_cr).*(y(14)-y14_cr);

```

```

.....
function MyClose %GUI
global hFig0 hFig1 hFig2
select=questdlg('Ви бажаєте закрити програму?', 'Запит о закінченні роботи', 'Так','Ні','Ні');
switch select
case 'Так' delete(gcf)
otherwise return
end;

```

```

.....
function psii=psi(y,t)
% burn velocity, kg/c
% y1-denm y4-denO2 y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush y12-m_burn
global u_m x4a;
%u_m=0.047 kg/(m2*c)
psii=u_m *Ff(t).*K(y).*K_tus(y).*(0.5+1/pi*atan(1000*y(12)));
%-----
function Kk=K(y)
% burn velocity O2 koeficient
global x4a; % x4a=0.232 - beginning mas part O2
Kk=(y(4)./y(1)/x4a).^2;

```

```

.....
function psig=psi_g(y,t)
%graf help agree function burn velocity, kg/c
% y1-denm y4-denO2 y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush y12-m_burn
global u_m x4a; % x4a=0.232 - beginning mas part O2
psig(:,1)=psi_gg(y(:,1),y(:,4),y(:,5),y(:,6),y(:,10),y(:,11),y(:,12),t);
%-----
function psigg=psi_gg(y1,y4,y5,y6,y10,y11,y12,t)
% graf help agree function burn velocity, kg/c
global u_m x4a;
psigg=u_m*Ff(t).*K_gg(y1,y4).*K_tus_gg(y1,y5,y6,y10,y11).*(0.5+1/pi*atan(1000*y12));
%-----
function Kgg=K_gg(y1,y4)
% burn velocity O2 koeficient
global x4a;
Kgg=(y4./y1/x4a).^2;

```

```

function qc=q_c(T1,T2,x)
% питомий конвекційний тепловий потік у плоскому прошарку, Вт/м2
%T1 T2- температури поверхонь, К
%x - товщина прошарку між поверхнями, м
% lam_a - коефіцієнт теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% nu_a=2.0e-5; % коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
Pr_a=0.7; % критерій Прандтл. Повітр.
gg=9.8; % прискорен. вільного падін., м/с2
%-----
qc=0.18*(gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2.*nu_a((T1+T2)/2-273).^2)*Pr_a).^0.25.*lam_a((T1+T2)/2-273).*(T1-T2)/x;
%-----
function lam=lam_a(t)
% коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% t - температура повітр. по Цельсію
lam=(2.4+0.0057*t)*1.0e-2;
%-----
function nu=nu_a(t)
% коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
nu=(1.33+0.00044*t)*1.0e-5;
.....
function qr=q_r(T1,T2,ep1,ep2)
% radiation heat density в прошарку, W/m2
%T1 T2- температури поверхонь, К
%ep1 ep2- ступені чорноти поверхонь
%-----
ep12=1/(1/ep1+1/ep2-1);
qr=ep12*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....
function Qrr=Q_rad(y)
% radiation heat flu, W
global T_beg Fw;
ep=0.5;
Qrr=ep*5.67e-8*(Tm(y)^4-T_beg^4)*Fw;
.....
function Qww=Qw(y)
% convection heat flu, W
global T_beg Fw alf;
%alf=10; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
Qww=alf*(Tm(y)-T_beg)*Fw;
.....
function Start15 %start of Gui15
% інтегральна модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% і газообміну крізь два прорізи, вимушеною ventilation and системи
% газового гасін.+захисний поглинаючий екран на термічно товстому тілі
global hFig0
%-----
if isempty(findobj('Tag','tag_fig0')) Data0
else figure(hFig0)
end;
.....
function Tg=Tm(y)

```

```
% gas temperature, K
global R0;
% y1-denm y4-denO2, y5-denN2 y6-denCO2 y7-denCO
% y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush
% global m4 m5 m6 m7 m8 m9 m10 m11;
%m4=32; m5=28; m6=44; m7=28; m8=18; m9=36.5 m10=40 m11=(28,44,40);
Tg=y(2)/R0./y(1)*29;
```

```
.....
function Tmg=Tm_g(y)
%graf help agree function gas temperature
global R0;
Tmg(:,1)=Tm_gg(y(:,1),y(:,2));
%-----
function Tmgg=Tm_gg(y1,y2)
% graf help agree function gas temperature
global R0;
Tmgg=y2/R0./y1*29;
.....
```


Додаток В

Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні термічно тонкого тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при пожежі у приміщенні

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) Спочатку у текст файла «GoCallback0.m» вводяться чисельні значення всіх параметрів захисного тіла і покриття.

3) Потім активується файл «Start15.m» і за допомогою інтерфейса, що з'явиться, вводяться всі параметри, що задають розвиток пожежі у приміщенні, і час розгляду. Після натиску кнопки «Поїхали» програма почне обраховуватися і далі видасть результат (графіки залежностей параметрів від часу пожежі).

```
.....
function cg=cpm(y)
% average total gas heat, j/(kgm*K)
global cp4; global cp5; global cp6; global cp7; global cp8;
global cp9; global cp10; global cp_t;
cg=(y(4)*cp4+y(5)*cp5+y(6)*cp6+y(7)*cp7+y(8)*cp8++y(9)*cp9++y(10)*cp10+y(11)*cp_t)./y(1)
;
.....
function d22=d2(y1,y2,y3)
% друга різн. у, y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d22=y1+y3-2*y2;
.....
function Data0
%GUI
%----- global variables -----
global hFig0 hEd01 hBut00 hFig1 hFig2
%----- figure and axes -----
% First axes for graphing
hFig0=figure('Position',[80 80 600 390],
'Name','Моделюван. динаміки НФП - основне вікно', 'HandleVisibility','Callback',
'Menubar','none', 'CloseRequestFcn','MyClose', 'Tag','tag_fig0');
hAxes01=axes('Parent',hFig0,'Color',[1 1 1], 'Units','pixels','Position',[10 20 360
288],'FontSize',10,'Visible','off');
%-----paint picture-----
TX=imread('Paint_fire.jpg','jpg'); image(TX); set(hAxes01,'TickDir','out')
col=get(hFig0,'Color'); set(hAxes01,'XColor',col); set(hAxes01,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
```

```

xfm1=385; yfm1=115;
hFm01=uicontrol(hFig0,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
200 190]); hTxtFm01=uicontrol(hFig0,'Style','text', 'BackgroundColor',[0.7 0.7
0.7], 'Position',[xfm1+10 yfm1+160 180 20], 'FontSize',12, 'String','Ввод початкових даних');
hEd01=uicontrol(hFig0,'Style','edit', 'BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+75 yfm1+10 60
20], 'HorizontalAlignment','left'); hTxtEd01=uicontrol(hFig0,'Style','text', 'BackgroundColor',[0.7
0.7 0.7], 'Position',[xfm1+45 yfm1+30 120 20], 'String','Часовий інтервал, с');
%----- pushbuttons -----
hBut01=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[xfm1+10 yfm1+110 180 40],
'String','Приміщен. і газообмін', 'Callback','GoData1');
hBut02=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[xfm1+10 yfm1+60 180 40],
'String','Осередо пожежі і газове гасін.', 'Callback','GoData2');
%----- pushbutton -----
hBut00=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[440 45 100 40], 'String','ПОЇХАЛИ',
'Callback','GoCallback00');
%----- text field -----
hTxt01=uicontrol(hFig0,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[100 330 400
50], 'FontName','Arial Cyr', 'FontSize',16, 'String','Визначен. Небезпечних факторів пожежі в
інтегральній моделі');

.....
function Data1
%GUI - вікно вводу даних газообміну
%----- global variables -----
global hEd01 hFig1
global hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
%----- figure and axes -----
hFig1=figure('Position',[100 100 670 400], 'Name','Моделюван. динаміки НФП – заданн.
параметрів газообміну ', 'Menubar','none', 'Tag','tag_fig1');
hAxes11=axes('Parent',hFig1, 'Color',[1 1 1], 'Units','pixels', 'Position',[5 55 440 325], 'FontSize',10,
'Visible','off');
%----- paint picture -----
TX=imread('Fire_vent.jpg','jpg');
image(TX); set(hAxes11, 'TickDir','out')
col=get(hFig1, 'Color'); set(hAxes11, 'XColor',col); set(hAxes11, 'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
xfm1=455; yfm1=315;
hFm11=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
210 65]);
hTxtFm11=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+15
yfm1+45 180 15], 'String','Температура повітр., С');
hEd101=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+30 yfm1+5 60
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd01=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+30
yfm1+25 60 15], 'String','внешнего');
hEd102=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+125 yfm1+5 60
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd02=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+125
yfm1+25 60 15], 'String','початкова ');
%----- 2-nd frame -----
xfm2=455; yfm2=240;

```

```

hFm12=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm2 yfm2
210 65]);
hTxtFm12=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+15
yfm2+45 180 15],'String','Витрата примусової вентиляції, м³/с');
hEd103=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+30 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd03=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+30
yfm2+25 60 15],'String','припл., W+');
hEd104=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+125 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd04=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+125
yfm2+25 60 15],'String','відт., W-');
%----- 3-th frame -----
xfm3=455; yfm3=165;
hFm13=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm3 yfm3
210 65]);
hTxtFm13=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm3+15
yfm3+45 180 15],'String','Розміри приміщень');
hEd105=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm3+15 yfm3+5 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd05=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm3+15
yfm3+25 50 15],'String','A, м');
hEd106=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm3+80 yfm3+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd06=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm3+80 yfm3+25 50 15],'String','B, м');
hEd107=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm3+145 yfm3+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd07=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm3+145 yfm3+25 50 15],'String','H, м');
%----- 4-th frame -----
xfm4=455; yfm4=50;
hFm14=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75],...
    'Position',[xfm4 yfm4 210 105]);
hTxtFm14=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+15 yfm4+85 180 15],'String','Параметри отворів');
hEd108=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm4+15 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd08=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+15 yfm4+65 50 15],'String','c1, м');
hEd109=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm4+80 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd09=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+80 yfm4+65 50 15],'String','h1, м');
hEd110=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm4+145 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd10=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+145 yfm4+65 50 15],'String','b1, м');
hEd111=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm4+15 yfm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd11=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+15 yfm4+25 50 15],'String','c2, м');

```

```

hEd112=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[x_fm4+80 y_fm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd12=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[x_fm4+80 y_fm4+25 50 15],'String','h2, м');
hEd113=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[x_fm4+145 y_fm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd13=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[x_fm4+145 y_fm4+25 50 15],'String','b2, м');
%----- one pushbutton -----
hBut11=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton', 'Position',[120 15 150 30],...
    'String','Повернен. до основного вікна','Callback','Goback0');

```

```

function Data2
% інтерп. модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% газообмін крізь два отвори, примусова ventilation
%----- global variables -----
global hFig2 hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupMenu2 hFm231 hRbut21 hRbut22
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%----- figure and axes -----
hFig2=figure('Position',[60 60 665 390], 'Name','Моделюван. динаміки НФП - параметри, що
задають осередок пожежі і гасін.', 'Menubar','none', 'Tag','tag_fig2');
hAxes21=axes('Parent',hFig2,'Color',[1 1 1],'Units','pixels', 'Position',[95 290 211 92],'FontSize',10,
'Visible','off');
%----- paint picture -----
TX=imread('Fire_formula.jpg','jpg'); image(TX); set(hAxes21,'TickDir','out')
col=get(hFig2,'Color'); set(hAxes21,'XColor',col); set(hAxes21,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
x_fm1=395; y_fm1=10;
hFm21=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm1 y_fm1
260 380]);
%----- one pushbutton -----
hBut21=uicontrol(hFig2,'Style','pushbutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+30
y_fm1+345 205 30],'FontSize',14,'String','Параметри пального', 'Callback','FuelProperty');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+335 240 4]);
hEd201=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+305 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd01=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+300 180 30], 'String','Питома теплота згор. - Qн, кДж/кг');
hEd202=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+265 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd02=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+260 180 30], 'String','Питома швидкість вигор. - um, кг/(м2 с));
hEd203=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm1+190 y_fm1+230 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd03=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+230 180 20], 'String','Коефіцієнт повноти сгор. - kсг');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm1+10
y_fm1+220 240 4]);

```

```

hEd204=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+190 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd04=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+185 180 30],'String','Димоутворююча здатність. - D, Нп м2/кг');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+175 240 4]);
hEd205=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+135 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd05=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+125 180 40],'String','Маса кисню, для повного згор. 1 кг пального - L_O2, кг/кг');
hTxtEd20_6_7_8_9=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],
'Position',[xfm1+10 yfm1+85 240 30], 'String','Маса газу, що виділ. при повному згор. 1 кг
пального, кг/кг');
hEd206=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+10 yfm1+45 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd06=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+65 50 15],'String','L_CO2');
hEd207=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+73 yfm1+45 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd07=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+73
yfm1+65 50 15],'String','L_CO');
hEd208=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+199 yfm1+45 50
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd08=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+199
yfm1+65 50 15],'String','L_H2O');
hEd209=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+136 yfm1+45 50
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd09=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+136
yfm1+65 50 15],'String','L_HCl');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+30 240 4]);
hEd210=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd10=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+5 180 20],'String','Повна маса пального, кг');
%----- 2-nd frame -----
xfm2=15; yfm2=195;
hFm22=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm2 yfm2
365 85]);
hTxtFm21=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+10
yfm2+30 345 50], 'FontSize',14, 'String','Параметри, що задають площу пожежі');
hEd211=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+55 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd11=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+5 yfm2+5
50 20],'String','F0, м2');
hEd212=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+175 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd12=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+125
yfm2+5 50 20],'String','F1, м2/c');
hEd213=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm2+295 yfm2+5 60 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd13=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...

```

```

        'Position',[xfrm2+245 yfm2+5 50 20],'String','F2,  $m^2/c^2$ ');
%----- 3-rd frame -----
xfrm3=15; yfm3=50;
hFm23=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfrm3 yfm3
365 140]);
hTxtFm23=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfrm3+10
yfm3+110 345 25],'FontSize',14, 'String','Параметри системи газового гасін. ');
hPopupMenu2=uicontrol(hFig2,'Style','popupmenu','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfrm3+10
yfm3+60 105 20],'String',{'CO2','N2','Ar','газу нема'},
'HorizontalAlignment','left','Callback','GoCallbackPopmen2', 'Value',4);
hTxtPopupMenu2=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfrm3+10
yfm3+80 105 25],'String','Оберіть газ для гасін. ');
xfrm31=xfrm3+10; yfm31=yfm3+5;
hFm231=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Visible','off',
'Position',[xfrm31-1 yfm31-1 105+2 40+2]);
hRbut21=uicontrol(hFig2,'Style','radiobutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'String','Включ.
ручне','Position',[xfrm31 yfm31+20 105 20],
'HorizontalAlignment','left','Visible','off','Value',1,'Callback','GoCallbackRbut21');
hRbut22=uicontrol(hFig2,'Style','radiobutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'String','Увімкнути.
автомат.','Position',[xfrm31 yfm31 105 20], 'HorizontalAlignment','left',
'Visible','off','Callback','GoCallbackRbut22');
%-----
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    stFm_Rb21_22='off';
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
elseif get(hRbut21,'Value')==1
    stFm_Rb21_22='on';
    st214='on';st215_16='off';st217='on';
else
    stFm_Rb21_22='on';
    st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hFm231,'Visible',stFm_Rb21_22); set(hRbut21,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hRbut22,'Visible',stFm_Rb21_22);
hEd214=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfrm3+290 yfm3+80 60
20], 'Visible',st214,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd14=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfrm3+125
yfm3+75 165 30], 'Visible',st214,'String','Масова витрата гас. газу, кг/с');
hEd215=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfrm3+290 yfm3+45 60
20], 'Visible',st215_16,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd15=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfrm3+125
yfm3+40 165 30], 'Visible',st215_16,'String','Інерційність системи гасін., с');
hEd216=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfrm3+290 yfm3+10 60
20], 'Visible',st215_16,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd16=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfrm3+125
yfm3+5 165 30], 'Visible',st215_16,'String','Порогова температура системи гасін., C');
hEd217=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfrm3+290 yfm3+25 60
20], 'Visible',st217,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd17=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfrm3+125
yfm3+20 165 30], 'Visible',st217,'String','Момент увімкнен. системи гасін., с');
%----- two pushbutton -----

```

```
hBut22 =uicontrol(hFig2,'Style','pushbutton', 'Position',[120 10 150 30], 'String','Повернен. до  
основного вікна', 'Callback','Goback0');
```

```
.....

function dy=eq_in_1a1tt(t,y) %пожежа у приміщенні
% інтегр.модель пожежі з врахуван. витрати маси пального і газообміну
% крізь два отвори, вимушеною ventilation and системи газового гасін.
%+поглинаючий захисний екран на термічно тонкому тілі (TTT)
dy=zeros(36,1);
% y1-denm y2-pm y3-miu y4-denO2, y5-denN2 y6-denCO2 y7-denCO
% y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush y12 - m_burn
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
% y15- температура вільного TTT, K
% y16,y17,...,y34,y35 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів із поглинаючого
% прошарку, K % y36- температура захищеного TTT, K
%-----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 lam1 a1 dens cps;
global h1 dx1 hs;
%-----
global Tf2 al alf2 qrr;
%-----
% fire rooms parametrs
global R0 T0 T_beg Pa alf; % alf=10 коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
%-----
global den_a; % густина зовнішнього повітр., kg/m3
global V k;
k=1.4; %gas adeabat koeficient
%-----
global cp4; % cp O2, j/(kg*K) (912.7+0.2544*t)
cp4=9.2e2;
global cp5; % cp N2, j/(kg*K) (1025.8+0.1676*t)
cp5=1.05e3;
global cp6; % cp CO2, j/(kg*K) (872.5+0.4810*t)
cp6=1.03e3;
global cp7; % cp CO, j/(kg*K) (1030.4+0.1915*t)
cp7=1.02e3;
global cp8; % cp H2O, j/(kg*K) (1840.1+0.5856*t)
cp8=2.01e3;
global cp9; % cp HCl, j/(kg*K) (1840.1+0.5856*t)
cp9=7.8e2;
global cp10; % cp Ar, j/(kg*K) (1840.1+0.5856*t)
cp10=5.2e2;
global cpa;% average total gas heat, j/(kgm*K)(995.2+0.1869*t)
global x4a x5a x6a x7a x8a x9a x10a; % air mass part O2, N2, CO2, CO, H2O, HCl, Ar
cpa=x4a*cp4+x5a*cp5+x6a*cp6+x7a*cp7+x8a*cp8+x9a*cp9+x10a*cp10;
%-----
global Wa Wg; %forses ventilation, m3/c
global cp_t; % cp tush, j/(kg*K)
global gz Fw; %
gz=9.81;
global LO2 LCO2 LCO LH2O LHCl tet Qn D;
LN2=0.0; LAr=0;
```

```

kc=1.0e-8;%м/с
ig=5.1e5; %J/kg
global tau_aut; % automatic time, с
%-----
f=zeros(36,1);
%-----
срв1=den1*ср1; % срв1 – питома ізобарна об’ємна теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
fr1=a1/dx1^2; % fr1-характерна частота – зворотній характерний час прогріву шару
товщиною dx1 1-го прошарку, 1/с
%-----
f(1)=1/V*((Ga(y)+Wa*den_a)+G_tus(y,t)+psi(y,t)-(Gg(y)+Wg*y(1)));
f(2)=(k-1)/V*((Qn*tet-(1-tet)*ig)*psi(y,t)+срa*T0*(Ga(y)+Wa*den_a)...
+ср_t*T_beg*G_tus(y,t)-срm(y).*Tm(y).*(Gg(y)+Wg*y(1))-Qw(y)-Q_rad(y));
f(3)=1/V*(D*psi(y,t)-y(3).*(Gg(y)./y(1)+Wg+kc*Fw));
f(4)=1/V*(x4a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(4)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))-tet*psi(y,t)*LO2);
f(5)=1/V*(x5a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(5)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LN2);
f(6)=1/V*(x6a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(6)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LCO2);
f(7)=1/V*(x7a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(7)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LCO);
f(8)=1/V*(x8a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(8)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LH2O);
f(9)=1/V*(x9a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(9)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LHCl);
f(10)=1/V*(x10a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(10)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LAr);
f(11)=1/V*(G_tus(y,t)-y(11)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1)));
f(12)=-psi(y,t);
f(13)=-(y(13)-Tm(y))/tau_aut; f(14)=key_aut(y);
%-----
f(15)=1/(dens*cps*hs)*alf*(Tm(y)+qrr/alf-y(15))-1/(dens*cps*hs)*alf2*(y(15)-Tf2);
%-----
f(16)=1/cpv1/dx1*(Tm(y)+qrr/alf-y(16))/(1/alf+dx1/2/lam1)-(y(16)-y(17))*fr1;
f(17)=d2(y(16),y(17),y(18))*fr1; f(18)=d2(y(17),y(18),y(19))*fr1;
f(19)=d2(y(18),y(19),y(20))*fr1; f(20)=d2(y(19),y(20),y(21))*fr1;
f(21)=d2(y(20),y(21),y(22))*fr1; f(22)=d2(y(21),y(22),y(23))*fr1;
f(23)=d2(y(22),y(23),y(24))*fr1; f(24)=d2(y(23),y(24),y(25))*fr1;
f(25)=d2(y(24),y(25),y(26))*fr1; f(26)=d2(y(25),y(26),y(27))*fr1;
f(27)=d2(y(26),y(27),y(28))*fr1; f(28)=d2(y(27),y(28),y(29))*fr1;
f(29)=d2(y(28),y(29),y(30))*fr1; f(30)=d2(y(29),y(30),y(31))*fr1;
f(31)=d2(y(30),y(31),y(32))*fr1; f(32)=d2(y(31),y(32),y(33))*fr1;
f(33)=d2(y(32),y(33),y(34))*fr1; f(34)=d2(y(33),y(34),y(35))*fr1;
f(35)=(y(34)-y(35))*fr1-2*(y(35)-y(36))*fr1;
f(36)=1/(dens*cps*hs)*2*lam1/dx1*(y(35)-y(36))...
-1/(dens*cps*hs)*alf2*(y(36)-Tf2);
dy=f;
.....

function Fff=Ff(t)
% Ff(t)-fire area, m2
% Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2 < Ffl
% Ffl - площаь пола, m2
global Ffl Ff0 dFf1 dFf2;
Fff0=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2;
Fff=min(Fff0,Ffl);
.....

```



```

function Gtt=G_tus(y,t)
%витрата газу з системи газового гасін., кг/с
global t_begin_t; %gasiniya begin time, c
global G_t; % gasiniya витрата, кг/с
global T_cr; %межа спрацьовуван. по температурі, К
y14_cr=2*T_cr;
Gtt=G_t*(0.5+1/pi*atan(500*(y(14)-y14_cr/2))+0.5+1/pi*atan(100*(t-t_begin_t)));
.....

function Gaa2=Ga(y)
%приток повітр. крізь два отвори
global hh den_a gz;
Gaa2=Ga1(y,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Ga1(y,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Gaa1=Ga1(y,hd,hu,b)
% витрата повітр., kg/с, b-ширина отвору
%hd,hu-висоти нижнього та верхнього країв отворів, м
global den_a gz;
if hn(y)<hd Gaa1=0;
elseif hn(y)>hu
    Gaa1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y(1)))*b*((hn(y)-hd)^1.5-(hn(y)-hu)^1.5);
    else Gaa1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y(1)))*b*(hn(y)-hd)^1.5;
end;
.....

function Gag=Ga_g(y)
%graf help agree function приток повітр. крізь два отвори, кг/с
Gag(:,1)=Ga_gg(y(:,1),y(:,2));
.....

function Gagg2=Ga_gg(y1,y2)
%graf help agree function приток повітр. крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Gagg2=Ga_gg1(y1,y2,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Ga_gg1(y1,y2,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Gagg1=Ga_gg1(y1,y2,hd,hu,b)
%graf help agree function витрата повітр., kg/с
%hd,hu-висоти нижнього та верхнього країв отворів, м, b-ширина отвору, м
global den_a gz;
if hn_gg(y1,y2)<hd Gagg1=0;
elseif hn_gg(y1,y2)>hu
    Gagg1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y1))*b.*((hn_gg(y1,y2)-hd).^1.5-(hn_gg(y1,y2)-hu).^1.5);
    else Gagg1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y1))*b.*(hn_gg(y1,y2)-hd).^1.5;
end;
.....

function Ggg2=Gg(y)
%відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Ggg2=Gg1(y,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Gg1(y,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Ggg1=Gg1(y,hd,hu,b)
% відтік газів крізь отвір (витрата), kg/с
global den_a gz;
if hn(y)<hd

```

```

    Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y(1).*(den_a-y(1)))*b.*((hu-hn(y)).^1.5-(hd-hn(y)).^1.5);
    elseif hn(y)>hu Ggg1=0;
    else Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y(1).*(den_a-y(1)))*b.*(hu-hn(y)).^1.5;
end;
.....

function Ggg=Gg_g(y)
%graf help agree function відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
Ggg(:,1)=Gg_gg(y(:,1),y(:,2));
.....

function Ggg2=Gg_gg(y1,y2)
%graf help agree function відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Ggg2=Gg_gg1(y1,y2,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Gg_gg1(y1,y2,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Ggg1=Gg_gg1(y1,y2,hd,hu,b)
%graf help agree function відтік газів, кг/с
global den_a gz;
if hn_gg(y1,y2)<hd
    Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y1.*(den_a-y1))*b.*...
        ((hu-hn_gg(y1,y2)).^1.5-(hd-hn_gg(y1,y2)).^1.5);
    elseif hn_gg(y1,y2)>hu Ggg1=0;
    else Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y1.*(den_a-y1))*b.*(hu-hn_gg(y1,y2)).^1.5;
end;
.....

function Goback0 %GUI
global hFig0
if isempty(findobj('Tag','tag_fig0')) Data0
else figure(hFig0)
end;
.....

function GoCallback00
% перевірка і попереджен. про неповноту вводу
%----- global variables -----
global hEd01 hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
global hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
global hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22
global hFig0 hFig1 hFig2
%----- перевірка присутності вікон вводу -----
if isempty(findobj('Tag','tag_fig1')) Data1;
end;
if isempty(findobj('Tag','tag_fig2')) Data2;
end;
%-----
%global index;%index - індекс вибору рас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
%-----
k01=isempty(str2num(get(hEd01,'String')));
k101=isempty(str2num(get(hEd101,'String')));
k102=isempty(str2num(get(hEd102,'String')));

```

```

k103=isempty(str2num(get(hEd103,'String')));
k104=isempty(str2num(get(hEd104,'String')));
k105=isempty(str2num(get(hEd105,'String')));
k106=isempty(str2num(get(hEd106,'String')));
k107=isempty(str2num(get(hEd107,'String')));
k108=isempty(str2num(get(hEd108,'String')));
k109=isempty(str2num(get(hEd109,'String')));
k110=isempty(str2num(get(hEd110,'String')));
k111=isempty(str2num(get(hEd111,'String')));
k112=isempty(str2num(get(hEd112,'String')));
k113=isempty(str2num(get(hEd113,'String')));
k201=isempty(str2num(get(hEd201,'String')));
k202=isempty(str2num(get(hEd202,'String')));
k203=isempty(str2num(get(hEd203,'String')));
k204=isempty(str2num(get(hEd204,'String')));
k205=isempty(str2num(get(hEd205,'String')));
k206=isempty(str2num(get(hEd206,'String')));
k207=isempty(str2num(get(hEd207,'String')));
k208=isempty(str2num(get(hEd208,'String')));
k209=isempty(str2num(get(hEd209,'String')));
k210=isempty(str2num(get(hEd210,'String')));
k211=isempty(str2num(get(hEd211,'String')));
k212=isempty(str2num(get(hEd212,'String')));
k213=isempty(str2num(get(hEd213,'String')));
if get(hPopumenu2,'Value')==4
    k214_215_216_217=0;
elseif get(hRbut21,'Value')==1
k214_215_216_217=isempty(str2num(get(hEd214,'String')))|isempty(str2num(get(hEd217,'String'))
);
else
k214_215_216_217=isempty(str2num(get(hEd214,'String')))|isempty(str2num(get(hEd215,'String'))
)|isempty(str2num(get(hEd216,'String')));
end;
%-----
if k01
    figure(hFig0);
    errordlg('Не введено часовий інтервал.','Поверни до введен.','on');
elseif k101|k102|k103|k104|k105|k106|k107|k108|k109|k110|k111|k112|k113
    figure(hFig1);
    errordlg('Введено не всі дані щодо газообміну.','Поверни до введен.','on');
elseif k201|k202|k203|k204|k205|k206|k207|k208|k209|k210|k211|k212|k213|k214_215_216_217
    figure(hFig2);
    errordlg('Введено не всі дані щодо осередку та гасін.','Поверни до введен.','on');
else GoCallback0;
end;
.....

function GoCallback0
% solution of eq_in_1a1tt -інтегр.модель пожежі з врахуван. витрати пального
% і газообміну крізь два отвори, вимушеною ventilation and системою
% газового гасін. +поглинаючий захисний екран на ТТТ
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1-denm y2-pm y3-miu y4-denO2, y5-denN2 y6-denCO2 y7-denCO

```

```

% y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush y12 - m_burn
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
% y15- температура вільного ТТТ, К
% y16,y17,...,y34,y35 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів
% з поглинаючого прошарку, К
% y36- температура захищеного ТТТ, К
%----- global variables -----
global hEd01 hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
global hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
global hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupmenu2 hRbut21 hRbut22
%-----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 lam1 a1 dens cps;
den1=5e2; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг К)
lam1=0.2; % lam1- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 1-го прошарку, Вт/(м К)
a1=lam1/(den1*cp1); % коефіцієнт температуропровідності матеріалу 1-го прошарку, м2/с
dens=2e3; % густина матеріалу ТТТ, кг/м3
cps=1.0e3; % теплоємність матеріалу ТТТ, Дж/(кг К)
%-----
global h1 dx1 hs;
h1=2e-2; % h1-товщина 1-го прошарку, м
n1=20; %n1- кількість шарів розбит. 1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина шару розбит. 1-го прошарку, м
hs=5e-3; % hs-товщина ТТТ, м
%-----
global Tf2;
Tf2=20+273; % температура середовища у апараті, К
global alf2 qrr;
alf2=0*10; % коефіцієнт тепловіддачі у апараті, Вт/(м2 К)
qrr=0*1e3; % фоновий рівень променистого пит. теплового потоку, Вт/м2
%-----
% fire rooms parametrs
global Pa den_a T0 T_beg R0 alf;
Pa=1.01e5; %давление воздуха, Па
%T0 - температура зовнішнього повітр., К
%T_beg – початкова температура повітр., К
R0=8314; %universal gas constant, J/(kmol*K)
alf=10; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
global V h Ffl Fw;
global Qn u_m LO2 LCO2 LCO LH20 LHCl tet D;
global Ff0 dFf1 dFf2; %площа пожежі Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2 < Ffl
%Ff0=0.5; dFf1=0.1; dFf2=0.01;
%-----
global index;%index - индекс wyboru гас.. газу
global cp_t; %ізобарн. теплоємність гас. газу
global G_t; %гас. витрата, кг/с
global t_begin_t; %гас. begin time, с
global tau_aut; % automatic time, с
global T_cr; %поріг спрацьовуван. по температурі, К

```

```

%-----
%---get string information from edit fields and convert string to number---
tf=str2num(get(hEd01,'String')); % tf - time, s
T0=273+str2num(get(hEd101,'String')); % T0 - температура зовнішнього повітр.
T_beg=273+str2num(get(hEd102,'String')); % tem_begin – початкова температура повітр.
W_in=str2num(get(hEd103,'String')); % W_in - in вимушена витрата, м3/с
W_out=str2num(get(hEd104,'String')); % W_out - out вимушена витрата, м3/с
A_=str2num(get(hEd105,'String')); % A_ - довжина приміщен., м
B_=str2num(get(hEd106,'String')); % B_ - ширина приміщен., м
H_=str2num(get(hEd107,'String')); % H_ - висота приміщен., м
c_1=str2num(get(hEd108,'String')); % -висота нижнього краю 1-го отвору, м
h_1=str2num(get(hEd109,'String')); % h_1 - висота 1-го отвору, м
b_1=str2num(get(hEd110,'String')); % b_1 - ширина 1-го отвору, м
c_2=str2num(get(hEd111,'String')); % c_2 -висота нижн. краю 2-го отвору, м
h_2=str2num(get(hEd112,'String')); % h_2 - висота 2-го отвору, м
b_2=str2num(get(hEd113,'String')); % b_2 - ширина 2-го отвору, м
%-----
Qn=1000*str2num(get(hEd201,'String')); % Qn - питома теплота згор., Дж/кг
u_m=str2num(get(hEd202,'String')); % u_m – питома швидкість вигор., кг/(с м2)
tet=str2num(get(hEd203,'String')); % tet - коеф. повноти згор.
D=str2num(get(hEd204,'String')); % D - коеф. димоутвор. здатності, Непер*м2/с
LO2=str2num(get(hEd205,'String')); % LO2 - мас.О2/мас. пального
LCO2=str2num(get(hEd206,'String')); % LCO2 - мас.СO2/мас. пального.
LCO=str2num(get(hEd207,'String')); % LCO - мас.СO/мас. пального.
LH2O=str2num(get(hEd208,'String')); % LH2O - мас.Н2O/мас. пального.
LHCl=str2num(get(hEd209,'String')); % LHCl - мас.НCl/мас. пального.
m0=str2num(get(hEd210,'String')); % m0 - %begining fuel mass, kg
Ff0=str2num(get(hEd211,'String')); % Ff0 - м2, % Ff(t)- площа пожежі, м2
dFf1=str2num(get(hEd212,'String')); % dFf1 - м2/с % Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2, м2
dFf2=str2num(get(hEd213,'String')); % dFf2 - м2/с2
%-----
index=get(hPopupMenu2,'Value');
global cp6 cp5 cp10; % j/(kg*K)
switch index
case 1
cp_t=cp6; G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
if get(hRbut22,'Value')==1
tau_aut=str2num(get(hEd215,'String')); T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
t_begin_t=1e15;
else tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
end;
case 2
cp_t=cp5; G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
if get(hRbut22,'Value')==1
tau_aut=str2num(get(hEd215,'String'));
T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String')); t_begin_t=1e15;
else tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
end;
case 3
cp_t= cp10; G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
if get(hRbut22,'Value')==1
tau_aut=str2num(get(hEd215,'String'));

```

```

    T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String')); t_begin_t=1e15;
else
    tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
end;
case 4
    cp_t= 0; G_t=0; tau_aut=1e15; T_cr=1e6; t_begin_t=1e15;
end;
%-----
V=A_*B_*H_; %volume, m3
h=H_/2; %половина висоти приміщен.
Ffl=A_*B_; % площа підлоги, м2
Fw=2*(A_*B_+A_*H_+B_*H_); % площа огорожі, м2
den_a=Pa/T0*29/R0; % density out air, kg/m3
den_begin=Pa/T_beg*29/R0; % початкова густина повітр., kg/m3
global Wa Wg; %forses ventilation, м3/с
Wa=W_in; % вимушена in витрата, м3/с
Wg=W_out; % вимушена out витрата, м3/с
global hh;%параметри прорізів
hh(1,1)=c_1; hh(1,2)=hh(1,1)+h_1; hh(1,3)=b_1;%hh(:,1),hh(:,2)-висоти ниж та верх країв
прорізів
hh(2,1)=c_2; hh(2,2)=hh(2,1)+h_2; hh(2,3)=b_2;%hh(:,3)-ширини прорізів
global x4a x5a x6a x7a x8a x9a x10a x11a; % air mass part O2, N2, CO2, CO, H2O, HCl, Ar
x4a=0.232; x5a=0.755; x6a=0.0; x7a=0.0; x8a=0.0; x9a=0.0; x10a=0.013; x11a=0.0;
%-----
y1=den_begin; y2=Pa; y3=0;
y4=x4a*y1; y5=x5a*y1; y6=x6a*y1; y7=x7a*y1; y8=x8a*y1; y9=x9a*y1; y10=x10a*y1;
y11=x11a*y1; y12=m0; y13=T_beg; y14=0;
T0=T_beg;
y15=T0; y16=T0; y17=T0; y18=T0; y19=T0; y20=T0; y21=T0; y22=T0;
y23=T0; y24=T0; y25=T0; y26=T0; y27=T0; y28=T0; y29=T0; y30=T0;
y31=T0; y32=T0; y33=T0; y34=T0; y35=T0; y36=T0;
%----- Numerical solution -----
% solution of fire_eq_12 -----
%[T,Y]=ode15s('eq_in_12',[0 tf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13 y14]);
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задание точности
[T,Y]=ode15s('eq_in_1a1tt',[0 tf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13...
    y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20 y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
    y31 y32 y33 y34 y35 y36],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,psi_g(Y,T))
title('Fire velocity')
xlabel('\tau, c');
ylabel('\psi , kg/c');
grid on;
%-----
figure;
plot(T,Tm_g(Y)-273,T,Y(:,16)-273,T,Y(:,15)-273,T,Y(:,36)-273); %
legend('t_{m}','t_{зовн. поверхні захисного шару}',...
    't_{поверхні тіла без захисту}','t_{поверхні тіла із захистом}');
ylabel('t, ^{o}C');
xlabel('\tau, c');

```

grid on;

```

.....

function GoCallbackPopmen2
%відпрацюван. видимості вводу гас. засобів
global hPopupMenu2 hFm231 hRbut21 hRbut22
global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    stFm_Rb21_22='off'; st214='off';st215_16='off';st217='off';
elseif get(hRbut21,'Value')==1
    stFm_Rb21_22='on'; st214='on';st215_16='off';st217='on';
else
    stFm_Rb21_22='on'; st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hFm231,'Visible',stFm_Rb21_22); set(hRbut21,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hRbut22,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)
.....

```

```

function GoCallbackRbut21
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22
global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----
if get(hRbut21,'Value')==1
    set(hRbut22,'Value',0);
else set(hRbut22,'Value',1);
end;
%-----
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
else st214='on';st215_16='off';st217='on';
end;
%-----
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)
.....

```

```

function GoCallbackRbut22
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----
if get(hRbut22,'Value')==1
    set(hRbut21,'Value',0);
else set(hRbut21,'Value',1);

```

```

end;
%-----
if get(hPopupmenu2,'Value')==4
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
else st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)
.....

function GoData1
%GUI
global hFig1
if isempty(findobj('Tag','tag_fig1')) Data1
else figure(hFig1)
end;
.....

function GoData2
%GUI
global hFig2
if isempty(findobj('Tag','tag_fig2')) Data2
else figure(hFig2)
end;
.....

function hnn=hn(y)
% висота нейтральної зони, м
global den_a h Pa gz;
hnn=h-(y(2)-Pa)/gz/(den_a-y(1)+0.0001);
.....

function hng=hn_g(y)
%graf help agree function висота нейтральної зони, м
hng(:,1)=hn_gg(y(:,1),y(:,2));
.....

function hngg=hn_gg(y1,y2)
%graf help agree function висота нейтральної зони, м
global den_a h Pa gz;
hngg=h-(y2-Pa)/gz./(den_a-y1+0.0001);
.....

function K_t=K_tus(y)
% гасін. koeficient
% y1-denm y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush
global index; %index - індекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
switch index
case 1 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.39-(y(11)+y(6))./y(1))));
case 2 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.85-(y(11)+y(5))./y(1))));
case 3 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.67-(y(11)+y(10))./y(1))));
case 4 K_t=1;

```



```
end;
```

```
function K_t_gg=K_tus_gg(y1,y5,y6,y10,y11)
% гасін. koeficient
% y1-denm y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush
global index; %index - індекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar
switch index
case 1 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.39-(y11+y6)./y1)));
case 2 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.85-(y11+y5)./y1)));
case 3 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.67-(y11+y10)./y1)));
case 4 K_t_gg=1;
end;
```

```
function keyy=key_aut(y)
% function ключ системи автоматичного гасін: y14'=key_aut(y)
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
global T_cr; %поріг спрацьовуван. по температурі, K;
y14_cr=4*T_cr;
keyy=(-y(14).^2-y(13)+T_cr).*(y(14)-y14_cr);
```

```
function MyClose
%GUI
global hFig0 hFig1 hFig2
select=questdlg('Ви бажаєте закрити програму?', 'Запит о закінченні роботи', 'Так','Ні','Ні');
switch select
case 'Так' delete(gcf)
otherwise return
end;
```

```
function psii=psi(y,t)
% burn velocity, kg/c
% y1-denm y4-denO2 y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush y12-m_burn
global u_m x4a;
%u_m=0.047 kg/(m2*c)
psii=u_m *Ff(t).*K(y).*K_tus(y).*(0.5+1/pi*atan(1000*y(12)));
%-----
function Kk=K(y)
% burn velocity O2 koeficient
global x4a; % x4a=0.232 - beginning mas part O2
Kk=(y(4)./y(1)/x4a).^2;
```

```
function psig=psi_g(y,t)
%graf help agree function burn velocity, kg/c
% y1-denm y4-denO2 y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush y12-m_burn
global u_m x4a; % x4a=0.232 - beginning mas part O2
psig(:,1)=psi_gg(y(:,1),y(:,4),y(:,5),y(:,6),y(:,10),y(:,11),y(:,12),t);
%-----
function psigg=psi_gg(y1,y4,y5,y6,y10,y11,y12,t)
% graf help agree function burn velocity, kg/c
```

```

global u_m x4a;
psigg=u_m*Ff(t).*K_gg(y1,y4).*K_tus_gg(y1,y5,y6,y10,y11).*(0.5+1/pi*atan(1000*y12));
%-----
function Kgg=K_gg(y1,y4)
% burn velocity O2 koefisient
global x4a;
Kgg=(y4./y1/x4a).^2;
.....

function qc=q_c(T1,T2,x)
% питомий конвекційний тепловий потік у плоскому прошарку, Вт/м2
%T1 T2- температури поверхонь, К
% x - товщина прошарку між поверхнями, м
% lam_a - коефіцієнт теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% nu_a=2.0e-5; % коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
Pr_a=0.7; % критерій Прандтл. Повітр.
gg=9.8; % прискорен. вільного падін., м/с2
%-----
qc=0.18*(gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2.*nu_a*((T1+T2)/2-273).^2)*Pr_a).^0.25.*lam_a((T1+T2)/2-273).*(T1-T2)/x;
%-----
function lam=lam_a(t)
% коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% t - температура повітр. по Цельсію
lam=(2.4+0.0057*t)*1.0e-2;
%-----
function nu=nu_a(t)
% коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
nu=(1.33+0.00044*t)*1.0e-5;
.....

function qr=q_r(T1,T2,ep1,ep2)
% radiation heat density в прошарку, W/m2
%T1 T2- температури поверхонь, К
%ep1 ep2- ступені чорноти поверхонь
%-----
ep12=1/(1/ep1+1/ep2-1);
qr=ep12*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....

function Qrr=Q_rad(y)
% radiation heat flu, W
global T_beg Fw;
ep=0.5;
Qrr=ep*5.67e-8*(Tm(y)^4-T_beg^4)*Fw;
.....

function Qww=Qw(y)
% convection heat flu, W
global T_beg Fw alf;
%alf=10; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(м2*К)
Qww=alf*(Tm(y)-T_beg)*Fw;
.....

function Start15 %start of Gui15

```

```

% інтегральна модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% і газообміну крізь два прорізи, вимушеною ventilation and системи
% газового гасін.+захисний поглинаючий екран на термічно товстому тілі
global hFig0
%-----
if isempty(findobj('Tag','tag_fig0')) Data0
else figure(hFig0)
end;
.....

function Tg=Tm(y) % gas temperature, K
global R0;
% y1-denm y4-denO2, y5-denN2 y6-denCO2 y7-denCO
% y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush
% global m4 m5 m6 m7 m8 m9 m10 m11;
% m4=32; m5=28; m6=44; m7=28; m8=18; m9=36.5 m10=40 m11=(28,44,40);
Tg=y(2)/R0./y(1)*29;
.....

function Tmg=Tm_g(y)
%graf help agree function gas temperature
global R0;
Tmg(:,1)=Tm_gg(y(:,1),y(:,2));
%-----
function Tmgg=Tm_gg(y1,y2)
% graf help agree function gas temperature
global R0;
Tmgg=y2/R0./y1*29;
.....

```

Додаток Г

Комп'ютерна програма розрахунку температур і теплових потоків при сталому нагріванні і захисті відбиваючими екранами

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) В залежності від типу відбиваючого екрану вибирається файл «Go***.m». В його текст вводяться чисельні значення всіх параметрів екрануючої системи (в якості фіксованої температури шкіри людини взято 40°C) і час розгляду. Далі цей файл запускається на виконання. В результаті програма почне обраховуватися і видасть результат (графіки залежностей температур і питомих теплових потоків від часу теплового впливу).

Різним варіантам відбиваючих екранів відповідають наступні файли:

1) одношаровий відбиваючий екран з повітряним прошарком - «Go_eq_screen1.m»;

2) двошаровий відбиваючий екран з повітряними прошарками – «Go_eq_screen2_2.m»;

3) одношаровий відбиваючий екран з теплопровідним оптично тонким прошарком - «Go_eq_screen_1op_h.m»;

4) двошаровий відбиваючий екран з теплопровідними оптично тонкими прошарками – «Go_eq_screen_2op_h.m»;

5) одношаровий відбиваючий екран з трьома теплопровідними оптично тонкими прошарками і одним повітряним прошарком (напівважкий вогнезахисний костюм) - «Go_eq_screen_m_2o_a_o.m»;

```
.....
function d22=d2(y1,y2,y3)
% друг. різниц. у; y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "y"
%-----
d22=y1+y3-2*y2;
```

```
.....

function dq_on_dx=dqr(T1,T,T2,ep1,ep2,kap)
% градієнт променистого теплового потоку у оптично тонкому (кара*h<<1)
```

```
% шарі,Вт/м3
%T1 - temperature гор-чої поверхні, К
%T - temperature у точці всередині пластини, К
%T2 - temperature холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-чої поверхні
%ep2 - ступінь чорноти холодної поверхні
%кар - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.,1/м
sigma=5.67e-8; % sigma - константа випромін.. абсолютно чорного тіла, Вт/(м2 К4)
%-----
dq_on_dx=2*кар*sigma*(ep(ep1,ep2)*(T1.^4/ep(ep2,ep2)+T2.^4/ep(ep1,ep1))-2*T.^4);
```

```
function ep12=ep(ep1,ep2)
% ступінь чорноти системи паралель. площин
%ep1 - ступінь чорноти гор-чої поверхні
%ep1 - ступінь чорноти холодної поверхні
%-----
ep12=1/(1/ep1+1/ep2-1);
```

```
function dy=eq_screen1(tt,y)
% solution of eq_screen1 - прогрів одношар. екрану
% tt- врем., с - незалежний аргумент
% y1-T, температура екрану при x=x1, К
% y2-T, температура екрану при x=x2, К
% y3-T2 -температура екрану при спрощеному описі, К
%-----
f=zeros(2,1);
%----- global variables -----
global eps_s eps_w eps_f;
global den cp;
global Tf Tw;
global h;
global x1 x2;
%-----
f(1)=1/(den*cp*h)*(q_fr(Tf,y(1),eps_f,eps_s)...
    -q_r(y(1),Tw,eps_s,eps_w)-q_c(y(1),Tw,x1));
f(2)=1/(den*cp*h)*(q_fr(Tf,y(2),eps_f,eps_s)...
    -q_r(y(2),Tw,eps_s,eps_w)-q_c(y(2),Tw,x2));
f(3)=1/(den*cp*h)*q_fr(Tf,Tw,eps_f,eps_s);
%-----
dy=f;
```

```
function dy=eq_screen2_2(tt,y,h2)
% solution of eq_screen2_2 - прогрів двушарового екрану
% tt- time, с - незалежний аргумент
% y1-T1, температура зовнішнього екрану, К
% y2-T2 -температура внутрішнього екрану, К
% y3-T1, температура зовнішнього екрану спрощен., К
% y4-T2 -температура внутрішнього екрану спрощен., К
```

```

% h1- товщина зовнішнього екрану, m
% h2- товщина внутрішнього екрану, m
%-----
f=zeros(4,1);
%----- global variables -----
global eps_s eps_w eps_f;
global den cp;
global x1 x2;
global Tf Tw;
global h1 h2;
%-----
f(1)=1/(den*cp*h1)*(q_fr(Tf,y(1),eps_f,eps_s)...
    -q_r(y(1),y(2),eps_s,eps_s)-q_c(y(1),y(2),x1));
f(2)=1/(den*cp*h2)*(q_r(y(1),y(2),eps_s,eps_s)+q_c(y(1),y(2),x1)...
    -q_r(y(2),Tw,eps_s,eps_w)-q_c(y(2),Tw,x2));
f(3)=1/(den*cp*h1)*q_fr(Tf,Tw,eps_f,eps_s);
f(4)=1/(den*cp*h2)*(q_r(y(3),Tw,eps_s,eps_s)+q_c(y(3),Tw,x1));
%-----
dy=f;

```

```

.....

function dy=eq_screen_1op_h(tt,y)
% система рівн-нь задачі - прогрів одношар. екрану
% з оптично тонким теплопровідним прошарком (кара*h<<1)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів прошарку, K
% y11-T, температура екрану, K
%-----
f=zeros(11,1);
%----- global variables -----
global eps_sf eps_sw eps_w eps_f;
global dens cps hs;
global dx;
global den cp lam a;
global kara;
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
%-----
cpv=den*cp; % cpv - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу прошарку, Дж/(м3 K)
fr=a/dx^2; % fr-характерн. частота-зворотній характерний час прогріва шару товщиною dx, 1/c
%-----
f(1)=(d2(y(11),y(1),y(2))+y(11)-y(1))*fr+...
    1/cpv*dqr(y(11),y(1),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(2)=d2(y(1),y(2),y(3))*fr+...
    1/cpv*dqr(y(11),y(2),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(3)=d2(y(2),y(3),y(4))*fr+...
    1/cpv*dqr(y(11),y(3),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(4)=d2(y(3),y(4),y(5))*fr+...
    1/cpv*dqr(y(11),y(4),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(5)=d2(y(4),y(5),y(6))*fr+...
    1/cpv*dqr(y(11),y(5),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(6)=d2(y(5),y(6),y(7))*fr+...

```

```

1/cpv*dqr(y(11),y(6),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(7)=d2(y(6),y(7),y(8))*fr+...
1/cpv*dqr(y(11),y(7),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(8)=d2(y(7),y(8),y(9))*fr+...
1/cpv*dqr(y(11),y(8),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(9)=d2(y(8),y(9),y(10))*fr+...
1/cpv*dqr(y(11),y(9),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(10)=(d2(y(9),y(10),Tw)+Tw-y(10))*fr+...
1/cpv*dqr(y(11),y(10),Tw,eps_sw,eps_w,kapa);
f(11)=1/(dens*cps*hs)*(q_fr(Tf,y(11),eps_f,eps_sf)...
-q_r(y(11),Tw,eps_sw,eps_w)-2*lam/dx*(y(11)-y(1)));
%-----
dy=f;

```

```

.....
function dy=eq_screen_2op_h(tt,y)
% система рівн-нь задачі solution of eq_screen_2op_h - прогрів 2-х шарового екрану
% с оптично тонкими теплопровідними прошарками ((kapa1*h1+kapa2*h2)<<1)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1,y2,...,y4,y5 - температури 1-го,2-го,...,5-го шарів першого прошарку, К
% y6,y7,...,y9,y10 - температури 6-го,7-го,...,10-го шарів другого прошарку, К
% y11-T, температура першого екрану, К
% y12-T, температура другого екрану, К
%----- global variables -----
global eps_sf1 eps_sw1 eps_sf2 eps_sw2 eps_w eps_f;
global dens1 cps1 hs1 dens2 cps2 hs2;
global dx1 dx2;
global den1 cp1 lam1 a1 den2 cp2 lam2 a2;
global kapa1 kapa2;
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
%-----
f=zeros(12,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; % cpv1 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
cpv2=den2*cp2; % cpv2 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 2-го прошарку,
Дж/(м3 К)
fr1=a1/dx1^2; % fr1-характерн. частота-зворотній характерний час прогріва ш. товщиною dx1
1-го прошарку, 1/c
fr2=a2/dx2^2; % fr2-характерн. частота-зворотній характерний час прогріва ш. товщиною dx2
2-го прошарку, 1/c
%-----
f(1)=(d2(y(11),y(1),y(2))+y(11)-y(1))*fr1+...
1/cpv1*dqr(y(11),y(1),y(12),eps_sw1,eps_sf2,kapa1);
f(2)=d2(y(1),y(2),y(3))*fr1+...
1/cpv1*dqr(y(11),y(2),y(12),eps_sw1,eps_sf2,kapa1);
f(3)=d2(y(2),y(3),y(4))*fr1+...
1/cpv1*dqr(y(11),y(3),y(12),eps_sw1,eps_sf2,kapa1);
f(4)=d2(y(3),y(4),y(5))*fr1+...
1/cpv1*dqr(y(11),y(4),y(12),eps_sw1,eps_sf2,kapa1);
f(5)=(d2(y(4),y(5),y(12))+y(12)-y(5))*fr1+...

```

```

1/cpv1*dqr(y(11),y(5),y(12),eps_sw1,eps_sf2,kapa1);
f(6)=(d2(y(12),y(6),y(7))+y(12)-y(6))*fr2+...
1/cpv2*dqr(y(12),y(6),Tw,eps_sw2,eps_w,kapa2);
f(7)=d2(y(6),y(7),y(8))*fr2+...
1/cpv2*dqr(y(12),y(7),Tw,eps_sw2,eps_w,kapa2);
f(8)=d2(y(7),y(8),y(9))*fr2+...
1/cpv2*dqr(y(12),y(8),Tw,eps_sw2,eps_w,kapa2);
f(9)=d2(y(8),y(9),y(10))*fr2+...
1/cpv2*dqr(y(12),y(9),Tw,eps_sw2,eps_w,kapa2);
f(10)=(d2(y(9),y(10),Tw)+Tw-y(10))*fr2+...
1/cpv2*dqr(y(12),y(10),Tw,eps_sw2,eps_w,kapa2);
f(11)=1/(dens1*cps1*hs1)*(q_fr(Tf,y(11),eps_f,eps_sf1)...
-q_r(y(11),y(12),eps_sw1,eps_sf2)-2*lam1/dx1*(y(11)-y(1)));
f(12)=1/(dens2*cps2*hs2)*(q_r(y(11),y(12),eps_sw1,eps_sf2)+2*lam1/dx1*(y(5)-y(12))...
-q_r(y(12),Tw,eps_sw2,eps_w)-2*lam2/dx2*(y(12)-y(6)));
%-----
dy=f;

```

```

.....

function dy=eq_screen_m_2o_a_o(tt,y)
% система рівн-нь задачі solution of eq_screen_m_2o_a_o - прогрів 3-х шарового екрану
% метал-2оптич.тонк.ш.-повітр.ш.-оптич.тонк.ш.
% с оптично тонкими теплопровідними прошарками ((kapa1*h1+kapa2*h2+kapa3*h3)<<1)
% tt- time, с - незалежний аргумент
% y1,y2,...,y4,y5 - температури 1-го,2-го,...,5-го шарів з першого прошарку, К
% y6,y7,...,y9,y10 - температури 6-го,7-го,...,10-го шарів з другого прошарку, К
% y11,y12,...,y14,y15 - температури 11-го,12-го,...,15-го шарів из третьей прошарку, К
% y16-T, температура метал. екрану, К
%----- global variables -----
global eps_sf eps_sw eps_w eps_f;
global dens cps hs;
global dx1 dx2 dx3 ha;
global den1 cp1 lam1 a1 den2 cp2 lam2 a2 den3 cp3 lam3 a3;
global kapa1 kapa2 kapa3;
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
%-----
f=zeros(16,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; % cpv1 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
cpv2=den2*cp2; % cpv2 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 2-го прошарку,
Дж/(м3 К)
cpv3=den3*cp3; % cpv3 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 3-го прошарку,
Дж/(м3 К)
fr1=a1/dx1^2; % fr1-характерн. частота-зворотній характерний час прогріву ш. товщиною dx1
1-го прошарку, 1/с
fr2=a2/dx2^2; % fr2-характерн. частота-зворотній характерний час прогріву ш. товщиною dx2
2-го прошарку, 1/с
fr3=a3/dx3^2; % fr3-характерн. частота-зворотній характерний час прогріву ш. товщиною dx3
3-го прошарку, 1/с
%-----

```



```

f(1)=(d2(y(16),y(1),y(2))+y(16)-y(1))*fr1+...
    1/cpv1*dqr(y(16),y(1),Tw,eps_sw,eps_w,kapa1);
f(2)=d2(y(1),y(2),y(3))*fr1+...
    1/cpv1*dqr(y(16),y(2),Tw,eps_sw,eps_w,kapa1);
f(3)=d2(y(2),y(3),y(4))*fr1+...
    1/cpv1*dqr(y(16),y(3),Tw,eps_sw,eps_w,kapa1);
f(4)=d2(y(3),y(4),y(5))*fr1+...
    1/cpv1*dqr(y(16),y(4),Tw,eps_sw,eps_w,kapa1);
f(5)=(y(4)-y(5))*fr1-1/cpv1/dx1*(y(5)-y(6))*2/(dx1/lam1+dx2/lam2)+...
    1/cpv1*dqr(y(16),y(5),Tw,eps_sw,eps_w,kapa1);
f(6)= 1/cpv2/dx2*(y(5)-y(6))*2/(dx1/lam1+dx2/lam2)-(y(6)-y(7))*fr2+...
    1/cpv2*dqr(y(16),y(6),Tw,eps_sw,eps_w,kapa2);
f(7)=d2(y(6),y(7),y(8))*fr2+...
    1/cpv2*dqr(y(16),y(7),Tw,eps_sw,eps_w,kapa2);
f(8)=d2(y(7),y(8),y(9))*fr2+...
    1/cpv2*dqr(y(16),y(8),Tw,eps_sw,eps_w,kapa2);
f(9)=d2(y(8),y(9),y(10))*fr2+...
    1/cpv2*dqr(y(16),y(9),Tw,eps_sw,eps_w,kapa2);
f(10)=(y(9)-y(10))*fr2-1/cpv2/dx2*(y(10)-
y(11))./(dx2/2/lam2+1./al_c(y(10),y(11),ha)+dx3/2/lam3)+...
    1/cpv2*dqr(y(16),y(10),Tw,eps_sw,eps_w,kapa2);
f(11)=1/cpv3/dx3*(y(10)-y(11))./(dx2/2/lam2+1./al_c(y(10),y(11),ha)+dx3/2/lam3)-(y(11)-
y(12))*fr3+...
    1/cpv3*dqr(y(16),y(11),Tw,eps_sw,eps_w,kapa3);
f(12)=d2(y(11),y(12),y(13))*fr3+...
    1/cpv3*dqr(y(16),y(12),Tw,eps_sw,eps_w,kapa3);
f(13)=d2(y(12),y(13),y(14))*fr3+...
    1/cpv3*dqr(y(16),y(13),Tw,eps_sw,eps_w,kapa3);
f(14)=d2(y(13),y(14),y(15))*fr3+...
    1/cpv3*dqr(y(16),y(14),Tw,eps_sw,eps_w,kapa3);
f(15)=(d2(y(14),y(15),Tw)+Tw-y(15))*fr3+...
    1/cpv3*dqr(y(16),y(15),Tw,eps_sw,eps_w,kapa3);
f(16)=1/(dens*cps*hs)*(q_fr(Tf,y(16),eps_f,eps_sf)-...
    q_r(y(16),Tw,eps_sw,eps_w)-2*lam1/dx1*(y(16)-y(1)));
dy=f;
%-----
function al=al_c(T1,T2,x)
% коефіцієнт тепловіддачі вільною конвекцією крізь плоский повітряний зазор, Вт/(м2 К)
% q=alf_c*(T1-T2), Вт/м2
%T1 - температура горючої поверхні, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%x - товщина зазора між поверхнями, м
%-----
Pr_a=0.7; % критерій Прандтля повітря.
gg=9.8; % прискорен. вільного падін., м/с2
%-----
al=0.18*(gg*(abs(T1-T2)+1e-12)*x^3./((T1+T2)/2.*nu_a((T1+T2)/2-
273).^2)*Pr_a).^0.25.*lam_a((T1+T2)/2-273)/x;
%-----
function lam=lam_a(t)
% коеф. теплопровідності повітря, Вт/(м К)
% t - температура повітря по Цельсію

```

```

lam=(2.4+0.0057*t)*1.0e-2;
%-----
function nu=nu_a(t)
% коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
% t - температура повітр. по Цельсию
nu=(1.33+0.00044*t)*1.0e-5;

.....

function Go_eq_screen1
% solution of eq_screen1 - прогрів одношар. екрану
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1-T, температура екрану при x=x1, K
% y2-T, температура екрану при x=x2, K
% y3-T2 -температура екрану при спрощеному описі, K
%----- global variables -----
global eps_s eps_w eps_f;
eps_s=0.2; % ступінь чорноти поверхонь екранів
eps_w=0.9; % ступінь чорноти захищеної поверхні
eps_f=0.8; % ступінь чорноти полум.
global den cp;
den=2e3; % густина матеріалу екрану, кг/м3
cp=1.0e3; % теплоємність матеріалу екрану, Дж/(кг K)
global h; % h-товщина екрану, m
h=3e-3;
global x1 x2;
x1=1e-2; % distance1 without screen and body, m
x2=10e-2; % distance2 without screen and body, m
qcr=1200; % qcr- критичний рівень питомого теплового потоку на поверхню захисту, Вт/м2
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
Tw=40+273; % температура тіла, K
Tf=1000+273; % температура полум., K
%-----
y1=Tw; y2=Tw; y3=Tw;
ttf=150; % ttf - time розгледу, s
%-----
gamma=eps_f*eps_w*5.67e-8*(Tf^4-Tw^4)/(den*cp*h);
%-----
% Numerical solution of eq_screen-----
options=odeset('RelTol',1.0e-5,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[tt,y]=ode15s(@eq_screen1,[0 ttf],[y1 y2 y3],options);
%-----
%----- graph plotting -----
figure;
h=plot(tt,y(:,1)-273,'k--',tt,y(:,2)-273,'k-.',tt,y(:,3)-273,'k.-');
legend('t_{s.real} при x_s=x_1','t_{s.real} при x_s=x_2','t_{s.simple}');
ylabel('t_s(\tau), ^{\circ}C');
xlabel('\tau, c');
title('Температура захисної накладки')
grid on;
%-----
figure;

```

```

plot(tt,q_fr(Tf,y(:,1),eps_f,eps_s),'--',...
      tt,q_fr(Tf,y(:,2),eps_f,eps_s),'-.',...
      tt,q_fr(Tf,y(:,3),eps_f,eps_s),'-.',...
      tt,q_tot(y(:,1),Tw,eps_s,eps_w,x1),'--',...
      tt,q_tot(y(:,3),Tw,eps_s,eps_w,x1),'--',...
      tt,q_tot(y(:,2),Tw,eps_s,eps_w,x2),'-.',...
      tt,q_tot(y(:,3),Tw,eps_s,eps_w,x2),'-.',...
      tt,0*y(:,1)+qcr,'-');
legend('q_{ f.real} при x_s=x_1',...
       'q_{ f.real} при x_s=x_2',...
       'q_{ f.simple}',...
       'q_{ *.real} при x_s=x_1',...
       'q_{ *.simple} при x_s=x_1',...
       'q_{ *.real} при x_s=x_2',...
       'q_{ *.simple} при x_s=x_2',...
       'q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомий тепловий потік')
grid on;

```

```

function Go_eq_screen2_2
% solution of eq_screen2_2 - прогрів двушарового екрану
% точне і спрощене рішен.
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1-T1, температура зовнішнього екрану, К
% y2-T2 -температура внутрішнього екрану, К
% y3-T1, температура зовнішнього екрану спрощен., К
% y4-T2 -температура внутрішнього екрану спрощен., К
% h1- товщина зовнішнього екрану, m
% h2- товщина внутрішнього екрану, m
%----- global variables -----
global eps_s eps_w eps_f;
eps_s=0.2; % ступінь чорноти поверхонь екранів
eps_w=0.9; % ступінь чорноти захищеної поверхні
eps_f=0.8; % ступінь чорноти полум.
global den cr;
den=2e3; % густина матеріалу екрану, кг/м3
cr=1.0e3; % теплоємність матеріалу екрану, Дж/(кг К)
global h1 h2;
h1=2e-3; % h1=h1+h2 -сумарн. товщина екранів, m
h2=3e-3; % h2-товщина внутрішнього екрану, m
global x1 x2;
x1=1e-2; % distance without screens, m
x2=5e-2; % distance without screen and body, m
qcr=1200; % qcr- критичний рівень питомого теплового потоку на поверхню захисту, Вт/м2
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
Tw=40+273; % температура тіла, К
Tf=1000+273; % температура полум., К
%-----

```

```

y1=Tw; y2=Tw; y3=Tw; y4=Tw;
ttf=200; % ttf - time розгледу, s
%-----
% Numerical solution of eq_screen-----
options=odeset('RelTol',1.0e-5,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
sol=ode15s(@eq_screen2_2,[0 ttf],[y1 y2 y3 y4],options,h2);
%--побудова графіку-----
figure;
h=plot(sol.x,sol.y(1,:)-273,'k-',sol.x,sol.y(2,:)-273,'k--',sol.x,sol.y(3,:)-273,'k-',sol.x,sol.y(4,:)-
273,'k--','LineWidth',1)
legend('t_{s1.real}','t_{s2.real}','t_{s1.simple}','t_{s2.simple}');
ylabel('t,{o}C');
xlabel('\tau, c');
title('Температура шарів екрану')
grid on;
% Numerical solution of eq_screen-----
options=odeset('RelTol',1.0e-5,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[tt,y]=ode15s(@eq_screen2_2,[0 ttf],[y1 y2 y3 y4],options,h2);
figure;
plot(tt,q_fr(Tf,y(:,1),eps_f,eps_s),'-',...
tt,q_fr(Tf,y(:,3),eps_f,eps_s),'-',...
tt,q_tot(y(:,2),Tw,eps_s,eps_w,x2),'--',...
tt,q_tot(y(:,4),Tw,eps_s,eps_w,x2),'--',...
tt,0*y(:,1)+qcr,'-');
legend('q_{ f.real}',...
'q_{ f.simple}',...
'q_{ *.real}',...
'q_{ *.simple}',...
'q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомий тепловий потік')
axis([0,200,0,2.5e4]);
grid on;
figure;
plot(tt,q_tot(y(:,2),Tw,eps_s,eps_w,x2),'--',...
tt,q_tot(y(:,4),Tw,eps_s,eps_w,x2),'--',...
tt,0*y(:,1)+qcr,'-');
legend('q_{ *.real}',...
'q_{ *.simple}',...
'q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомий тепловий потік на поверхню захисту')
axis([0,200,0,0.2e4]);
grid on;

```

```

.....

function Go_eq_screen_1op_h
% solution of eq_screen_1op_h - прогрів одношарового екрану
% с оптично тонким теплопровідним прошарком (кара*h<<1)
% tt- time, c - незалежний аргумент

```

```

% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів прошарку, K
% y11-T, температура екрану, K
%----- global variables -----
global eps_sf eps_sw eps_w eps_f;
eps_sf=0.2; % ступінь чорноти зовнішньої поверхні екрану
eps_sw=0.2; % ступінь чорноти внутрішньої поверхні екрану
eps_w=0.9; % ступінь чорноти захищеної поверхні
eps_f=0.8; % ступінь чорноти полум.
global dens cps hs;
dens=2e3; % густина матеріалу екрану, кг/м3
cps=1.0e3; % теплоємність матеріалу екрану, Дж/(кг K)
hs=3e-3; % hs-товщина екрану, m
global dx;
h=2e-2; % h-товщина прошарку, m
n=10; %n- кількість шарів розбит.
dx=h/n; %ширина ш. розбит. прошарку, m
global den cp lam a;
den=1e2; % густина матеріалу прошарку, кг/м3
cp=2.0e3; % теплоємність матеріалу прошарку, Дж/(кг K)
lam=0.2; % lam- коефіцієнт теплопровідності матеріалу прошарку, Вт/(м K)
a=lam/(den*cp); % a - коефіцієнт температуропровідності матеріалу прошарку, м2/с
global kara;
kara=20; % кара - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.,1/м
qcr=1200; % qcr- критичний рівень питомого теплового потоку на поверхню захисту, Вт/м2
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
Tw=40+273; % температура тіла, K
Tf=1000+273; % температура полум., K
%-----
y1=Tw; y2=Tw; y3=Tw; y4=Tw; y5=Tw; y6=Tw; y7=Tw; y8=Tw; y9=Tw; y10=Tw; y11=Tw;
ttf=200; % ttf - time розгл-ду, s
% Numerical solution of eq_screen-----
options=odeset('RelTol',1.0e-5,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[tt,y]=ode15s(@eq_screen_1op_h,[0 ttf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11],options);
%----- graph plotting -----
figure;
subplot(2,1,1)
plot(tt,y(:,11)-273,tt,0.5*(y(:,5)+y(:,6))-273,tt,0*y(:,10)+Tw-273);
    legend('t_{s}','t_{ у середині прошарку}','t_{ *}');
    ylabel('t(\tau),^{o}C');
xlabel('\tau, c');
title('Температури')
%axis([0,d0_max,T_min,T_max]);
grid on;
%-----
subplot(2,1,2)
plot(tt,q_fr(Tf,y(:,11),eps_f,eps_sf),...
    tt,q_r(y(:,11),Tw,eps_sw,eps_w),...
    tt,lam*2/dx*(y(:,10)-Tw),...
    tt,q_r(y(:,11),Tw,eps_sw,eps_w)+lam*2/dx*(y(:,10)-Tw),...
    tt, 0*y(:,11)+qcr);

```

```

legend('q_{ f на екран}','q_{ r на об"єкт}','q_{ \lambda. на об"єкт}','q_{ * на об"єкт}','q_{
cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомий тепловий потік')
grid on;

```

```

function Go_eq_screen_2op_h
% solution of eq_screen_2op_h - прогрів 2-х шарового екрану
% с оптично тонкими теплопровідними прошарками ((кара1*h1+кара2*h2)<<1)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1,y2,...,y4,y5 - температури 1-го,2-го,...,5-го шарів першого прошарку, К
% y6,y7,...,y9,y10 - температури 6-го,7-го,...,10-го шарів другого прошарку, К
% y11-T, температура першого екрану, К
% y12-T, температура другого екрану, К
%----- global variables -----
%-----
global eps_sf1 eps_sw1 eps_sf2 eps_sw2 eps_w eps_f;
eps_f=0.8; % ступінь чорноти полум.
eps_sf1=0.2; % ступінь чорноти зовнішньої поверхні 1-го екрану
eps_sw1=0.2; % ступінь чорноти внутрішньої поверхні 1-го екрану
eps_sf2=0.2; % ступінь чорноти зовнішньої поверхні 2-го екрану
eps_sw2=0.2; % ступінь чорноти внутрішньої поверхні 2-го екрану
eps_w=0.9; % ступінь чорноти захищеної поверхні
%-----
global dens1 cps1 hs1 dens2 cps2 hs2;
dens1=2e3; % густина матеріалу 1-го екрану, кг/м3
cps1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го екрану, Дж/(кг К)
hssum=3e-3;% сумарн.товщина екранів, м
hs1=1.98e-3; % hs1-товщина 1-го екрану, m
dens2=2e3; % густина матеріалу 2-го екрану, кг/м3
cps2=1.0e3; % теплоємність матеріалу 2-го екрану, Дж/(кг К)
hs2=hssum-hs1; % hs2=1.5e-3; % hs2-товщина 2-го екрану, m
%-----
global dx1 dx2;
hsum=2e-2;% сумарн.товщина прошарків, м
h1=0.82e-2; % h1-товщина 1-го прошарку, m
n1=5; %n1- кількість шарів розбит.1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина ш. розбит. 1-го прошарку, м
h2=hsum-h1; %h2=1e-2; % h2-товщина 2-го прошарку, m
n2=5; %n2- кількість шарів розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина ш. розбит. 2-го прошарку, м
global den1 cp1 lam1 a1 den2 cp2 lam2 a2;
den1=1e2; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=2.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг К)
lam1=0.2; % lam1- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 1-го прошарку, Вт/(м К)
a1=lam1/(den1*cp1); % a1 -коефіцієнт температуропровідності матеріалу 1-го прошарку, м2/с
den2=1e2; % густина матеріалу 2-го прошарку, кг/м3
cp2=2.0e3; % теплоємність матеріалу 2-го прошарку, Дж/(кг К)
lam2=0.2; % lam2- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 2-го прошарку, Вт/(м К)
a2=lam2/(den2*cp2); % a2 -коефіцієнт температуропровідності матеріалу 2-го прошарку, м2/с

```

```

global kap1 kap2;
kap1=20; % kap1 - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.1-го прошарку,1/м
kap2=20; % kap2 - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.2-го прошарку,1/м
%-----
qcr=1200; % qcr- критичний рівень питомого теплового потоку на поверхню захисту, Вт/м2
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;
Tw=40+273; % температура тіла, К
Tf=1000+273; % температура полум., К
%-----
y1=Tw; y2=Tw; y3=Tw; y4=Tw; y5=Tw; y6=Tw; y7=Tw; y8=Tw; y9=Tw; y10=Tw; y11=Tw;
y12=Tw;
ttf=200; % ttf - time розгл-ду, s
% Numerical solution of eq_screen-----
options=odeset('RelTol',1.0e-5,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[tt,y]=ode15s(@eq_screen_2op_h,[0 ttf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12],options);
%----- graph plotting -----
figure;
subplot(2,1,1)
plot(tt,y(:,11)-273,'k-',tt,y(:,12)-273,'k--',tt,0*y(:,6)+Tw-273,'k-');
legend('t_{ s1}','t_{ s2}','t_{ *}');
ylabel('t(\tau), ^{o}C');
xlabel('\tau, c');
title('Температури 2-ох шарового відбиваючого екрану')
grid on;
%-----
subplot(2,1,2)
plot(tt,q_fr(Tf,y(:,11),eps_f,eps_sf1),'k-',...
tt,q_r(y(:,11),y(:,12),eps_sw1,eps_sf2)+2*lam1/dx1*(y(:,5)-y(:,12)),'k-',...
tt,q_r(y(:,12),Tw,eps_sw2,eps_w),'k:',...
tt,lam2*2/dx2*(y(:,10)-Tw),'k--',...
tt,q_r(y(:,12),Tw,eps_sw2,eps_w)+lam2*2/dx2*(y(:,10)-Tw),'k-.',...
tt, 0*y(:,11)+qcr,'k-');
legend('q_{ f на екран 1}','q_{ * на екран 2}','q_{ r на об"єкт}',...
'q_{ \lambda на об"єкт}','q_{ * на об"єкт}','q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомі теплові потоки у 2-ох шарового екрану')
grid on;
%-----
figure;
plot(tt,q_r(y(:,12),Tw,eps_sw2,eps_w),'k:',...
tt,lam2*2/dx2*(y(:,10)-Tw),'k--',...
tt,q_r(y(:,12),Tw,eps_sw2,eps_w)+lam2*2/dx2*(y(:,10)-Tw),'k-.',...
tt, 0*y(:,11)+qcr,'k-');
legend('q_{ r на об"єкт}',...
'q_{ \lambda на об"єкт}','q_{ * на об"єкт}','q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомі теплові потоки на поверхню захисту')
grid on;

```

```

function Go_eq_screen_m_2o_a_o
% solution of eq_screen_m_2o_a_o - прогрів 3-х шарового екрану
% метал-2оптич.тонк.ш.-повітр.ш.-оптич.тонк.ш.
% с оптично тонкими теплопровідними прошарками ((кара1*h1+кара2*h2+кара3*h3)<<1)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% y1,y2,...,y4,y5 - температури 1-го,2-го,...,5-го шарів из першого прошарку, К
% y6,y7,...,y9,y10 - температури 6-го,7-го,...,10-го шарів из другого прошарку, К
% y11,y12,...,y14,y15 - температури 11-го,12-го,...,15-го шарів из третьей прошарку, К
% y16-T, температура метал. екрану, К
%----- global variables -----
global eps_sf eps_sw eps_w eps_f;
eps_f=0.8; % ступінь чорноти полум.
eps_sf=0.2; % ступінь чорноти зовнішньої поверхні метал. екрану
eps_sw=0.2; % ступінь чорноти внутрішньої поверхні метал. екрану
eps_w=0.9; % ступінь чорноти захищеної поверхні
global dens cps hs;
dens=2e3; % густина матеріалу метал. екрану, кг/м3
cps=1.0e3; % теплоємність матеріалу метал. екрану, Дж/(кг К)
hs=3e-3; % hs-товщина метал. екрану, m
global dx1 dx2 dx3 ha;
h1=0.5e-2; % h1-товщина 1-го прошарку, m
n1=5; %n1- кількість шарів розбит.1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина ш. розбит. 1-го прошарку, m
h2=1e-2; % h2-товщина 2-го прошарку, m
n2=5; %n2- кількість шарів розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина ш. розбит. 2-го прошарку, m
h3=0.5e-2; % h3-товщина 3-го прошарку, m
n3=5; %n3- кількість шарів розбит. 3-го прошарку
dx3=h3/n3; %ширина ш. розбит. 3-го прошарку, m
ha=3e-2; % ha-ширина повітр-го прошарку, m
global den1 cp1 lam1 a1 den2 cp2 lam2 a2 den3 cp3 lam3 a3;
den1=2e3; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=2.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг К)
lam1=0.2; % lam1- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 1-го прошарку, Вт/(м К)
a1=lam1/(den1*cp1); % a1 -коефіцієнт температуропровідності матеріалу 1-го прошарку, м2/с
den2=1e2; % густина матеріалу 2-го прошарку, кг/м3
cp2=2.0e3; % теплоємність матеріалу 2-го прошарку, Дж/(кг К)
lam2=0.2; % lam2- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 2-го прошарку, Вт/(м К)
a2=lam2/(den2*cp2); % a2 -коефіцієнт температуропровідності матеріалу 2-го прошарку, м2/с
den3=1e2; % густина матеріалу 3-го прошарку, кг/м3
cp3=2.0e3; % теплоємність матеріалу 3-го прошарку, Дж/(кг К)
lam3=0.2; % lam3- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 3-го прошарку, Вт/(м К)
a3=lam3/(den3*cp3); % a3 -коефіцієнт температуропровідності матеріалу 3-го прошарку, м2/с
global кара1 кара2 кара3;
кара1=20; % кара1 - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.1-го прошарку,1/м
кара2=20; % кара2 - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.2-го прошарку,1/м
кара3=20; % кара3 - коефіцієнт поглинан.-зворотн. довжина поглинан.3-го прошарку,1/м
%-----
qcr=1200; % qcr- критичний рівень питомого теплового потоку на поверхню захисту, Вт/м2
%-----початкові дані-----
global Tf Tw;

```



```

Tw=40+273; % температура тіла, K
Tf=1000+273; % температура полум., K
%-----
y1=Tw; y2=Tw; y3=Tw; y4=Tw; y5=Tw; y6=Tw; y7=Tw; y8=Tw;
y9=Tw; y10=Tw; y11=Tw; y12=Tw; y13=Tw; y14=Tw; y15=Tw; y16=Tw;
ttf=200; % ttf - time розгл-ду, s
% Numerical solution of eq_screen-----
options=odeset('RelTol',1.0e-5,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[tt,y]=ode15s(@eq_screen_m_2o_a_o ,[0 ttf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13 y14
y15 y16],options);
%----- graph plotting -----
figure;
subplot(2,1,1)
plot(tt,y(:,16)-273,'k-',tt,0.5*(y(:,5)+y(:,6))-273,'k--',...
tt,y(:,10)-273,'k-',tt,y(:,11)-273,'k:',tt,0*y(:,15)+Tw-273,'k-');
legend('t_{ s}','t_{ 1-2}','t_{ 2-a}','t_{ a-3}','t_{ *}');
ylabel('t(\tau), ^{o}C');
xlabel('\tau, c');
title('Температури')
grid on;
%-----
subplot(2,1,2)
plot(tt,q_fr(Tf,y(:,16),eps_f,eps_sf),'k-',...
tt,q_r(y(:,16),Tw,eps_sw,eps_w),'k:',...
tt,lam3*2/dx3*(y(:,15)-Tw),'k--',...
tt,q_r(y(:,16),Tw,eps_sw,eps_w)+lam3*2/dx3*(y(:,15)-Tw),'k-',...
tt, 0*y(:,15)+qcr,'k-');
legend('q_{ f на костюм}','q_{ r на об"єкт}','q_{ \lambda. на об"єкт}',...
'q_{ * на об"єкт}','q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомі теплові потоки')
grid on;
%-----
figure;
plot(tt,q_r(y(:,16),Tw,eps_sw,eps_w),'k:',...
tt,lam3*2/dx3*(y(:,15)-Tw),'k--',...
tt,q_r(y(:,16),Tw,eps_sw,eps_w)+lam3*2/dx3*(y(:,15)-Tw),'k-',...
tt, 0*y(:,15)+qcr,'k-');
legend('q_{ r на об"єкт}','q_{ \lambda на об"єкт}',...
'q_{ * на об"єкт}','q_{ cr}');
ylabel('q(\tau), Вт/м^{-2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомі теплові потоки на поверхню захисту')
grid on;

.....

function lam=lam_n(T,bet)
% сумарний коефіцієнт теплопереноса оптично толстого матеріалу, Вт/(м K)
% q=lam_n*dT/dx, Вт/м2
% T - температура матеріалу, K
% bet - коефіцієнт ослаблен. лучистого потоку, 1/м

```

```

%-----
global lam1; % lam1- коефіцієнт теплопровідності матеріалу 1-го прошарку, Вт/(м К)
%-----
% lam0 - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м К)
%-----
lam0=lam1;
%-----
sigma=5.67e-8;
lam=lam0+16/3/bet*sigma*T.^3;
.....

function qc=q_c(T1,T2,x)
% питомий конвекційний тепловий потік
% у плоскому зазорі, Вт/м2
%T1 - температура гор-чої поверхні, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%x - товщина зазора між поверхн-ми, м
%-----
% lam_a=(2.4+0.0057*(T1+T2)/2)*1.0e-2; % коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% nu_a=2.0e-5; % коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
Pr_a=0.7; % критерій Прандтл. повітр.
gg=9.8; % прискорен. вільного падін., м/с2
%-----
% GrPr=gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2*nu_a^2)*Pr_a; % GrPr -Грасгоф на Прандтл.
%-----
% qc=0.18*GrPr.^0.25*lam_a.*(T1-T2)/x;
%-----
qc=0.18*(gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2.*nu_a((T1+T2)/2-273).^2)*Pr_a).^0.25.*lam_a((T1+T2)/2-273).*(T1-T2)/x;

%-----
function lam=lam_a(t)
% коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% t - температура повітр. по Цельсию
lam=(2.4+0.0057*t)*1.0e-2;
%-----
function nu=nu_a(t)
% коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
% t - температура повітр. по Цельсию
nu=(1.33+0.00044*t)*1.0e-5;
.....

function qfr=q_fr(T1,T2,ep1,ep2)
% radiation heat density від гар. среди на поверхню, W/m2
%T1 - температура гор-ч. середовища, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-ч. середовища
%ep2 - ступінь чорноти холодної поверхні
%-----
ep12=ep1*ep2;
qfr=ep12*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....

function qr=q_r(T1,T2,ep1,ep2)

```

```

% radiation heat density в зазоре, W/m2
%T1 - температура гор-чої поверхні, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-чої поверхні
%ep1 - ступінь чорноти холодної поверхні
%ep(ep1,ep)=1/(1/ep1+1/ep2-1);
%-----
qr=ep(ep1,ep2)*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....

function q=q_tot(T1,T2,ep1,ep2,x)
% total heat density в зазоре, W/m2
%T1 - температура гор-чої поверхні, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-чої поверхні
%ep1 - ступінь чорноти холодної поверхні
%x - товщина зазора між поверхн-ми, м
%-----
q=q_r(T1,T2,ep1,ep2)+q_c(T1,T2,x);
%-----

function qr=q_r(T1,T2,ep1,ep2)
% radiation heat density в зазоре, W/m2
%T1 - температура гор-чої поверхні, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-чої поверхні
%ep1 - ступінь чорноти холодної поверхні
%-----
ep12=1/(1/ep1+1/ep2-1);
qr=ep12*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
%-----

function qc=q_c(T1,T2,x)
% питомий конвекційний тепловий потік
% у плоскому зазорі, Вт/м2
%T1 - температура гор-чої поверхні, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%x - товщина зазора між поверхн-ми, м
%-----
% lam_a=(2.4+0.0057*(T1+T2)/2)*1.0e-2; % коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% nu_a=2.0e-5; % коеф. кінематичної в'язкості повітр., м2/с
Pr_a=0.7; % критерій Прандтл. повітр.
gg=9.8; % прискорен. вільного падін., м/с2
%-----
% GrPr=gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2*nu_a^2)*Pr_a; % GrPr -Грасгоф на Прандтл.
%-----
% qc=0.18*GrPr.^0.25*lam_a.*(T1-T2)/x;
%-----
qc=0.18*(gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2*nu_a*((T1+T2)/2-273).^2)*Pr_a).^0.25.*lam_a((T1+T2)/2-273).*(T1-T2)/x;

%-----
function lam=lam_a(t)

```

```
% коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% t - температура повітр. по Цельсию
lam=(2.4+0.0057*t)*1.0e-2;
%-----
function nu=nu_a(t)
% коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
% t - температура повітр. по Цельсию
nu=(1.33+0.00044*t)*1.0e-5;
```

.....

Додаток Г'

Комп'ютерна програма розрахунку температур тіл і теплових потоків при нагріванні від пожежі у приміщенні і захисті відбиваючими екранами з повітряними прошарками

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) Спочатку у текст файла «GoCallback0.m» вводяться чисельні значення всіх параметрів захисного тіла і покриття.

3) Потім активується файл «Start15.m» і за допомогою інтерфейса, що з'явиться, вводяться всі параметри, що задають розвиток пожежі у приміщенні, і час розгляду. Після натиску кнопки «Поїхали» програма почне обраховуватися і далі видасть результат (графіки залежностей параметрів від часу пожежі).

```
.....
function cg=cpm(y)
% average total gas heat, j/(kgm*K)
global cp4; global cp5; global cp6; global cp7; global cp8;
global cp9; global cp10; global cp_t;
cg=(y(4)*cp4+y(5)*cp5+y(6)*cp6+y(7)*cp7+y(8)*cp8++y(9)*cp9++y(10)*cp10+y(11)*cp_t)./y(1)
;
.....

function Data0
%GUI
%----- global variables -----
global hFig0 hEd01 hBut00 hFig1 hFig2
%----- figure and axes -----
% First axes for graphing
hFig0=figure('Position',[80 80 600 390],
'Name','Моделюван. динаміки НФП - основне вікно', 'HandleVisibility','Callback',
'Menubar','none', 'CloseRequestFcn','MyClose', 'Tag','tag_fig0');
hAxes01=axes('Parent',hFig0,'Color',[1 1 1], 'Units','pixels','Position',[10 20 360
288],'FontSize',10,'Visible','off');
%-----paint picture-----
TX=imread('Paint_fire.jpg','jpg'); image(TX); set(hAxes01,'TickDir','out')
col=get(hFig0,'Color'); set(hAxes01,'XColor',col); set(hAxes01,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
xfm1=385; yfm1=115;
```

```

hFm01=uicontrol(hFig0,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
200 190]); hTxtFm01=uicontrol(hFig0,'Style','text', 'BackgroundColor',[0.7 0.7
0.7], 'Position',[xfm1+10 yfm1+160 180 20], 'FontSize',12, 'String','Ввод початкових даних');
hEd01=uicontrol(hFig0,'Style','edit', 'BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+75 yfm1+10 60
20], 'HorizontalAlignment','left'); hTxtEd01=uicontrol(hFig0,'Style','text', 'BackgroundColor',[0.7
0.7 0.7], 'Position',[xfm1+45 yfm1+30 120 20], 'String','Часовий інтервал, с');
%----- pushbuttons -----
hBut01=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[xfm1+10 yfm1+110 180 40],
'String','Приміщен. і газообмін', 'Callback','GoData1');
hBut02=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[xfm1+10 yfm1+60 180 40],
'String','Осередо пожежі і газове гасін.', 'Callback','GoData2');
%----- pushbutton -----
hBut00=uicontrol(hFig0,'Style','pushbutton','Position',[440 45 100 40], 'String','ПОЇХАЛИ',
'Callback','GoCallback00');
%----- text field -----
hTxt01=uicontrol(hFig0,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[100 330 400
50], 'FontName','Arial Cyr', 'FontSize',16, 'String','Визначен. Небезпечних факторів пожежі в
інтегральній моделі');

```

```

.....
function Data1
%GUI - вікно вводу даних газообміну
%----- global variables -----
global hEd01 hFig1
global hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
%----- figure and axes -----
hFig1=figure('Position',[100 100 670 400], 'Name','Моделюван. динаміки НФП – заданн.
параметрів газообміну ', 'Menubar','none', 'Tag','tag_fig1');
hAxes11=axes('Parent',hFig1,'Color',[1 1 1], 'Units','pixels', 'Position',[5 55 440 325], 'FontSize',10,
'Visible','off');
%----- paint picture -----
TX=imread('Fire_vent.jpg','jpg');
image(TX); set(hAxes11,'TickDir','out')
col=get(hFig1,'Color'); set(hAxes11,'XColor',col); set(hAxes11,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
xfm1=455; yfm1=315;
hFm11=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
210 65]);
hTxtFm11=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+15
yfm1+45 180 15], 'String','Температура повітр., C');
hEd101=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+30 yfm1+5 60
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd01=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+30
yfm1+25 60 15], 'String','зовнішнього');
hEd102=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+125 yfm1+5 60
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd02=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+125
yfm1+25 60 15], 'String','початкова ');
%----- 2-nd frame -----
xfm2=455; yfm2=240;
hFm12=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm2 yfm2
210 65]);

```

```

hTxtFm12=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+15
yfm2+45 180 15],'String','Витрата примусової вентиля, м3/с');
hEd103=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+30 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd03=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+30
yfm2+25 60 15],'String','припл., W+');
hEd104=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+125 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd04=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+125
yfm2+25 60 15],'String','відт., W-');
%----- 3-th frame -----
xfm3=455; yfm3=165;
hFm13=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm3 yfm3
210 65]);
hTxtFm13=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm3+15
yfm3+45 180 15],'String','Розміри приміщен. ');
hEd105=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm3+15 yfm3+5 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd05=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm3+15
yfm3+25 50 15],'String','A, м');
hEd106=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm3+80 yfm3+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd06=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm3+80 yfm3+25 50 15],'String','B, м');
hEd107=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm3+145 yfm3+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd07=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm3+145 yfm3+25 50 15],'String','H, м');
%----- 4-th frame -----
xfm4=455; yfm4=50;
hFm14=uicontrol(hFig1,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75],...
'Position',[xfm4 yfm4 210 105]);
hTxtFm14=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+85 180 15],'String','Параметри отворів');
hEd108=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd08=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+65 50 15],'String','c1, м');
hEd109=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+80 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd09=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+80 yfm4+65 50 15],'String','h1, м');
hEd110=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+145 yfm4+45 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd10=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+145 yfm4+65 50 15],'String','b1, м');
hEd111=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd11=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm4+15 yfm4+25 50 15],'String','c2, м');
hEd112=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm4+80 yfm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');

```

```

hTxtEd12=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+80 yfm4+25 50 15],'String','h2, м');
hEd113=uicontrol(hFig1,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
    'Position',[xfm4+145 yfm4+5 50 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd13=uicontrol(hFig1,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
    'Position',[xfm4+145 yfm4+25 50 15],'String','b2, м');
%----- one pushbutton -----
hBut11=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton', 'Position',[120 15 150 30],...
    'String','Повернен. до основного вікна','Callback','Goback0');

.....
function Data2
% інтегр. модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% газообмін крізь два отвори, примусова ventilation
%----- global variables -----
global hFig2 hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupmenu2 hFm231 hRbut21 hRbut22
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%----- figure and axes -----
hFig2=figure('Position',[60 60 665 390], 'Name','Моделюван. динаміки НФП - параметри, що
задають осередок пожежі і гасін.', 'Menubar','none', 'Tag','tag_fig2');
hAxes21=axes('Parent',hFig2,'Color',[1 1 1],'Units','pixels', 'Position',[95 290 211 92],'FontSize',10,
'Visible','off');
%-----paint picture-----
TX=imread('Fire_formula.jpg','jpg'); image(TX); set(hAxes21,'TickDir','out')
col=get(hFig2,'Color'); set(hAxes21,'XColor',col); set(hAxes21,'YColor',col);
%----- 1-st frame -----
xfm1=395; yfm1=10;
hFm21=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1 yfm1
260 380]);
%----- one pushbutton -----
hBut21=uicontrol(hFig2,'Style','pushbutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+30
yfm1+345 205 30],'FontSize',14,'String', 'Параметри пального', 'Callback','FuelProperty');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+335 240 4]);
hEd201=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+305 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd01=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+300 180 30], 'String','Питома теплота згор. - Qн, кДж/кг');
hEd202=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+265 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd02=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+260 180 30], 'String','Питома швидкість вигор. - um, кг/(м2 с)');
hEd203=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+230 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd03=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+230 180 20], 'String','Коефіцієнт повноти згор. - kср');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame', 'BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+220 240 4]);
hEd204=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+190 60
20],'HorizontalAlignment','left');

```



```

hTxtEd04=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+185 180 30],'String','Димоутворююча здатність. - D, Нп м2/кг');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+175 240 4]);
hEd205=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+135 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd05=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+125 180 40],'String','Маса кисню, дл. повного згор. 1 кг пального - L_O2, кг/кг');
hTxtEd20_6_7_8_9=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],
'Position',[xfm1+10 yfm1+85 240 30], 'String','Маса газу, що виділ. при повному згор. 1 кг
пального, кг/кг');
hEd206=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+10 yfm1+45 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd06=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+65 50 15],'String','L_CO2');
hEd207=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+73 yfm1+45 50
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd07=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+73
yfm1+65 50 15],'String','L_CO');
hEd208=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+199 yfm1+45 50
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd08=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+199
yfm1+65 50 15],'String','L_H2O');
hEd209=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+136 yfm1+45 50
20], 'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd09=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+136
yfm1+65 50 15],'String','L_HCl');
hFm_lin=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm1+10
yfm1+30 240 4]);
hEd210=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm1+190 yfm1+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd10=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm1+10
yfm1+5 180 20],'String','Повна маса пального, кг');
%----- 2-nd frame -----
xfm2=15; yfm2=195;
hFm22=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[xfm2 yfm2
365 85]);
hTxtFm21=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+10
yfm2+30 345 50], 'FontSize',14, 'String','Параметри, що задають площу пожежі');
hEd211=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+55 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd11=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+5 yfm2+5
50 20],'String','F0, м2');
hEd212=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[xfm2+175 yfm2+5 60
20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd12=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[xfm2+125
yfm2+5 50 20],'String','F1, м2/c');
hEd213=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1],...
'Position',[xfm2+295 yfm2+5 60 20],'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd13=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7],...
'Position',[xfm2+245 yfm2+5 50 20],'String','F2, м2/c2');
%----- 3-rd frame -----

```

```

x_fm3=15; y_fm3=50;
hFm23=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Position',[x_fm3 y_fm3
365 140]);
hTxtFm23=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+10
y_fm3+110 345 25],'FontSize',14, 'String','Параметри системи газового гасін. ');
hPopupMenu2=uicontrol(hFig2,'Style','popupmenu','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+10
y_fm3+60 105 20],'String',{'CO2','N2','Ar','газу нема'},
'HorizontalAlignment','left','Callback','GoCallbackPopmen2', 'Value',4);
hTxtPopupMenu2=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+10
y_fm3+80 105 25],'String','Оберіть газ дл. гасін. ');
x_fm31=x_fm3+10; y_fm31=y_fm3+5;
hFm231=uicontrol(hFig2,'Style','frame','BackgroundColor',[0.75 0.75 0.75], 'Visible','off',
'Position',[x_fm31-1 y_fm31-1 105+2 40+2]);
hRbut21=uicontrol(hFig2,'Style','radiobutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'String','Включ.
ручне','Position',[x_fm31 y_fm31+20 105 20],
'HorizontalAlignment','left','Visible','off','Value',1,'Callback','GoCallbackRbut21');
hRbut22=uicontrol(hFig2,'Style','radiobutton','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'String','Увімкнути.
автомат.','Position',[x_fm31 y_fm31 105 20], 'HorizontalAlignment','left',
'Visible','off','Callback','GoCallbackRbut22');
%-----
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    stFm_Rb21_22='off';
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
elseif get(hRbut21,'Value')==1
    stFm_Rb21_22='on';
    st214='on';st215_16='off';st217='on';
else
    stFm_Rb21_22='on';
    st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hFm231,'Visible',stFm_Rb21_22); set(hRbut21,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hRbut22,'Visible',stFm_Rb21_22);
hEd214=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+80 60
20], 'Visible',st214,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd14=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+75 165 30],'Visible',st214,'String','Масова витрата гас. газу, кг/с');
hEd215=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+45 60
20],'Visible',st215_16,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd15=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+40 165 30], 'Visible',st215_16,'String','Інерційність системи гасін., с');
hEd216=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+10 60
20],'Visible',st215_16,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd16=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+5 165 30],'Visible',st215_16,'String','Порігова температура системи гасін., C');
hEd217=uicontrol(hFig2,'Style','edit','BackgroundColor',[1 1 1], 'Position',[x_fm3+290 y_fm3+25 60
20], 'Visible',st217,'HorizontalAlignment','left');
hTxtEd17=uicontrol(hFig2,'Style','text','BackgroundColor',[0.7 0.7 0.7], 'Position',[x_fm3+125
y_fm3+20 165 30],'Visible',st217,'String','Момент увімкнен. системи гасін., с');
%----- two pushbutton -----
hBut22 =uicontrol(hFig2,'Style','pushbutton', 'Position',[120 10 150 30], 'String','Повернен. до
основного вікна', 'Callback','Goback0');

```

```

function dy=eq_in_15_1or2(t,y) %пожежа у приміщенні
% інтегр.модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% і газообміну крізь два проїому, вимушеної ventilation and
% системи газового гасін.+захисний 1 or 2 екран with air layers
dy=zeros(15,1);
% y1-denm y2-pm y3-miu y4-denO2, y5-denN2
% y6-denCO2 y7-denCO y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush y12 - m_burn
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
%-----
% y15- температура uni екрану, K
% y16- температура 1-st from 2 екрану, K
% y17- температура 2-nd from 2 екрану, K
%-----
% параметри екранної задачі
global eps_s eps_w eps_f;
global dens cps;
global xx xx21 xx22;
global Tw;
global hs hs21 hs22; % hs-товщина екрану, м
global tinn; % tin-момент входу в приміщен., с
%-----
global R0 T0 T_beg Pa alf;
%-----
global den_a; % густина зовнішнього повітр., kg/m3
%-----
global V k;
k=1.4; %gas adeabat koefficient
%-----
global cp4; % cp O2, j/(kg*K) (912.7+0.2544*t)
cp4=9.2e2;
global cp5; % cp N2, j/(kg*K) (1025.8+0.1676*t)
cp5=1.05e3;
global cp6; % cp CO2, j/(kg*K) (872.5+0.4810*t)
cp6=1.03e3;
global cp7; % cp CO, j/(kg*K) (1030.4+0.1915*t)
cp7=1.02e3;
global cp8; % cp H2O, j/(kg*K) (1840.1+0.5856*t)
cp8=2.01e3;
global cp9; % cp HCl, j/(kg*K) (1840.1+0.5856*t)
cp9=7.8e2;
global cp10; % cp Ar, j/(kg*K) (1840.1+0.5856*t)
cp10=5.2e2;
global cpa;% average total gas heat, j/(kgm*K)(995.2+0.1869*t)
global x4a x5a x6a x7a x8a x9a x10a; % air mass part O2, N2, CO2, CO, H2O, HCl, Ar
cpa=x4a*cp4+x5a*cp5+x6a*cp6+x7a*cp7+x8a*cp8+x9a*cp9+x10a*cp10; %cpa=1.01e3;
%-----
global Wa Wg; %forses ventilation, м3/c
global cp_t; % cp tush, j/(kg*K)
%-----
global gz Fw; %
gz=9.81;
.....

```

```

global LO2 LCO2 LCO LH20 LHCl tet Qn D;
LN2=0.0; LAr=0;
kc=1.0e-8;%m/c
ig=5.1e5;%J/kg
global tau_aut; % automatic time, c
%-----
Zer=zeros(17,1);
%-----
f=zeros(17,1);
%-----
f(1)=1/V*((Ga(y)+Wa*den_a)+G_tus(y,t)+psi(y,t)-(Gg(y)+Wg*y(1)));
f(2)=(k-1)/V*((Qn*tet-(1-tet)*ig)*psi(y,t)+cpa*T0*(Ga(y)+Wa*den_a)+cp_t*T_beg*G_tus(y,t)...
    -cpm(y).*Tm(y).*(Gg(y)+Wg*y(1))-Qw(y)-Q_rad(y));
f(3)=1/V*(D*psi(y,t)-y(3).*(Gg(y)./y(1)+Wg+kc*Fw));
f(4)=1/V*(x4a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(4)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))-tet*psi(y,t)*LO2);
f(5)=1/V*(x5a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(5)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LN2);
f(6)=1/V*(x6a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(6)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LCO2);
f(7)=1/V*(x7a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(7)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LCO);
f(8)=1/V*(x8a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(8)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LH20);
f(9)=1/V*(x9a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(9)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LHCl);
f(10)=1/V*(x10a*(Ga(y)+Wa*den_a)-y(10)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1))+tet*psi(y,t)*LAr);
f(11)=1/V*(G_tus(y,t)-y(11)./y(1).*(Gg(y)+Wg*y(1)));
f(12)=-psi(y,t);
f(13)=-(y(13)-Tm(y))/tau_aut;
f(14)=key_aut(y);
%-----
f(15)=1/(dens*cps*hs)*(q_fr(Tm(y),y(15),eps_f,eps_s)+alf*(Tm(y)-y(15))...
    -q_r(y(15),Tw,eps_s,eps_w)-q_c(y(15),Tw,xx)).*(0.5+1/pi*atan(t-tinn));
%-----
f(16)=1/(dens*cps*hs21)*(q_fr(Tm(y),y(16),eps_f,eps_s)+alf*(Tm(y)-y(16))...
    -q_r(y(16),y(17),eps_s,eps_s)-q_c(y(16),y(17),xx21)).*(0.5+1/pi*atan(t-tinn));
f(17)=1/(dens*cps*hs22)*(q_r(y(16),y(17),eps_s,eps_s)+q_c(y(16),y(17),xx21)...
    -q_r(y(17),Tw,eps_s,eps_w)-q_c(y(17),Tw,xx22));
%-----
dy=f;

```

```

function Fff=Ff(t)
% Ff(t)-fire area, m2
% Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2 < Ffl
% Ffl - площа пола, м2
global Ffl Ff0 dFf1 dFf2;
Fff0=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2;
Fff=min(Fff0,Ffl);

```

```

function Gtt=G_tus(y,t)
%витрата газу з системи газового гасін., кг/с
global t_begin_t; %gasiniya begin time, c
global G_t; % gasiniya витрата, кг/с
global T_cr; %межа спрацьовуван. по температурі, К
y14_cr=2*T_cr;
Gtt=G_t*(0.5+1/pi*atan(500*(y(14)-y14_cr/2))+0.5+1/pi*atan(100*(t-t_begin_t)));

```

```

function Gaa2=Ga(y)
%приток повітр. крізь два отвори
global hh den_a gz;
Gaa2=Ga1(y,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Ga1(y,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Gaa1=Ga1(y,hd,hu,b)
% витрата повітр., kg/c, b-ширина отвору
%hd,hu-висоти нижнього та верхнього країв отворів, м
global den_a gz;
if hn(y)<hd Gaa1=0;
elseif hn(y)>hu
    Gaa1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y(1)))*b*((hn(y)-hd)^1.5-(hn(y)-hu)^1.5);
else Gaa1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y(1)))*b*(hn(y)-hd)^1.5;
end;
.....

function Gag=Ga_g(y)
%graf help agree function приток повітр. крізь два отвори, кг/с
Gag(:,1)=Ga_gg(y(:,1),y(:,2));
.....

function Gagg2=Ga_gg(y1,y2)
%graf help agree function приток повітр. крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Gagg2=Ga_gg1(y1,y2,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Ga_gg1(y1,y2,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Gagg1=Ga_gg1(y1,y2,hd,hu,b)
%graf help agree function витрата повітр., kg/c
%hd,hu-висоти нижнього та верхнього країв отворів, м, b-ширина отвору, м
global den_a gz;
if hn_gg(y1,y2)<hd Gagg1=0;
elseif hn_gg(y1,y2)>hu
    Gagg1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y1))*b.*((hn_gg(y1,y2)-hd).^1.5-(hn_gg(y1,y2)-hu).^1.5);
else Gagg1=2/3*sqrt(2*gz*den_a*(den_a-y1))*b.*(hn_gg(y1,y2)-hd).^1.5;
end;
.....

function Ggg2=Gg(y)
%відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Ggg2=Gg1(y,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Gg1(y,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
function Ggg1=Gg1(y,hd,hu,b)
% відтік газів крізь отвір (витрата), kg/c
global den_a gz;
if hn(y)<hd
    Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y(1).*(den_a-y(1)))*b.*((hu-hn(y)).^1.5-(hd-hn(y)).^1.5);
elseif hn(y)>hu Ggg1=0;
else Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y(1).*(den_a-y(1)))*b.*(hu-hn(y)).^1.5;
end;
.....

function Ggg=Gg_g(y)
%graf help agree function відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с

```

```
Ggg(:,1)=Gg_gg(y(:,1),y(:,2));
```

```
function Ggg2=Gg_gg(y1,y2)
%graf help agree function відтік (витрата) газів крізь два отвори, кг/с
global hh den_a gz;
Ggg2=Gg_gg1(y1,y2,hh(1,1),hh(1,2),hh(1,3))+Gg_gg1(y1,y2,hh(2,1),hh(2,2),hh(2,3));
%-----
```

```
function Ggg1=Gg_gg1(y1,y2,hd,hu,b)
%graf help agree function відтік газів, kg/c
global den_a gz;
if hn_gg(y1,y2)<hd
    Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y1.*(den_a-y1))*b.*...
        ((hu-hn_gg(y1,y2)).^1.5-(hd-hn_gg(y1,y2)).^1.5);
elseif hn_gg(y1,y2)>hu Ggg1=0;
else Ggg1=2/3*sqrt(2*gz*y1.*(den_a-y1))*b.*(hu-hn_gg(y1,y2)).^1.5;
end;
```

```
function Goback0
%GUI
global hFig0
if isempty(findobj('Tag','tag_fig0')) Data0
else figure(hFig0)
end;
```

```
function GoCallback00
% перевірка і попереджен. про неповноту вводу
%----- global variables -----
global hEd01 hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
global hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
global hEd211 hEd212 hEd213 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22
global hFig0 hFig1 hFig2
%----- перевірка присутності вікон вводу -----
if isempty(findobj('Tag','tag_fig1')) Data1;
end;
if isempty(findobj('Tag','tag_fig2')) Data2;
end;
%-----
%global index;%index - індекс вибору газ. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
%-----
k01=isempty(str2num(get(hEd01,'String')));
k101=isempty(str2num(get(hEd101,'String')));
k102=isempty(str2num(get(hEd102,'String')));
k103=isempty(str2num(get(hEd103,'String')));
k104=isempty(str2num(get(hEd104,'String')));
k105=isempty(str2num(get(hEd105,'String')));
k106=isempty(str2num(get(hEd106,'String')));
k107=isempty(str2num(get(hEd107,'String')));
k108=isempty(str2num(get(hEd108,'String')));
```

```

k109=isempty(str2num(get(hEd109,'String')));
k110=isempty(str2num(get(hEd110,'String')));
k111=isempty(str2num(get(hEd111,'String')));
k112=isempty(str2num(get(hEd112,'String')));
k113=isempty(str2num(get(hEd113,'String')));
k201=isempty(str2num(get(hEd201,'String')));
k202=isempty(str2num(get(hEd202,'String')));
k203=isempty(str2num(get(hEd203,'String')));
k204=isempty(str2num(get(hEd204,'String')));
k205=isempty(str2num(get(hEd205,'String')));
k206=isempty(str2num(get(hEd206,'String')));
k207=isempty(str2num(get(hEd207,'String')));
k208=isempty(str2num(get(hEd208,'String')));
k209=isempty(str2num(get(hEd209,'String')));
k210=isempty(str2num(get(hEd210,'String')));
k211=isempty(str2num(get(hEd211,'String')));
k212=isempty(str2num(get(hEd212,'String')));
k213=isempty(str2num(get(hEd213,'String')));
if get(hPopupMenu2,'Value')==4
    k214_215_216_217=0;
elseif get(hRbut21,'Value')==1
k214_215_216_217=isempty(str2num(get(hEd214,'String')))|isempty(str2num(get(hEd217,'String'))
);
else
k214_215_216_217=isempty(str2num(get(hEd214,'String')))|isempty(str2num(get(hEd215,'String'))
)|isempty(str2num(get(hEd216,'String')));
end;
%-----
if k01
    figure(hFig0);
    errordlg('Не введено часовий інтервал.','Поверни до введен.','on');
elseif k101|k102|k103|k104|k105|k106|k107|k108|k109|k110|k111|k112|k113
    figure(hFig1);
    errordlg('Введено не всі дані щодо газообміну.','Поверни до введен.','on');
elseif k201|k202|k203|k204|k205|k206|k207|k208|k209|k210|k211|k212|k213|k214_215_216_217
    figure(hFig2);
    errordlg('Введено не всі дані щодо осередку та гасін.','Поверни до введен.','on');
else GoCallback0;
end;
.....

function GoCallback0
% solution of eq_in_15 -інтегр.модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% і газообміну крізь два проїому, вимушеної ventilation and
% системи газового гасін.+захисний 1 or 2 екран with air layers
%----- global variables -----
global hEd01
%global hTxt02
%-----
global hEd101 hEd102 hEd103 hEd104 hEd105 hEd106
global hEd107 hEd108 hEd109 hEd110 hEd111 hEd112 hEd113
%-----
global hEd201 hEd202 hEd203 hEd204 hEd205 hEd206 hEd207 hEd208 hEd209 hEd210
.....

```

```

global hEd211 hEd212 hEd213
global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
%-----
global hPopupMenu2 hRbut21 hRbut22
%----- vizualization 'Wait' -----
%set(hTxt02,'Visible','on');
%-----
% y1-denm y2-pm y3-miu y4-denO2, y5-denN2
% y6-denCO2 y7-denCO y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush y12 - m_burn
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
%-----
% y15- температура uni екрану, K
% y16- температура 1-st from 2 екрану, K
% y17- температура 2-nd from 2 екрану, K
%-----
% параметри екранної задачі
global eps_s eps_w eps_f;
eps_s=0.2; % ступінь чорноти поверхонь екранів
eps_w=0.9; % ступінь чорноти захищеної поверхні
eps_f=0.8; % ступінь чорноти полум.
global dens cps;
dens=2e3; % густина матеріалу екрану, кг/м3
cps=1.0e3; % теплоємність матеріалу екрану, Дж/(кг K)
global xx xx21 xx22;
xx=5e-2; % distance without 1 screen and body, m
xx21=2.5e-2; % distance without 1-2 screens, m
xx22=2.5e-2; % distance without 2-nd screen and body, m
global Tff Tw;
Tw=40+273; % температура тіла, K
global hs hs21 hs22; % hs-товщина екрану, м
hs=5e-3; % hs-товщина 1 екрану, м
hs21=2.5e-3; % hs-товщина 1-st from 2 екрану, м
hs22=2.5e-3; % hs-товщина 2-nd from 2 екрану, м
global tinn; % tin-момент входу в приміщен., с
tinn=300;
%-----
global Pa den_a T0 T_beg R0 alf;
Pa=1.01e5; %тиск повітр., Па
%T0 - температура зовнішнього повітр., K
%T_beg - початк. температура повітр., K
R0=8314; %universal gas constant, J/(kmol*K)
alf=10; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
global V h Ffl Fw;
global Qn u_m LO2 LCO2 LCO LH20 LHCl tet D;
global Ff0 dFf1 dFf2; %площа пожежі Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2 < Ffl
%Ff0=0.5; dFf1=0.1; dFf2=0.01;
%-----
global index;%index - індекс вибора туш. газа
global cp_t; %ізобарн. теплоємність тушащего газа
global G_t; %tusheniya витрата, кг/с
global t_begin_t; %tusheniya begin time, с
global tau_aut; % automatic time, с
.....

```



```

global T_cr; %порог спрацьовуван. по температурі, К
%-----
%---get string information from edit fields and convert string to number---
tf=str2num(get(hEd01,'String')); % tf - time, s
T0=273+str2num(get(hEd101,'String')); % T0 - температура зовнішнього повітр.
T_beg=273+str2num(get(hEd102,'String')); % tem_begin - початк.температура повітр.
W_in=str2num(get(hEd103,'String')); % W_in - in вимушен. витрата, м3/с
W_out=str2num(get(hEd104,'String')); % W_out - out вимушен. витрата, м3/с
A_=str2num(get(hEd105,'String')); % A_ - довжина приміщен., м
B_=str2num(get(hEd106,'String')); % B_ - ширина приміщен., м
H_=str2num(get(hEd107,'String')); % H_ - висота приміщен., м
c_1=str2num(get(hEd108,'String')); % c_1 -висота ниж. кр.1-го пройому, м
h_1=str2num(get(hEd109,'String')); % h_1 - висота 1-го пройому, м
b_1=str2num(get(hEd110,'String')); % b_1 - ширина 1-го пройому, м
c_2=str2num(get(hEd111,'String')); % c_2 -висота ниж. кр.2-го пройому, м
h_2=str2num(get(hEd112,'String')); % h_2 - висота 2-го пройому, м
b_2=str2num(get(hEd113,'String')); % b_2 - ширина 2-го пройому, м
%-----
Qn=1000*str2num(get(hEd201,'String')); % Qn - питом. теплота згоран., Дж/кг
u_m=str2num(get(hEd202,'String')); % u_m - питом. швидкість вигоран., кг/(с м2)
tet=str2num(get(hEd203,'String')); % tet - коеф. повноти згоран.
D=str2num(get(hEd204,'String')); % D - коеф. димоутворюючей здатності, Непер*м2/с
LO2=str2num(get(hEd205,'String')); % LO2 - мас.02/мас.пального
LCO2=str2num(get(hEd206,'String')); % LCO2 - мас.CO2/мас.пального
LCO=str2num(get(hEd207,'String')); % LCO - мас.CO/мас.пального
LH2O=str2num(get(hEd208,'String')); % LH2O - мас.H2O/мас.пального
LHCl=str2num(get(hEd209,'String')); % LHCl - мас.HCl/мас.пального
m0=str2num(get(hEd210,'String')); % m0 - %begining fuel mass, kg
Ff0=str2num(get(hEd211,'String')); % Ff0 - м2, % Ff(t)- площа пожежі, м2
dFf1=str2num(get(hEd212,'String')); % dFf1 - м2/с % Ff(t)=Ff0+dFf1*t+dFf2*t.^2, м2
dFf2=str2num(get(hEd213,'String')); % dFf2 - м2/с2
%-----
index=get(hPopupMenu2,'Value'); %index - індекс вибраного елемента Popupmenu2
% cellArr=get(hPopupMenu2,'String');%cellArr - масив cell-ов
% gazName=cellArr{index};% строка "gazName" - елемент з індексом 'index' з масива cellArr
%G_t - %tusheniya витрата, кг/с
% tau_aut; % automatic time, c
% t_begin_t; %tusheniya begin time, c
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
global cp6; % cp CO2, j/(kg*K)
global cp5; % cp N2, j/(kg*K)
global cp10; % cp Ar, j/(kg*K)
switch index
case 1
    cp_t=cp6;
    G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
    if get(hRbut22,'Value')==1
        tau_aut=str2num(get(hEd215,'String'));
        T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
        t_begin_t=1e15;
    else
        tau_aut=1e15; T_cr=1e6;
    end
end

```

```

        t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
    end;
case 2
    cp_t=cp5;
    G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
    if get(hRbut22,'Value')==1
        tau_aut=str2num(get(hEd215,'String'));
        T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
        t_begin_t=1e15;
    else
        tau_aut=1e15; T_cr=1e6;
        t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
    end;
case 3
    cp_t= cp10;
    G_t=str2num(get(hEd214,'String'));
    if get(hRbut22,'Value')==1
        tau_aut=str2num(get(hEd215,'String'));
        T_cr=273+str2num(get(hEd216,'String'));
        t_begin_t=1e15;
    else
        tau_aut=1e15; T_cr=1e6;
        t_begin_t=str2num(get(hEd217,'String'));
    end;
case 4
    cp_t= 0; G_t=0;
    tau_aut=1e15; T_cr=1e6;
    t_begin_t=1e15;
end;
%-----
V=A_*B_*H_; %volume, m3
h=H_/2; %половина висоти приміщен.
Ffl=A_*B_; % площа пола, м2
Fw=2*(A_*B_+A_*H_+B_*H_); % площа огорожі, м2
den_a=Pa/T0*29/R0; % density out air, kg/m3
den_begin=Pa/T_beg*29/R0; % початк. густина повітр., kg/m3
global Wa Wg; %forces ventilation, м3/с
Wa=W_in; %вимушена in витрата, м3/с
Wg=W_out; %вимушена out витрата, м3/с
global hh;%параметри проїомів
hh(1,1)=c_1; hh(1,2)=hh(1,1)+h_1; hh(1,3)=b_1;%hh(:,1),hh(:,2)-висоти ниж і верх країв
проїомів
hh(2,1)=c_2; hh(2,2)=hh(2,1)+h_2; hh(2,3)=b_2;%hh(:,3)-ширини проїомів
global x4a x5a x6a x7a x8a x9a x10a x11a; % air mass part O2, N2, CO2, CO, H2O, HCl, Ar
x4a=0.232; x5a=0.755; x6a=0.0; x7a=0.0; x8a=0.0; x9a=0.0; x10a=0.013; x11a=0.0;
%-----
y1=den_begin; y2=Pa; y3=0;
y4=x4a*y1; y5=x5a*y1; y6=x6a*y1; y7=x7a*y1; y8=x8a*y1; y9=x9a*y1; y10=x10a*y1;
y11=x11a*y1;
y12=m0;
y13=T_beg; y14=0;
y15=Tw; y16=Tw; y17=Tw;
%-----

```

```

%----- Numerical solution -----
% solution of fire_eq_12 -----
%[T,Y]=ode15s('eq_in_12',[0 tf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13 y14]);
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[T,Y]=ode15s('eq_in_15_1or2',[0 tf],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10 y11 y12 y13 y14 y15 y16
y17],options);
%----- graph plotting -----
qcr=560; % qcr- критичний рівень питомого теплового потоку на поверхню захисту, Вт/м2
%-----
figure;
plot(T,Tm_g(Y)-273,T,Y(:,15)-273,T,Y(:,16)-273,T,Y(:,17)-273); %
legend('t_{m}','t_{s}',...
't_{s1}','t_{s2}');
ylabel('t, ^{o}C');
xlabel('\tau, c');
title('Температури екранів і газового середовища')
%axis([0,d0_max,T_min,T_max]);
grid on;
%-----
figure;
ep1=eps_f; ep2=eps_s;
ep12=1/(1/ep1+1/ep2-1);
plot(T,0.5*q_fw_tot(Y(:,2)/R0./Y(:,1)*29,Tw,eps_f,eps_w,alf).*tetf(T,tinn,0.2),...
T,(ep12*5.67e-8*((Y(:,2)/R0./Y(:,1)*29).^4-Y(:,15).^4)+alf*((Y(:,2)/R0./Y(:,1)*29)-
Y(:,15))).*tetf(T,tinn,0.2),...
T,(ep12*5.67e-8*((Y(:,2)/R0./Y(:,1)*29).^4-Y(:,16).^4)+alf*((Y(:,2)/R0./Y(:,1)*29)-
Y(:,16))).*tetf(T,tinn,0.2),...
T,q_r(Y(:,15),Tw,eps_s,eps_w)+q_c(Y(:,15),Tw,xx),...
T,q_r(Y(:,17),Tw,eps_s,eps_w)+q_c(Y(:,17),Tw,xx22),...
T, 0*Y(:,15)+qcr);
%T,q_r(Y(:,16),Y(:,17),eps_s,eps_s)+q_c(Y(:,16),Y(:,17),xx21),...
legend('0.5 q_{ *.free}',...
'q_{ на 1 із 1}',...
'q_{ на 1 із 2}',...
'q_{ *.одношар.}',...
'q_{ *.двошар.}',...
'q_{ cr}');
% 'q_{ на 2-й із 2-ох}',...
ylabel('q, Вт/м^{2}');
xlabel('\tau, c');
title('Питомі теплові потоки')
axis([0,tf,-50,7000]);
grid on;
%-----

function tet=tetf(x,x0,dx)
% уширена дельта функц.
tet=0.5+1/pi*atan((x-x0)./dx);
.....

function GoCallbackPopmen2
%відпрацюван. видимості вводу гас. засобів
global hPopurmenu2 hFm231 hRbut21 hRbut22

```

```

global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----
if get(hPopupmenu2,'Value')==4
    stFm_Rb21_22='off'; st214='off';st215_16='off';st217='off';
elseif get(hRbut21,'Value')==1
    stFm_Rb21_22='on'; st214='on';st215_16='off';st217='on';
else
    stFm_Rb21_22='on'; st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;
%-----
set(hFm231,'Visible',stFm_Rb21_22); set(hRbut21,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hRbut22,'Visible',stFm_Rb21_22);
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)
.....

```

```

function GoCallbackRbut21
global hPopupmenu2 hRbut21 hRbut22
global hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----
if get(hRbut21,'Value')==1
    set(hRbut22,'Value',0);
else
    set(hRbut22,'Value',1);
end;
%-----
if get(hPopupmenu2,'Value')==4
    st214='off';st215_16='off';st217='off';
else
    st214='on';st215_16='off';st217='on';
end;
%-----
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)
.....

```

```

function GoCallbackRbut22
global hPopupmenu2 hRbut21 hRbut22 hEd214 hEd215 hEd216 hEd217
global hTxtEd14 hTxtEd15 hTxtEd16 hTxtEd17
%-----
if get(hRbut22,'Value')==1
    set(hRbut21,'Value',0);
else
    set(hRbut21,'Value',1);
end;
%-----
if get(hPopupmenu2,'Value')==4

```

```

    st214='off';st215_16='off';st217='off';
else
    st214='on';st215_16='on';st217='off';
end;

```

```

%-----
set(hEd214,'Visible',st214); set(hTxtEd14,'Visible',st214)
set(hEd215,'Visible',st215_16); set(hTxtEd15,'Visible',st215_16)
set(hEd216,'Visible',st215_16); set(hTxtEd16,'Visible',st215_16)
set(hEd217,'Visible',st217); set(hTxtEd17,'Visible',st217)
.....

```

```

function GoData1
%GUI
global hFig1
if isempty(findobj('Tag','tag_fig1')) Data1
else figure(hFig1)
end;
.....

```

```

function GoData2
%GUI
global hFig2
if isempty(findobj('Tag','tag_fig2')) Data2
else figure(hFig2)
end;
.....

```

```

function hnn=hn(y)
% висота нейтральної зони, м
global den_a h Pa gz;
hnn=h-(y(2)-Pa)/gz/(den_a-y(1)+0.0001);
.....

```

```

function hng=hn_g(y)
%graf help agree function висота нейтральної зони, м
hng(:,1)=hn_gg(y(:,1),y(:,2));
.....

```

```

function hngg=hn_gg(y1,y2)
%graf help agree function висота нейтральної зони, м
global den_a h Pa gz;
hngg=h-(y2-Pa)/gz/(den_a-y1+0.0001);
.....

```

```

function K_t=K_tus(y)
% гасін. коефіцієнт
% y1-denm y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush
global index; %index - індекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar 4-no
switch index
case 1 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.39-(y(11)+y(6))./y(1))));
case 2 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.85-(y(11)+y(5))./y(1))));
case 3 K_t=(0.5+1/pi*atan(200*(0.67-(y(11)+y(10))./y(1))));
case 4 K_t=1;
end;
.....

```

```

function K_t_gg=K_tus_gg(y1,y5,y6,y10,y11)
% гасін. koeficient
% y1-denm y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush
global index; %index - индекс вибору гас. газу
%1-CO2 2-N2 3-Ar
switch index
case 1 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.39-(y11+y6)./y1)));
case 2 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.85-(y11+y5)./y1)));
case 3 K_t_gg=(0.5+1/pi*atan(200*(0.67-(y11+y10)./y1)));
case 4 K_t_gg=1;
end;
.....

```

```

function keyy=key_aut(y)
% function ключ системи автоматичного гасін: y14'=key_aut(y)
% y13 -automatic temperature,K; y14-key automatic work
global T_cr; %поріг спрацьовуван. по температурі, K;
y14_cr=4*T_cr;
keyy=(-y(14).^2-y(13)+T_cr).*(y(14)-y14_cr);
.....

```

```

function MyClose
%GUI
global hFig0 hFig1 hFig2
select=questdlg('Ви бажаєте закрити програму?', 'Запит о закінченні роботи', 'Так','Ні','Ні');
switch select
case 'Так' delete(gcf)
otherwise return
end;
.....

```

```

function psii=psi(y,t)
% burn velocity, kg/c
% y1-denm y4-denO2 y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush y12-m_burn
global u_m x4a;
%u_m=0.047 kg/(m2*c)
psii=u_m *Ff(t).*K(y).*K_tus(y).*(0.5+1/pi*atan(1000*y(12)));
%-----
function Kk=K(y)
% burn velocity O2 koeficient
global x4a; % x4a=0.232 - beginning mas part O2
Kk=(y(4)./y(1)/x4a).^2;
.....

```

```

function psig=psi_g(y,t)
%graf help agree function burn velocity, kg/c
% y1-denm y4-denO2 y5-denN2 y6-denCO2 y10-denAr y11-den_tush y12-m_burn
global u_m x4a; % x4a=0.232 - beginning mas part O2
psig(:,1)=psi_gg(y(:,1),y(:,4),y(:,5),y(:,6),y(:,10),y(:,11),y(:,12),t);
%-----
function psigg=psi_gg(y1,y4,y5,y6,y10,y11,y12,t)
% graf help agree function burn velocity, kg/c
global u_m x4a;
psigg=u_m*Ff(t).*K_gg(y1,y4).*K_tus_gg(y1,y5,y6,y10,y11).*(0.5+1/pi*atan(1000*y12));
%-----

```

```

function Kgg=K_gg(y1,y4)
% burn velocity O2 koefisient
global x4a;
Kgg=(y4./y1/x4a).^2;
.....

function qc=q_c(T1,T2,x)
% питомий конвекційний тепловий потік у плоскому прошарку, Вт/м2
%T1 T2- температури поверхонь, К
%x - товщина прошарку між поверхн-ми, м
% lam_a - коефіцієнт теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% nu_a=2.0e-5; % коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
Pr_a=0.7; % критерій Прандтл. повітр.
gg=9.8; % прискорен. вільного падін., м/с2
%-----
qc=0.18*(gg*(T1-T2)*x^3./((T1+T2)/2.*nu_a((T1+T2)/2-273).^2)*Pr_a).^0.25.*lam_a((T1+T2)/2-273).*(T1-T2)/x;
%-----
function lam=lam_a(t)
% коеф. теплопровідності повітр., Вт/(м К)
% t - температура повітр. по Цельсію
lam=(2.4+0.0057*t)*1.0e-2;
%-----
function nu=nu_a(t)
% коеф. кінематичної в-зкості повітр., м2/с
nu=(1.33+0.00044*t)*1.0e-5;
.....

function qfr=q_fr(T1,T2,ep1,ep2)
% radiation heat density від гар. среди на поверхню, W/m2
%T1 - температура гор-ч. середовища, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-ч. середовища
%ep1 - ступінь чорноти холодної поверхні
%-----
ep12=ep1*ep2;
qfr=ep12*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....

function qtot=q_fw_tot(T1,T2,ep1,ep2,alfa)
% total heat density від гар. среди на поверхню, W/m2
%T1 - температура гор-ч. середовища, К
%T2 - температура холодної поверхні, К
%ep1 - ступінь чорноти гор-ч. середовища
%ep1 - ступінь чорноти холодної поверхні
%alfa - коефіцієнт тепловіддачі, W/(м2*К)
%-----
qtot=alfa.*(T1-T2)+ep1*ep2*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....

function qr=q_r(T1,T2,ep1,ep2)
% radiation heat density в прошарку, W/m2
%T1 T2- температури поверхонь, К
%ep1 ep2- ступені чорноти поверхонь

```

```
%-----
ep12=1/(1/ep1+1/ep2-1);
qr=ep12*5.67e-8*(T1.^4-T2.^4);
.....
```

```
function Qrr=Q_rad(y)
% radiation heat flu, W
global T_beg Fw;
ep=0.5;
Qrr=ep*5.67e-8*(Tm(y)^4-T_beg^4)*Fw;
.....
```

```
function Qww=Qw(y)
% convection heat flu, W
global T_beg Fw alf;
%alf=10; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
Qww=alf*(Tm(y)-T_beg)*Fw;
.....
```

```
function Start15
%start of Gui15
% інтегральна модель пожежі з врахуван. витрати маси пального
% і газообміну крізь два прорізи, вимушеною ventilation and системи
% газового гасін.+захисний поглинаючий екран на термічно товстому тілі
global hFig0
%-----
if isempty(findobj('Tag','tag_fig0')) Data0
else figure(hFig0)
end;
.....
```

```
function Tg=Tm(y)
% gas temperature, K
global R0;
% y1-denm y4-denO2, y5-denN2 y6-denCO2 y7-denCO
% y8-den_H2O y9-den_HCl y10-den_Ar y11 - den_tush
% global m4 m5 m6 m7 m8 m9 m10 m11;
%m4=32; m5=28; m6=44; m7=28; m8=18; m9=36.5 m10=40 m11=(28,44,40);
Tg=y(2)/R0./y(1)*29;
.....
```

```
function Tmg=Tm_g(y)
%graf help agree function gas temperature
global R0;
Tmg(:,1)=Tm_gg(y(:,1),y(:,2));
%-----
function Tmgg=Tm_gg(y1,y2)
% graf help agree function gas temperature
global R0;
Tmgg=y2/R0./y1*29;
.....
```


Додаток Д

Комп'ютерна програма розрахунку температур при сталому нагріванні і захисті здатним до спучування покриттям із 3-а активними компонентами

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) Вибирається файл «Go_eq_1_2_1on10_5_simple.m». Вводяться чисельні значення всіх параметрів захисного тіла і покриття. Далі цей файл запускається на виконання. В результаті програма почне обраховуватися і видасть результат (графіки залежностей температур, питомих теплових потоків, інших характеристик покриття від часу теплового впливу).

```

.....
function alff=alf(Tff)
%коефіцієнт тепловіддачі до поверхні покрит., W/(m2*K)
%температура джерела тепла Tff, K,
%-----
alff=11.6*exp(0.0023*(Tff-273))*0.2;
.....

function alfss=alf_s(Tsw)
%коефіцієнт тепловіддачі від поверхні підложки, W/(m2*K)
%температура поверхні підложки Tsw, K,
%-----
alfss=11.6*exp(0.0023*(Tsw-273));
.....

function C_tt=C_t(ma1,ma2,ma3)
% теплоємність ш. розбит. покрит., Дж/К
global mp; % маса пасивної компоненти у шарі, кг
global c_a1 c_a2 c_a3 c_p c_b1 c_b2 c_b3; % c_g1 c_g2 c_g3;
% c_a1=1.2e3; % питом. теплоємність 1-ої активної компоненти, j/(kg*K)
% c_a2=1.2e3; % питом. теплоємність 2-ої активної компоненти, j/(kg*K)
% c_a3=1.2e3; % питом. теплоємність 3-ої активної компоненти, j/(kg*K)
% c_p=1.2e3; % питом. теплоємність пасивної компоненти, j/(kg*K)
% c_b1=c_a2; % питом. теплоємність 1-го твердого продукта, j/(kg*K)
% c_b2=2.2e3; % питом. теплоємність 2-го твердого продукта, j/(kg*K)
% c_b3=2.2e3; % питом. теплоємність 3-го твердого продукта, j/(kg*K)
% c_g1=2.5e3; % питом. теплоємність 1-го газу, j/(kg*K)
% c_g2=1.2e3; % питом. теплоємність 2-го газу, j/(kg*K)
% c_g3=1.1e3; % питом. теплоємність 3-го газу, j/(kg*K)
%-----

```

```
C_tt=mp*c_p+ma1*c_a1+ma2*c_a2+ma3*c_a3+mb1(ma1)*c_b1+mb2(ma1,ma2)*c_b2+mb3(ma
3)*c_b3;%+mg1*c_g1+mg2*c_g2+mg3*c_g3;
```

```
function dltfn=deltafun(x,dx)
% приближен. дельта-функц. від x
% dx - характерн. ширина пика по x
%-----
dltfn=1/pi*dx./(x.^2+dx^2);
```

```
function Qaa=Qa(T,ma1,ma2,ma3)
% теплота реакції у шарі, Вт
global h_a1 h_b1 h_g1 h_a2 h_b2 h_g2 h_a3 h_b3 h_g3;
% h_a1=0;% питом. теплота утворен. 1-ої активної компоненти, j/kg
% h_b1=2.2e5; % питом. теплота утворен. 1-го твердого продукта, j/kg
% h_g1=2.2e5; % питом. теплота утворен. 1-го газу, j/kg
% h_a2=h_b1;% питом. теплота утворен. 2-ої активної компоненти, j/kg
% h_b2=5.2e5; % питом. теплота утворен. 2-го твердого продукта, j/kg
% h_g2=5.2e5; % питом. теплота утворен. 2-го газу, j/kg
% h_a3=0;% питом. теплота утворен. 3-ої активної компоненти, j/kg
% h_b3=3.2e5; % питом. теплота утворен. 3-го твердого продукта, j/kg
% h_g3=3.2e5; % питом. теплота утворен. 3-го газу, j/kg
%-----
```

```
global coef_b1 coef_g1 coef_b2 coef_g2 coef_b3 coef_g3;
% coef_b1=1-coef_g1; % масовий стехіометр коеф. утворен. b1
% coef_g1=0.5;% масовий стехіометр коеф. утворен. 1-го газу
% coef_b2=1-coef_g2;% масовий стехіометр коеф. утворен. b2
% coef_g2=0.25;% масовий стехіометр коеф. утворен. 2-го газу
% coef_b3=1-coef_g3;% масовий стехіометр коеф. утворен. b3
% coef_g3=0.4;% масовий стехіометр коеф. утворен. 3-го газу
%-----
```

```
global c_g1 c_g2 c_g3;
% c_g1=2.5e3; % питом. теплоємність 1-го газу, j/(kg*K)
% c_g2=1.2e3; % питом. теплоємність 2-го газу, j/(kg*K)
% c_g3=1.1e3; % питом. теплоємність 3-го газу, j/(kg*K)
%-----
```

```
global T0; %T0- початк. температура покрит., К T0=273 К;
global P;
% P=1.1*P0; %тиск у системі, Па
%-----
```

```
global dV_max; % максимальний об'єм ш., м3
% kv_max=4; % dV_max=kv_max*dr_0*F;
global dddV; % ширина перехідної області, м3
%dddV=0.01*dV_max; % ширина перехідної області, м3
%-----
```

```
dVVV=dV_loc(T,ma1,ma2,ma3,P);
%-----
```

```
Qaa=(h_a1 -coef_b1*h_b1-coef_g1*h_g1).*Ra1(T,ma1)... % реакційні втрати
+(h_a2 -coef_b2*h_b2-coef_g2*h_g2).*Ra2(T,ma2)...
+(h_a3 -coef_b3*h_b3-coef_g3*h_g3).*Ra3(T,ma2)...
-(T-T0).*tetafunc(dVVV,dV_max,dddV).*(coef_g1*c_g1*Ra1(T,ma1)... % унос енергії з
газами
```

```

+coef_g2*c_g2*Ra2(T,ma2)...
+coef_g3*c_g3*Ra3(T,ma3));
.....

function drr=dr(T,ma1,ma2,ma3)
% ширина ш. розбит. покрит., м
global F; % площа поверхні покрит., m2
%-----
drr=dV(T,ma1,ma2,ma3)/F;
.....

function dVV=dV(T,ma1,ma2,ma3)
% об'єм ш. розбит. покрит., м3
%-----
global dV_max; % максимальний и об'єм ш., м3
% kv_max=5; % dV_max=kv_max*dr_0*F;
global dddV; % ширина перехідної області, м3
%dddV=0.01*dV_max; % ширина перехідної області, м3
global P;
% P=1.1*P0; %тиск у системі, Па
%-----
dVVV=dV_loc(T,ma1,ma2,ma3,P);
% dVVV=dV_loc_P(Tw,ma,mg);
%-----
dVV=dVVV+(dV_max-dVVV).*tetafunc(dVVV,dV_max,dddV);
.....

function dVV=dV_loc(T,ma1,ma2,ma3,PP)
% об'єм ш. розбит. покрит.у випадку локалізації газової фази, м3
% PP- тиск у системі, Па
global mp; % маса пасивної компоненти у шарі, кг
global R0;
% R0=8.314;%універсальна газова стала, j/(mol*K)
global Tcr_v dTcr;
% Tcr_v=273+150; % Tcr_v- критична температура середовища, К - поріг делокалізації
% dTcr=5; %ширина перехідної області температур, К
global Mu_g1 Mu_g2 Mu_g3;
% Mu_g1=1.8e-2; % мол. маса 1-го газу, kg/mol
% Mu_g2=4.4e-2; % мол. маса 2-го газу, kg/mol
% Mu_g3=2.8e-2; % мол. маса 3-го газу, kg/mol
global v_a1 v_a2 v_a3 v_p v_b1 v_b2 v_b3;
% v_a1=0.9e-3; % питомий об'єм 1-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_a2=1.1e-3; % питомий об'єм 2-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_a3=0.5e-3; % питомий об'єм 3-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_p=0.6e-3; % питомий об'єм сплошної пасивної компоненти, m3/kg
% v_b1=v_a2; % питомий об'єм сплошного 1-го твердого продукту, m3/kg
% v_b2=1.2e-3; % питомий об'єм сплошного 2-го твердого продукту, m3/kg
% v_b3=0.7e-3; % питомий об'єм сплошного 3-го твердого продукту, m3/kg
%-----

dVV=mp*v_p+ma1*v_a1+ma2*v_a2+ma3*v_a3+mb1(ma1)*v_b1+mb2(ma1,ma2)*v_b2+mb3(ma3)*v_b3...

+(mg1_loc(ma1)/Mu_g1+mg2_loc(ma1,ma2)/Mu_g2+mg3_loc(ma3)/Mu_g3).*v_gaz_mol(T,PP);

```

```
%-----
```

```
function vgg=v_gaz_mol(T,PP)
% мольний об'єм газової компоненти, m3/mol
% T-температура середовища, K
% PP- тиск у системі, Pa
global R0;
% R0=8.314;%універсальна газова стала, j/(mol*K)
global v_a1 Mu_g1;
% v_a1=0.9e-3; % питомий об'єм 1-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% Mu_g1=1.8e-2; % мол. маса 1-го газа, kg/mol
global Tcr_v dTcr;
% Tcr_v=273+150; % Tcr_v- критична температура середовища, K - поріг делокалізації
% dTcr=5; %ширина перехідної області температур, K
v0=v_a1*Mu_g1; % питомий об'єм щільної газової компоненти, m3/mol
v1=R0*T/PP;% мольний об'єм газової компоненти від Tcr_v, m3/mol
%-----
vgg=v0+(v1-v0).*tetafunc(T,Tcr_v,dTcr);
```

```
function dVgg=dVg_deloc(ma1,ma2,ma3)
% об'єм газа у шарі у випадку делокалізації, м3а
% ma1,ma2,ma3,mb1,mb2,mb3-маси відповідних компонент у шарі, кг
global mp; % маса пасивної компоненти у шарі, кг
global v_a1 v_a2 v_a3 v_p v_b1 v_b2 v_b3;
% v_a1=0.9e-3; % питомий об'єм 1-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_a2=1.1e-3; % питомий об'єм 2-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_a3=0.5e-3; % питомий об'єм 3-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_p=0.6e-3; % питомий об'єм сплошної пасивної компоненти, m3/kg
% v_b1=v_a2; % питомий об'єм сплошного 1-го твердого продукта, m3/kg
% v_b2=1.2e-3; % питомий об'єм сплошного 2-го твердого продукта, m3/kg
% v_b3=0.7e-3; % питомий об'єм сплошного 3-го твердого продукта, m3/kg
% global dV_max; %% максимальний об'єм ш., м3
%-----
global dV_max; % максимальний об'єм ш., м3
%-----
dVgg=dV_max-
(mp*v_p+ma1*v_a1+ma2*v_a2+ma3*v_a3+mb1(ma1)*v_b1+mb2(ma1,ma2)*v_b2+mb3(ma3)*v_b3);
```

```
function dy=eq_1_2_1on10_5_simple(t,y) % обмежене вспучуван. речовини
% з врахуван. переноса перевизначен. ентальпії (а не потоком газа)
% в залежності від часу (t)
% три активних і три газових компоненти (a1->b1+g1 a2->b2+g2 a3->b3+g3)
% три активних і три газових компоненти (a1->a2+g1 a2->b2+g2 a3->b3+g3))
% 1 і 3 реакції йдуть незалежно, 2 з продукта першої реакції a2=b1!!!!
% теплопровідність залежить від параметрів
% виділено 10 шарів у покритті, 5 у підложці
% +окрема підложка на 5 шарів
% відлік шарів від холодної границі
% y1 y2 ...y10 -температура 1-го 2-го ...10-го шарів (T)
```

```

% y11 y12...y20- маса 1-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma1)
% y21 y22...y30- маса 2-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma2)
% y31 y32...y40- маса 3-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma3)
% y41-температура 1-го к покриттю підлож. ш. (Ts)
% y42-температура 2-го к покриттю підлож. ш. (Ts)
% y43-температура 3-го к покриттю підлож. ш. (Ts)
% y44-температура 4-го к покриттю підлож. ш. (Ts)
% y45-температура 5-го к покриттю підлож. ш. (Ts)
%-----
% y46-температура 1-го к гор-чей среде підлож. ш. (Ts)
% y47-температура 2-го к гор-чей среде покриттю підлож. ш. (Ts)
% y48-температура 3-го к гор-чей среде покриттю підлож. ш. (Ts)
% y49-температура 4-го к гор-чей среде покриттю підлож. ш. (Ts)
% y50-температура 5-го к гор-чей среде покриттю підлож. ш. (Ts)
%-----
dy=zeros(50,1);
f=zeros(50,1);
%-----
global F T0;
%-----
global c_s den_s lm_s L_s;
dr_s=L_s/5;
C_t_s=den_s*c_s*dr_s*F;
%-----
global coef_b1;
%-----
f(1)=1./C_t(y(11),y(21),y(31)).*((2*(y(41)-
y(1))./(dr_s/lm_s+dr(y(1),y(11),y(21),y(31))./lm(y(1),y(11),y(21),y(31)))...
-q_trans(y(1),y(11),y(21),y(31),y(2),y(12),y(22),y(32)))F...
-dQa(y(1),y(11),y(21),y(31)));
f(2)=1./C_t(y(12),y(22),y(32)).*((q_trans(y(1),y(11),y(21),y(31),y(2),y(12),y(22),y(32))...
-q_trans(y(2),y(12),y(22),y(32),y(3),y(13),y(23),y(33)))F...
-dQa(y(2),y(12),y(22),y(32)));
f(3)=1./C_t(y(13),y(23),y(33)).*((q_trans(y(2),y(12),y(22),y(32),y(3),y(13),y(23),y(33))...
-q_trans(y(3),y(13),y(23),y(33),y(4),y(14),y(24),y(34)))F...
-dQa(y(3),y(13),y(23),y(33)));
f(4)=1./C_t(y(14),y(24),y(34)).*((q_trans(y(3),y(13),y(23),y(33),y(4),y(14),y(24),y(34))...
-q_trans(y(4),y(14),y(24),y(34),y(5),y(15),y(25),y(35)))F...
-dQa(y(4),y(14),y(24),y(34)));
f(5)=1./C_t(y(15),y(25),y(35)).*((q_trans(y(4),y(14),y(24),y(34),y(5),y(15),y(25),y(35))...
-q_trans(y(5),y(15),y(25),y(35),y(6),y(16),y(26),y(36)))F...
-dQa(y(5),y(15),y(25),y(35)));
f(6)=1./C_t(y(16),y(26),y(36)).*((q_trans(y(5),y(15),y(25),y(35),y(6),y(16),y(26),y(36))...
-q_trans(y(6),y(16),y(26),y(36),y(7),y(17),y(27),y(37)))F...
-dQa(y(6),y(16),y(26),y(36)));
f(7)=1./C_t(y(17),y(27),y(37)).*((q_trans(y(6),y(16),y(26),y(36),y(7),y(17),y(27),y(37))...
-q_trans(y(7),y(17),y(27),y(37),y(8),y(18),y(28),y(38)))F...
-dQa(y(7),y(17),y(27),y(37)));
f(8)=1./C_t(y(18),y(28),y(38)).*((q_trans(y(7),y(17),y(27),y(37),y(8),y(18),y(28),y(38))...
-q_trans(y(8),y(18),y(28),y(38),y(9),y(19),y(29),y(39)))F...
-dQa(y(8),y(18),y(28),y(38)));
f(9)=1./C_t(y(19),y(29),y(39)).*((q_trans(y(8),y(18),y(28),y(38),y(9),y(19),y(29),y(39))...

```

```

-q_trans(y(9),y(19),y(29),y(39),y(10),y(20),y(30),y(40)))*F...
-dQa(y(9),y(19),y(29),y(39)));
f(10)=1./C_t(y(20),y(30),y(40)).*((q_trans(y(9),y(19),y(29),y(39),y(10),y(20),y(30),y(40))...
-2*(y(10)-TTf(t))./(dr(y(10),y(20),y(30),y(40))./lm(y(10),y(20),y(30),y(40))+
2./alf(TTf(t)))))*F...
-dQa(y(10),y(20),y(30),y(40)));
%-----
f(11)=Ra1(y(1),y(11));
f(12)=Ra1(y(2),y(12));
f(13)=Ra1(y(3),y(13));
f(14)=Ra1(y(4),y(14));
f(15)=Ra1(y(5),y(15));
f(16)=Ra1(y(6),y(16));
f(17)=Ra1(y(7),y(17));
f(18)=Ra1(y(8),y(18));
f(19)=Ra1(y(9),y(19));
f(20)=Ra1(y(10),y(20));
%-----
f(21)=-coef_b1*Ra1(y(1),y(11))+Ra2(y(1),y(21));
f(22)=-coef_b1*Ra1(y(2),y(12))+Ra2(y(2),y(22));
f(23)=-coef_b1*Ra1(y(3),y(13))+Ra2(y(3),y(23));
f(24)=-coef_b1*Ra1(y(4),y(14))+Ra2(y(4),y(24));
f(25)=-coef_b1*Ra1(y(5),y(15))+Ra2(y(5),y(25));
f(26)=-coef_b1*Ra1(y(6),y(16))+Ra2(y(6),y(26));
f(27)=-coef_b1*Ra1(y(7),y(17))+Ra2(y(7),y(27));
f(28)=-coef_b1*Ra1(y(8),y(18))+Ra2(y(8),y(28));
f(29)=-coef_b1*Ra1(y(9),y(19))+Ra2(y(9),y(29));
f(30)=-coef_b1*Ra1(y(10),y(20))+Ra2(y(10),y(30));
%-----
f(31)=Ra3(y(1),y(31));
f(32)=Ra3(y(2),y(32));
f(33)=Ra3(y(3),y(33));
f(34)=Ra3(y(4),y(34));
f(35)=Ra3(y(5),y(35));
f(36)=Ra3(y(6),y(36));
f(37)=Ra3(y(7),y(37));
f(38)=Ra3(y(8),y(38));
f(39)=Ra3(y(9),y(39));
f(40)=Ra3(y(10),y(40));
%-----
f(41)=1/C_t_s*(2*(y(1)-y(41))./(dr(y(1),y(11),y(21),y(31))./lm(y(1),y(11),y(21),y(31))+dr_s/lm_s)-
(y(41)-y(42))./(dr_s/lm_s))*F;
f(42)=1/C_t_s*((y(41)-y(42))./(dr_s/lm_s)-(y(42)-y(43))./(dr_s/lm_s))*F;
f(43)=1/C_t_s*((y(42)-y(43))./(dr_s/lm_s)-(y(43)-y(44))./(dr_s/lm_s))*F;
f(44)=1/C_t_s*((y(43)-y(44))./(dr_s/lm_s)-(y(44)-y(45))./(dr_s/lm_s))*F;
f(45)=1/C_t_s*((y(44)-y(45))./(dr_s/lm_s)-2*(y(45)-T0)./(dr_s/lm_s+2./alf_s(y(45)))))*F;
%-----
f(46)=1/C_t_s*((TTf(t)-y(46))./(1./alf(TTf(t))+dr_s/lm_s)-(y(46)-y(47))./(dr_s/lm_s))*F;
f(47)=1/C_t_s*((y(46)-y(47))./(dr_s/lm_s)-(y(47)-y(48))./(dr_s/lm_s))*F;
f(48)=1/C_t_s*((y(47)-y(48))./(dr_s/lm_s)-(y(48)-y(49))./(dr_s/lm_s))*F;
f(49)=1/C_t_s*((y(48)-y(49))./(dr_s/lm_s)-(y(49)-y(50))./(dr_s/lm_s))*F;
f(50)=1/C_t_s*((y(49)-y(50))./(dr_s/lm_s)-2*(y(50)-T0)./(dr_s/lm_s+2./alf_s(y(50)))))*F;

```

dy=f;

```

function Go_eq_1_2_1on10_5_simple
% solution of eq_1_2_1on10_5 обмежене вспучуван. речовини
% з врахуван. переноса перевизначен. ентальпії (а не потоком газу)
% в залежності від часу (t)
% три активних и три газових компоненти (a1->b1+g1  a2->b2+g2  a3->b3+g3)
% 1 и 3 реакції идут незалежно, 2 из продукта першого реакції a2=b1!!!!
% теплопровідність залежить від параметрів
% виділено 10 шарів у покритті, 5 у підложці
% +окрема підложка на 5 шарів
% відлік шарів від холодної границі
% y1 y2 ...y10 -температура 1-го 2-го ...10-го шарів (Tw)
% y11 y12...y20- маса 1-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma1)
% y21 y22...y30- маса 2-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma2)
% y31 y32...y40- маса 3-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma3)
% y41-температура 1-го к покриттю подлож. ш. (Ts)
% y42-температура 2-го к покриттю подлож. ш. (Ts)
% y43-температура 3-го к покриттю подлож. ш. (Ts)
% y44-температура 4-го к покриттю подлож. ш. (Ts)
% y45-температура 5-го к покриттю подлож. ш. (Ts)
%-----
% y46-температура 1-го к гор-чей среде подлож. ш. (Ts)
% y47-температура 2-го к гор-чей среде покриттю подлож. ш. (Ts)
% y48-температура 3-го к гор-чей среде покриттю подлож. ш. (Ts)
% y49-температура 4-го к гор-чей среде покриттю подлож. ш. (Ts)
% y50-температура 5-го к гор-чей среде покриттю подлож. ш. (Ts)
%-----
global R0 P0 P;
R0=8.314;%універсальна газова стала, j/(mol*K)
P0=1.01e5;%зовнішній тиск у системі, Pa
P=1.1*P0; %тиск у системі, Pa
%-----
global c_s den_s lm_s L_s;% alf_s;
c_s=2.72e3; % питома теплоємність сосни, j/(kg*K)
den_s=546; % густина сосни, kg/m3
lm_s=0.16; % коеф. теплопровідності сосни, W/(m*K)
L_s=1.5e-2; % товщина підложки, m
%alf_s=10;% коеф. тепловіддачі з боку підложки,W/(m2*K)
%-----
global v_a1 v_a2 v_a3 v_p v_b1 v_b2 v_b3;
v_a1=0.9e-3; % питомий об'єм 1-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
v_a2=1.1e-3; % питомий об'єм 2-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
v_a3=0.7e-3; % питомий об'єм 3-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
v_p=0.6e-3; % питомий об'єм сплошної пасивної компоненти, m3/kg
v_b1=v_a2; % питомий об'єм сплошного 1-го твердого продукта, m3/kg
v_b2=1.2e-3; % питомий об'єм сплошного 2-го твердого продукта, m3/kg
v_b3=0.8e-3; % питомий об'єм сплошного 3-го твердого продукта, m3/kg
global c_a1 c_a2 c_a3 c_p c_b1 c_b2 c_b3 c_g1 c_g2 c_g3;
c_a1=1.2e3; % питом. теплоємність 1-ої активної компоненти, j/(kg*K)
c_a2=1.2e3; % питом. теплоємність 2-ої активної компоненти, j/(kg*K)
c_a3=1.2e3; % питом. теплоємність 3-ої активної компоненти, j/(kg*K)

```

```

с_p=1.2e3; % питом. теплоємність пасивної компоненти, j/(kg*K)
с_b1=с_a2; % питом. теплоємність 1-го твердого продукта, j/(kg*K)
с_b2=2.2e3; % питом. теплоємність 2-го твердого продукта, j/(kg*K)
с_b3=2.2e3; % питом. теплоємність 3-го твердого продукта, j/(kg*K)
с_g1=2.5e3; % питом. теплоємність 1-го газу, j/(kg*K)
с_g2=1.2e3; % питом. теплоємність 2-го газу, j/(kg*K)
с_g3=1.1e3; % питом. теплоємність 3-го газу, j/(kg*K)
global coef_b1 coef_g1 coef_b2 coef_g2 coef_b3 coef_g3;
coef_b1=1-coef_g1; % масовий стехіометр коеф. утворен. b1 a2=b1
coef_g1=0.2;% масовий стехіометр коеф. утворен. 1-го газу
coef_b2=1-coef_g2;% масовий стехіометр коеф. утворен. b2
coef_g2=0.25;% масовий стехіометр коеф. утворен. 2-го газу
coef_b3=1-coef_g3;% масовий стехіометр коеф. утворен. b3
coef_g3=0.4;% масовий стехіометр коеф. утворен. 3-го газу
global Mu_g1 Mu_g2 Mu_g3;
Mu_g1=1.8e-2; % мол. маса 1-го газу, kg/mol
Mu_g2=4.4e-2; % мол. маса 2-го газу, kg/mol
Mu_g3=2.8e-2; % мол. маса 3-го газу, kg/mol
%-----
global L_0 F; % початк. товщина і площа поверхні покрит., m и m2
L_0=1.5e-3; F=1;
%-----
global dr_0 N; % початк. ширина шарів розбит., m
N=10; %N-кількість шарів розбит.;
dr_0=L_0/N;
%-----
kv_max=4; %максимальний коеф. об'ємного розширен. ш.
global dV_max; % максимальний об'єм ш., м3
dV_max=kv_max*dr_0*F;
global dddV; % ширина перехідної області, м3
dddV=1e-3*dV_max; % ширина перехідної області, м3
global Tcr_v dTcr;
Tcr_v=273+150; % Tcr_v- критич. температура середовища, К - поріг делокалізації
dTcr=5; %ширина перехідної області температур, К
%-----
global r_mp0 r_ma10 r_ma20 r_ma30; %почат.об'ємн. доли пасив.і актив.компонент
r_mp0=0.4; %початк. об'ємн. дол. пасивної компоненти
ka1=0.68; %дол. 1-ої активної комп. від об'ємних долей активних компонент
ka2=0.02; %дол. 2-ої активної комп. від об'ємних долей активних компонент
ka3=(1-ka1-ka2); %дол. 3-ей актив. комп. від об'ємн. долей актив. компонент
r_ma10=ka1*(1-r_mp0); %початк. об'ємн. дол. 1-ої активної компоненти
r_ma20=ka2*(1-r_mp0); %початк. об'ємн. дол. 2-ої активної компоненти
r_ma30=ka3*(1-r_mp0); %початк. об'ємн. дол. 3-ої активної компоненти
global h_a1 h_b1 h_g1 h_a2 h_b2 h_g2 h_a3 h_b3 h_g3;
h_a1=0;% питом. теплота утворен. 1-ої активної компоненти, j/kg
h_b1=2.2e5; % питом. теплота утворен. 1-го твердого продукта, j/kg
h_g1=2.2e6; % питом. теплота утворен. 1-го газу, j/kg
h_a2=h_b1;% питом. теплота утворен. 2-ої активної компоненти, j/kg
h_b2=4.2e5; % питом. теплота утворен. 2-го твердого продукта, j/kg
h_g2=4.0e5; % питом. теплота утворен. 2-го газу, j/kg
h_a3=0;% питом. теплота утворен. 3-ої активної компоненти, j/kg
h_b3=8.4e5; % питом. теплота утворен. 3-го твердого продукта, j/kg

```



```

h_g3=8.2e5; % питом. теплота утворен. 3-го газа, j/kg
%-----
global mp; % маса пасивної компоненти у шарі, кг
mp=r_mp0*F*dr_0/v_p;
global ma10 ma20 ma30; % початкові маси активних компонент у шарі, кг
ma10=r_ma10*F*dr_0/v_a1;
ma20=r_ma20*F*dr_0/v_a2;
ma30=r_ma30*F*dr_0/v_a3;
m00=mp+ma10+ma20+ma30; %m00-початк. маса прошарку, кг
%-----
global time_f; %time_f - загальне time процесса нагрєва, s
time_f=1000;
%-----
global Tf_max Tf0 tau_f;
% Tf_max - максимальн. абсолютн. температура джерела, K
% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, K
% tau_f - характерний час розігріву джерела, c
Tf_max=950+273;
Tf0=273;
tau_f=30;
%-----
global T0; %T0- початк. температура покрит., K
T0=273;
%-----
y1=T0; y2=T0; y3=T0; y4=T0; y5=T0; y6=T0; y7=T0; y8=T0; y9=T0; y10=T0;
y11=ma10; y12=ma10; y13=ma10; y14=ma10; y15=ma10; y16=ma10; y17=ma10; y18=ma10;
y19=ma10; y20=ma10;
y21=ma20; y22=ma20; y23=ma20; y24=ma20; y25=ma20; y26=ma20; y27=ma20; y28=ma20;
y29=ma20; y30=ma20;
y31=ma30; y32=ma30; y33=ma30; y34=ma30; y35=ma30; y36=ma30; y37=ma30; y38=ma30;
y39=ma30; y40=ma30;
y41=T0; y42=T0; y43=T0; y44=T0; y45=T0;
y46=T0; y47=T0; y48=T0; y49=T0; y50=T0;
%----- Numerical solution -----
% solution of eq_1_2_1on10_5_simple -----
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);
[T,Y]=ode15s('eq_1_2_1on10_5_simple',[0 time_f],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10...
    y11 y12 y13 y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20 y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
    y31 y32 y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40 y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49
    y50],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,TTf(T)-T0,T,Tww(Y(:,10),Y(:,20),Y(:,30),Y(:,40),TTf(T))-T0,...
    T,Y(:,10)-T0,T,Y(:,1)-T0,T,Y(:,41)-T0,T,Y(:,46)-T0)
    legend('t_f','t_s','t_1_0','t_1','t_*','t_{*.free}');
axis([0,200,0,Tf_max-Tf0+10]);
xlabel('\tau, c');
ylabel('t^oC');
title('Температури')
grid on;
% %-----
figure;

```

```

plot(T,Y(:,11)/m00,T,Y(:,20)/m00,T,Y(:,21)/m00,T,Y(:,30)/m00,T,Y(:,31)/m00,T,Y(:,40)/m00)
legend('g_a_1(x_1)','g_a_1(x_1_0)','g_a_2(x_1)','g_a_2(x_1_0)','g_a_3(x_1)','g_a_3(x_1_0)');
%-----
ga_max=ma10/m00;
if ga_max<(ma20/m00) ga_max=ma20/m00; end
if ga_max<(ma30/m00) ga_max=ma30/m00; end
axis([0,time_f,0,ga_max+0.01]);
%-----
ylabel('dm_{ai}(x_j)/dm_0');
xlabel('\tau, c');
axis([0,800,0,0.35]);
title('Маси активних компонентів у відношенні до початкової маси')
grid on;
% %-----
figure;
plot(T,kv(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31)),T,kv(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34)),...
T,kv(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37)),T,kv(Y(:,10),Y(:,20),Y(:,30),Y(:,40)),...
T,L_tot_g(Y)/L_0)
legend('k_{v.1}','k_{v.4}','k_{v.7}','k_{v.10}','k_{v.tot}');
xlabel('\tau, c');
ylabel('k_v');
axis([0,200,0,4.5]);
title('Коефіцієнт об'ємного розширен.')
grid on;
% %-----
figure;
plot(T,lm(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31)),T,lm(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34)),...
T,lm(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37)),T,lm(Y(:,10),Y(:,20),Y(:,30),Y(:,40)))
legend('\lambda(x_1)','\lambda(x_4)','\lambda(x_7)','\lambda(x_1_0)');
xlabel('\tau, c');
ylabel('\lambda, Вт/(м К)');
axis([0,200,0,0.7]);
title('\lambda(x)-локальний коефіцієнт теплопровідності')
grid on;
%-----
figure;
plot(T,m_out_g(Y)/(N*m00))
xlabel('\tau, c');
ylabel('\Delta m_{tot}/m_0');
axis([0,time_f,0,0.25]);
title('Загальна відносна втрата маси')
grid on;
%-----
figure;
plot(T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...

```

```

dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37))+dr(Y(:,8),Y(:,18),Y(:,28),Y(:,38)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37))+dr(Y(:,8),Y(:,18),Y(:,28),Y(:,38))+...
dr(Y(:,9),Y(:,19),Y(:,29),Y(:,39)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37))+dr(Y(:,8),Y(:,18),Y(:,28),Y(:,38))+...
dr(Y(:,9),Y(:,19),Y(:,29),Y(:,39))+dr(Y(:,10),Y(:,20),Y(:,30),Y(:,40)))
legend('x_1','x_2','x_3','x_4','x_5','x_6','x_7','x_8','x_9','x_1_0');
xlabel('tau, c');
ylabel('x_i(\tau), m');
axis([0,200,0,L_0*(kv_max+0.1)]);
title('Просторова координата шарів')
grid on;
%-----
figure;
plot(T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37))+dr(Y(:,8),Y(:,18),Y(:,28),Y(:,38)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...

```

```

dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37))+dr(Y(:,8),Y(:,18),Y(:,28),Y(:,38))+...
dr(Y(:,9),Y(:,19),Y(:,29),Y(:,39)),...
T,dr(Y(:,1),Y(:,11),Y(:,21),Y(:,31))+dr(Y(:,2),Y(:,12),Y(:,22),Y(:,32))+...
dr(Y(:,3),Y(:,13),Y(:,23),Y(:,33))+dr(Y(:,4),Y(:,14),Y(:,24),Y(:,34))+...
dr(Y(:,5),Y(:,15),Y(:,25),Y(:,35))+dr(Y(:,6),Y(:,16),Y(:,26),Y(:,36))+...
dr(Y(:,7),Y(:,17),Y(:,27),Y(:,37))+dr(Y(:,8),Y(:,18),Y(:,28),Y(:,38))+...
dr(Y(:,9),Y(:,19),Y(:,29),Y(:,39))+dr(Y(:,10),Y(:,20),Y(:,30),Y(:,40)))
legend('x_1','x_2','x_3','x_4','x_5','x_6','x_7','x_8','x_9','x_1_0');
xlabel('\tau, c');
ylabel('x_i(\tau), m');
axis([0,200,0,L_0*(kv_max+0.1)]);
title('Просторова координата шарів')
grid on;

```

```

function kvv=kv(T,ma1,ma2,ma3)
% коефіцієнт об'ємного расширен. фиксированного об'ємчика
global dr_0; % початк. ширина шарів розбит., m
global F; % площа поверхні покрит., m2
%-----
kvv=dV(T,ma1,ma2,ma3)/(F*dr_0);

```

```

function L_gg=L_tot_g(y) % for graphic
% загальна товщина покрит., м
% відлік шарів від холодної границі
% y1 y2 ...y10 -температура 1-го 2-го ...10-го шарів (Tw)
% y11 y12...y20- маса 1-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma1)
% y21 y22...y30- маса 2-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma2)
% y31 y32...y40- маса 3-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma3)
%-----
L_gg(:,1)=dr(y(:,1),y(:,11),y(:,21),y(:,31))+dr(y(:,2),y(:,12),y(:,22),y(:,32))...
+dr(y(:,3),y(:,13),y(:,23),y(:,33))+dr(y(:,4),y(:,14),y(:,24),y(:,34))...
+dr(y(:,5),y(:,15),y(:,25),y(:,35))+dr(y(:,6),y(:,16),y(:,26),y(:,36))...
+dr(y(:,7),y(:,17),y(:,27),y(:,37))+dr(y(:,8),y(:,18),y(:,28),y(:,38))...
+dr(y(:,9),y(:,19),y(:,29),y(:,39))+dr(y(:,10),y(:,20),y(:,30),y(:,40)));

```

```

function lmm=lm(T,ma1,ma2,ma3)
%ефективний коефіцієнт теплопровідності покрит., W/(m*K)
%-----
global mp; % маса пасивної компоненти у шарі, кг
global v_a1 v_a2 v_a3 v_p v_b1 v_b2 v_b3;
% v_a1=0.9e-3; % питомий об'єм 1-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_a2=1.1e-3; % питомий об'єм 2-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_a3=0.5e-3; % питомий об'єм 3-ої сплошної активної компоненти, m3/kg
% v_p=0.6e-3; % питомий об'єм сплошної пасивної компоненти, m3/kg
% v_b1=v_a2; % питомий об'єм сплошного 1-го твердого продукта, m3/kg
% v_b2=1.2e-3; % питомий об'єм сплошного 2-го твердого продукта, m3/kg
% v_b3=0.7e-3; % питомий об'єм сплошного 3-го твердого продукта, m3/kg
%-----
lm_p=0.8; %коефіцієнт теплопровідності сплошної твердої фази p, W/(m*K)
lm_a1=0.6; %коефіцієнт теплопровідності сплошної твердої фази a, W/(m*K)

```

```

lm_a2=0.5; %коефіцієнт теплопровідності сплошної твердої фази a, W/(m*K)
lm_a3=0.7; %коефіцієнт теплопровідності сплошної твердої фази a, W/(m*K)
lm_b2=0.4; %коефіцієнт теплопровідності сплошної твердої фази b, W/(m*K)
lm_b3=0.5; %коефіцієнт теплопровідності сплошної твердої фази b, W/(m*K)
%-----
% cc-безрозмірний коефіцієнт структури в теплопровідності твердої фази
%-----
global dV_max; % максимальний об'єм ш., м3
% kv_max=5; % dV_max=kv_max*dr_0*F;
global dddV; % ширина перехідної області, м3
%dddV=0.01*dV_max; % ширина перехідної області, м3
global P;
% P=1.1*P0; %тиск у системі, Па
%-----
dVVV=dV_loc(T,ma1,ma2,ma3,P);
% dVVV=dV_loc_P(Tw,ma,mg);
%-----
cc=0.9+(0.6-0.9)*tetafunc(dVVV,dV_max,dddV);
%-----
lmm=cc.*abs((lm_p*mp*v_p+lm_a1*ma1*v_a1+lm_a2*ma2*v_a2+lm_a3*ma3*v_a3+...
lm_b2*mb2(ma1,ma2)*v_b2+lm_b3*mb3(ma3)*v_b3)./dV(T,ma1,ma2,ma3));
.....

```

```

function mm=m_out_g(y)
% убиль маси у покритті, кг
% допоміжна функц. побудови графика
% загальна товщина покрит., м
% відлік шарів від холодної границі
% виділено 10 шарів у покритті
% y1 y2 ...y10 -температура 1-го 2-го ...10-го шарів (T)
% y11 y12...y20- маса 1-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma1)
% y21 y22...y30- маса 2-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma2)
% y31 y32...y40- маса 3-ої активної компоненти 1-го 2-го ...10-го шарів (ma3)
global P;
% P=1.1*P0; % тиск у системі, Па
global dV_max; % максимальний об'єм ш., м3
% kv_max=5; % dV_max=kv_max*dr_0*F;
global dddV; % ширина перехідної області, м3
%dddV=0.01*dV_max; % ширина перехідної області, м3
%-----
mm(:,1)=dm_out(y(:,1),y(:,11),y(:,21),y(:,31))+dm_out(y(:,2),y(:,12),y(:,22),y(:,32))...
+dm_out(y(:,3),y(:,13),y(:,23),y(:,33))+dm_out(y(:,4),y(:,14),y(:,24),y(:,34))...
+dm_out(y(:,5),y(:,15),y(:,25),y(:,35))+dm_out(y(:,6),y(:,16),y(:,26),y(:,36))...
+dm_out(y(:,7),y(:,17),y(:,27),y(:,37))+dm_out(y(:,8),y(:,18),y(:,28),y(:,38))...
+dm_out(y(:,9),y(:,19),y(:,29),y(:,39))+dm_out(y(:,10),y(:,20),y(:,30),y(:,40)));
%-----
function dm=dm_out(T,ma1,ma2,ma3)
% убиль маси в елементарному шарі, кг
%-----
global dV_max; % максимальний об'єм ш., м3
% kv_max=5; % dV_max=kv_max*dr_0*F;
global dddV; % ширина перехідної області, м3
%dddV=0.01*dV_max; % ширина перехідної області, м3

```

```

global P;
% P=1.1*P0; % тиск у системі, Pa
dVVV=dV_loc(T,ma1,ma2,ma3,P);
%-----
% mg_loc(ma1,ma2,ma3)- маса газу у шарі у випадку локалізації, кг
%-----
dm=mg_loc(ma1,ma2,ma3).*tetafunc(dVVV,dV_max,dddV);
.....

function mbb=mb1(ma1)
% маса твердого продукту реакції 1 у шарі, кг
global ma10; % початк. маса 1-ої активної компоненти у шарі, кг
global coef_b1;
% coef_b1% масовий стехіометр коеф. утворен. b1
%-----
mbb=coef_b1*(ma10-ma1);
.....

function mbb=mb2(ma1,ma2)
% маса твердого продукту реакції 2 у шарі, кг
global ma20; % початк. маса 2-ої активної компоненти у шарі, кг
global coef_b2;
% coef_b2% масовий стехіометр коеф. утворен. b2
%-----
mbb=coef_b2*(ma20+mb1(ma1)-ma2);
.....

function mbb=mb3(ma3)
% маса твердого продукту реакції 3 у шарі, кг
global ma30; % початк. маса 3-ої активної компоненти у шарі, кг
global coef_b3;
% coef_b3% масовий стехіометр коеф. утворен. b3
%-----
mbb=coef_b3*(ma30-ma3);
.....

function mgg=mg1_loc(ma1)
% маса газу g1 від розпаду a1 у шарі у випадку локалізації, кг
global ma10; % початк. маса активної компоненти у шарі, кг
global coef_g1;
% coef_g1% масовий стехіометр коеф. утворен. g1
%-----
mgg=coef_g1*(ma10-ma1);
.....

function mgg=mg2_loc(ma1,ma2)
% маса газу g2 від розпаду a2 у шарі у випадку локалізації, кг
global ma20; % початк. маса активної компоненти у шарі, кг
global coef_g2;
% coef_g2% масовий стехіометр коеф. утворен. g2
%-----
mgg=coef_g2*(ma20+mb1(ma1)-ma2);
.....

function mgg=mg3_loc(ma3)
% маса газу g3 від розпаду a3 у шарі у випадку локалізації, кг

```

```

global ma30; % початк. маса активної компоненти у шарі, кг
global coef_g3;
% coef_g3% масовий стехиометр коеф. утворен. g3
%-----
mgg=coef_g3*(ma30-ma3);
.....

function mgloc=mg_loc(ma1,ma2,ma3)
% маса газу у шарі у випадку локалізації, кг
%-----
% mg1_loc(ma1)- маса газу g1 від розпаду a1 у шарі у випадку локалізації, кг
% mg2_loc(ma1,ma2)- маса газу g2 від розпаду a2 у шарі у випадку локалізації, кг
% mg3_loc(ma3)- маса газу g3 від розпаду a3 у шарі у випадку локалізації, кг
%-----
mgloc=mg1_loc(ma1)+mg2_loc(ma1,ma2)+mg3_loc(ma3);
.....

function plot_tetafunc
% побудова графіку різних реалізацій єдиничної ступеньки на x_cr шириною dx
% tetafun(x,x_cr,dx)=0.5+1/pi*atan((x-x_cr)/dx);
% tetafunc(x,x_cr,dx)=0.5+0.5*tanh((x-x_cr)/dx);
x=-5:0.1:5;
dx=0.5;
x_cr=dx;
plot(x,tetafun(x,x_cr,dx),x,tetafunc(x,x_cr,dx))
legend('arctan','tanh');
grid on;
.....

function qtr=q_trans(T1,ma11,ma21,ma31,T2,ma12,ma22,ma32)
% питомий потік тепла теплопровідністю між шарами 1 і 2, Вт/м2
% T1, T2 -температура 1-го 2-го ...10-го шарів (Tw)
% ma11, ma12 - маса 1-ої активної компоненти (ma1) сусідніх 1-го 2-го шарів
% ma21, ma22 - маса 2-ої активної компоненти (ma2) сусідніх 1-го 2-го шарів
% ma31, ma32 - маса 3-ої активної компоненти (ma3) сусідніх 1-го 2-го шарів
qtr=2*(T1-
T2)./(dr(T1,ma11,ma21,ma31)./lm(T1,ma11,ma21,ma31)+dr(T2,ma12,ma22,ma32)./lm(T2,ma12,
ma22,ma32));
.....

function Raa=Ra1(T,ma1)
% швидкість зміни маси 1-го активного компонента у шарі, кг/с
tau_a1=1.0e-2; %tau_a1 - характерний час реакції, с
T_a1=1000; %T_a1 - характерн. температура реакції, К
%-----
Ta1=273+100; % Ta1- характерн. температура розпаду активного компонента, К
dT_a=5.0; %ширина перехідної області температур, К
%-----
Raa=-ma1/tau_a1.*exp(-T_a1./T).*tetafunc(T,Ta1,dT_a); %abs(T-Ta1)/Ta1.
.....

function Raa=Ra2(T,ma2)
% швидкість зміни маси 2-го активного компонента у шарі, кг/с
tau_a2=5.0e-0; %tau_a2 - характерний час реакції, с
T_a2=1500; %T_a2 - характерн. температура реакції, К

```

```

%-----
Ta2=273+250; % Ta2- характерн. температура распада активного компонента, K
dTа=15.0; % ширина перехідної області температур, K
%-----
Raa=-ma2/tau_a2.*exp(-T_a2./T).*tetafunc(T,Ta2,dTa);
.....

function Raa=Ra3(T,ma3)
% швидкість зміни маси 3-го активного компонента у шарі, кг/с
tau_a3=5.0e-0; %tau_a3 - характерний час реакції, с
T_a3=900; %T_a2 - характерн. температура реакції, K
%-----
Ta3=273+400;% Ta3- характерн. температура распада активного компонента, K
dTа=20.0; % ширина перехідної області температур, K
%-----
Raa=-ma3/tau_a3.*exp(-T_a3./T).*tetafunc(T,Ta3,dTa);
.....

function tetafunction=tetafun(x,x_cr,dx)
%єдинична сходинка на x_cr шириной dx
tetafunction=0.5+1/pi*atan((x-x_cr)/dx);
.....

function tetafunction=tetafunc(x,x_cr,dx)
%єдинична сходинка на x_cr шириной dx
tetafunction=0.5+0.5*tanh((x-x_cr)/dx);
.....

function Tff=TTf(t)
% температура джерела тепла Tf, K,
% в залежності від часу t, с
global Tf_max Tf0 tau_f;
% Tf_max - максимальн. абсолютн. температура джерела, K
% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, K
% tau_f - характерний час розігріву джерела, с
%-----
Tff=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f);
.....

function Twww=Tw(Tw,ma1w,ma2w,ma3w,Tf)
% температура поверхні покрит., K
% Tw - середн. температура зовнішнього шару, K
% maw - маса відповідної активної компоненти зовнішнього ш., кг
% Tf - температура джерела тепла, K,
%global ;
%-----
Twww=Tf-2./alf(Tf).*(Tf-Tw)./(dr(Tw,ma1w,ma2w,ma3w)./lm(Tw,ma1w,ma2w,ma3w)+
2./alf(Tf));
.....

```


Додаток Е

Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при сталому нагріванні

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) В залежності від характеру підзахисного тіла вибирається файл «Go***.m». В його текст вводяться чисельні значення всіх параметрів покриття підзахисного тіла. Далі цей файл запускається на виконання. В результаті програма почне обраховуватися і видасть результат (графіки залежностей температур від часу теплового впливу).

Різним варіантам підзахисних тіл відповідають наступні файли:

1) термічно тонке тіло - «Go_eq_10_20_20metal_f.m»;

2) термічно товсте тіло – «Go_eq_10_20_20woode_f.m»;

```

.....
function d22=d2(y1,y2,y3)
% друг. різниц. у
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d22=y1+y3-2*y2;
.....

function dy=eq_10_20_20metal_f(t,y)
% захисний поглин. екран із двох боків на термічно тонкому тіліє
% температура Tff=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и метала lamm и
% теплоємність метала cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів из першого (захисного) прошарку, K
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів из другого (захищеного)
% прошарку, K
%-----
% y31,y32,...,y49,y50 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищеного
% прошарку, K
%-----
dy=zeros(50,1);
%----- global variables -----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1;

```

```

global den2;
global h1 h2 dx1 dx2;
global qrr;
global T0 alf;
%-----
f=zeros(50,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; % cpv1 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
f1=1/cpv1/dx1^2; % f1-характерн. коеф. ш. товщиною dx1 1-го прошарку, К*с2/kg/m
f2=1/den2/dx2^2; % f2-характерн. коеф. ш. товщиною dx2 2-го прошарку, м/kg
%-----
f(1)=1/cpv1/dx1*(TTf(t)+qrr/alf-y(1))./(1/alf+dx1/2./lamt(y(1)))...
    -(y(1)-y(2)).*lamt((y(1)+y(2))/2)*f1;
f(2)=d2t(y(1),y(2),y(3))*f1;
f(3)=d2t(y(2),y(3),y(4))*f1;
f(4)=d2t(y(3),y(4),y(5))*f1;
f(5)=d2t(y(4),y(5),y(6))*f1;
f(6)=d2t(y(5),y(6),y(7))*f1;
f(7)=d2t(y(6),y(7),y(8))*f1;
f(8)=d2t(y(7),y(8),y(9))*f1;
f(9)=d2t(y(8),y(9),y(10))*f1;
f(10)=(y(9)-y(10)).*lamt((y(9)+y(10))/2)*f1...
    -1/cpv1/dx1*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)));
f(11)=(1/den2/dx2*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)))...
    -(y(11)-y(12)).*lamm((y(11)+y(12))/2)*f2)./cm(y(11));
f(12)=d2m(y(11),y(12),y(13))*f2./cm(y(12));
f(13)=d2m(y(12),y(13),y(14))*f2./cm(y(13));
f(14)=d2m(y(13),y(14),y(15))*f2./cm(y(14));
f(15)=d2m(y(14),y(15),y(16))*f2./cm(y(15));
f(16)=d2m(y(15),y(16),y(17))*f2./cm(y(16));
f(17)=d2m(y(16),y(17),y(18))*f2./cm(y(17));
f(18)=d2m(y(17),y(18),y(19))*f2./cm(y(18));
f(19)=d2m(y(18),y(19),y(20))*f2./cm(y(19));
f(20)=d2m(y(19),y(20),y(21))*f2./cm(y(20));
f(21)=d2m(y(20),y(21),y(22))*f2./cm(y(21));
f(22)=d2m(y(21),y(22),y(23))*f2./cm(y(22));
f(23)=d2m(y(22),y(23),y(24))*f2./cm(y(23));
f(24)=d2m(y(23),y(24),y(25))*f2./cm(y(24));
f(25)=d2m(y(24),y(25),y(26))*f2./cm(y(25));
f(26)=d2m(y(25),y(26),y(27))*f2./cm(y(26));
f(27)=d2m(y(26),y(27),y(28))*f2./cm(y(27));
f(28)=d2m(y(27),y(28),y(29))*f2./cm(y(28));
f(29)=d2m(y(28),y(29),y(30))*f2./cm(y(29));
f(30)=(y(29)-y(30)).*lamm((y(29)+y(30))/2)*f2./cm(y(30));
%-----
f(31)=(1/den2/dx2*(TTf(t)+qrr/alf-y(31))./(1/alf+dx2/2./lamm(y(31)))...
    -(y(31)-y(32)).*lamm((y(31)+y(32))/2)*f2)./cm(y(31));
f(32)=d2m(y(31),y(32),y(33))*f2./cm(y(32));
f(33)=d2m(y(32),y(33),y(34))*f2./cm(y(33));
f(34)=d2m(y(33),y(34),y(35))*f2./cm(y(34));
f(35)=d2m(y(34),y(35),y(36))*f2./cm(y(35));

```

```

f(36)=d2m(y(35),y(36),y(37))*f2./cm(y(36));
f(37)=d2m(y(36),y(37),y(38))*f2./cm(y(37));
f(38)=d2m(y(37),y(38),y(39))*f2./cm(y(38));
f(39)=d2m(y(38),y(39),y(40))*f2./cm(y(39));
f(40)=d2m(y(39),y(40),y(41))*f2./cm(y(40));
f(41)=d2m(y(40),y(41),y(42))*f2./cm(y(41));
f(42)=d2m(y(41),y(42),y(43))*f2./cm(y(42));
f(43)=d2m(y(42),y(43),y(44))*f2./cm(y(43));
f(44)=d2m(y(43),y(44),y(45))*f2./cm(y(44));
f(45)=d2m(y(44),y(45),y(46))*f2./cm(y(45));
f(46)=d2m(y(45),y(46),y(47))*f2./cm(y(46));
f(47)=d2m(y(46),y(47),y(48))*f2./cm(y(47));
f(48)=d2m(y(47),y(48),y(49))*f2./cm(y(48));
f(49)=d2m(y(48),y(49),y(50))*f2./cm(y(49));
f(50)=(y(49)-y(50)).*lamm((y(49)+y(50))/2)*f2./cm(y(50));
dy=f;
%-----

function d2=d2m(y1,y2,y3)
% друг. різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamm((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamm((y2+y3)/2);
%-----

function lam=lamm(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=54; % W/m/K
lam1=-3.33*1e-2; % W/m/K2
%-----
lam=lam0+lam1*(T-273);
%-----

function d2=d2t(y1,y2,y3)
% друг. різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamt((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamt((y2+y3)/2);
%-----

function lamd=lamt(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K
% захисного шару
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----

```

```

lam0=0.11; % W/m/K
lam1=0*1e-4; % W/m/K2
lam2=0*2e-6; % W/m/K3
%-----
lamd=lam0+lam1*(T-273)+lam2*(T-273).^2;
%-----

function cmm=cm(T)
% теплоємність, Дж/кг/К
% залежить від абсолютної температури "T", К
% cm0, cm1, cm2, cm3 - коефіцієнти ступеневої залежності cm(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global cm0, cm1, cm2, cm3;
%-----
cm0=425; % Дж/кг/К
cm1=0.773; % Дж/кг/К2
cm2=-1.69e-3; % Дж/кг/К3
cm3=2.22e-6; % Дж/кг/К4
%-----
cmm=cm0+cm1*(T-273)+cm2*(T-273).^2+cm3*(T-273).^3;
.....

function dy=eq_10_20_20wood_f(t,y)
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно товстому тілі
% температура Tff=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f)
% tt- time, с - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и сосни lammm и
% теплоємність сосни cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів з першого (захисного) прошарку, К
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів з другого (захищеного)
прошарку, К
%-----
% y31,y32,...,y49,y50 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищеного
прошарку, К
%-----
dy=zeros(50,1);
%----- global variables -----
global den1 cp1;
global den2;
global h1 h2 dx1 dx2;
global qrr;
global T0 alf;
%-----
f=zeros(50,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; % cpv1 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
f1=1/cpv1/dx1^2; % f1-характерн. коеф. ш. товщиною dx1 1-го прошарку, К*с2/kg/m
f2=1/den2/dx2^2; % f2-характерн. коеф. ш. товщиною dx2 2-го прошарку, m/kg
%-----
f(1)=1/cpv1/dx1*(TTf(t)+qrr/alf-y(1))./(1/alf+dx1/2./lamt(y(1)))...
-(y(1)-y(2)).*lamt((y(1)+y(2))/2)*f1;

```

```

f(2)=d2t(y(1),y(2),y(3))*f1;
f(3)=d2t(y(2),y(3),y(4))*f1;
f(4)=d2t(y(3),y(4),y(5))*f1;
f(5)=d2t(y(4),y(5),y(6))*f1;
f(6)=d2t(y(5),y(6),y(7))*f1;
f(7)=d2t(y(6),y(7),y(8))*f1;
f(8)=d2t(y(7),y(8),y(9))*f1;
f(9)=d2t(y(8),y(9),y(10))*f1;
f(10)=(y(9)-y(10)).*lamt((y(9)+y(10))/2)*f1...
-1/cpv1/dx1*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)));
f(11)=(1/den2/dx2*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)))...
-(y(11)-y(12)).*lamm((y(11)+y(12))/2)*f2)./cm(y(11));
f(12)=d2m(y(11),y(12),y(13))*f2./cm(y(12));
f(13)=d2m(y(12),y(13),y(14))*f2./cm(y(13));
f(14)=d2m(y(13),y(14),y(15))*f2./cm(y(14));
f(15)=d2m(y(14),y(15),y(16))*f2./cm(y(15));
f(16)=d2m(y(15),y(16),y(17))*f2./cm(y(16));
f(17)=d2m(y(16),y(17),y(18))*f2./cm(y(17));
f(18)=d2m(y(17),y(18),y(19))*f2./cm(y(18));
f(19)=d2m(y(18),y(19),y(20))*f2./cm(y(19));
f(20)=d2m(y(19),y(20),y(21))*f2./cm(y(20));
f(21)=d2m(y(20),y(21),y(22))*f2./cm(y(21));
f(22)=d2m(y(21),y(22),y(23))*f2./cm(y(22));
f(23)=d2m(y(22),y(23),y(24))*f2./cm(y(23));
f(24)=d2m(y(23),y(24),y(25))*f2./cm(y(24));
f(25)=d2m(y(24),y(25),y(26))*f2./cm(y(25));
f(26)=d2m(y(25),y(26),y(27))*f2./cm(y(26));
f(27)=d2m(y(26),y(27),y(28))*f2./cm(y(27));
f(28)=d2m(y(27),y(28),y(29))*f2./cm(y(28));
f(29)=d2m(y(28),y(29),y(30))*f2./cm(y(29));
f(30)=(y(29)-y(30)).*lamm((y(29)+y(30))/2)*f2./cm(y(30));
%-----
f(31)=(1/den2/dx2*(TTf(t)+qrr/alf-y(31))./(1/alf+dx2/2./lamm(y(31)))...
-(y(31)-y(32)).*lamm((y(31)+y(32))/2)*f2)./cm(y(31));
f(32)=d2m(y(31),y(32),y(33))*f2./cm(y(32));
f(33)=d2m(y(32),y(33),y(34))*f2./cm(y(33));
f(34)=d2m(y(33),y(34),y(35))*f2./cm(y(34));
f(35)=d2m(y(34),y(35),y(36))*f2./cm(y(35));
f(36)=d2m(y(35),y(36),y(37))*f2./cm(y(36));
f(37)=d2m(y(36),y(37),y(38))*f2./cm(y(37));
f(38)=d2m(y(37),y(38),y(39))*f2./cm(y(38));
f(39)=d2m(y(38),y(39),y(40))*f2./cm(y(39));
f(40)=d2m(y(39),y(40),y(41))*f2./cm(y(40));
f(41)=d2m(y(40),y(41),y(42))*f2./cm(y(41));
f(42)=d2m(y(41),y(42),y(43))*f2./cm(y(42));
f(43)=d2m(y(42),y(43),y(44))*f2./cm(y(43));
f(44)=d2m(y(43),y(44),y(45))*f2./cm(y(44));
f(45)=d2m(y(44),y(45),y(46))*f2./cm(y(45));
f(46)=d2m(y(45),y(46),y(47))*f2./cm(y(46));
f(47)=d2m(y(46),y(47),y(48))*f2./cm(y(47));
f(48)=d2m(y(47),y(48),y(49))*f2./cm(y(48));
f(49)=d2m(y(48),y(49),y(50))*f2./cm(y(49));

```

```
f(50)=(y(49)-y(50)).*lamm((y(49)+y(50))/2)*f2./cm(y(50));
dy=f;
%-----
```

```
function d2=d2m(y1,y2,y3)
% друг. різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamm((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamm((y2+y3)/2);
%-----
```

```
function lam=lamm(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K сосна
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=0.16; % W/m/K
lam1=0*(-3.33e-2); % W/m/K2
%-----
lam=lam0+lam1*(T-273);
%-----
```

```
function d2=d2t(y1,y2,y3)
% друг. різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamt((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamt((y2+y3)/2);
%-----
```

```
function lamd=lamt(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K неоспрей
% захисного шару
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=0.11; % W/m/K
lam1=0*1e-4; % W/m/K2
lam2=0*2e-6; % W/m/K3
%-----
lamd=lam0+lam1*(T-273)+lam2*(T-273).^2;
%-----
```

```
function cmm=cm(T)
% теплоємність, Дж/кг/К сосна
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% cm0, cm1, cm2, cm3 - коефіцієнти ступеневої залежності cm(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global cm0, cm1, cm2, cm3;
```

```

%-----
cm0=2.72e3; % Дж/кг/К
cm1=0*0.773; % Дж/кг/К2
cm2=-1.69e-3*0; % Дж/кг/К3
cm3=2.22e-6*0; % Дж/кг/К4
%-----
cmm=cm0+cm1*(T-273)+cm2*(T-273).^2+cm3*(T-273).^3;
.....

function Go_eq_10_20_20metal_f
% solution of eq_10_20_20metal_f
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно тонкому тілі
% температура Tff=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и метала lamm и
% теплоємність метала cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів з першого (захитного) прошарку, К
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів з другого (захищаємого)
% прошарку, К
%-----
% y31,y32,...,y49,y50 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищаємого
% прошарку, К
%----- global variables -----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 den2;
den1=490; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг К)
%-----
% параметри захищаємого тіла
den2=7850; % густина стали, kg/m3
%-----
global h1 h2 dx1 dx2;
h1=1.0e-2; % h1-товщина 1-го прошарку, m
n1=10; %n1- кількість шарів розбит.1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина ш. розбит. 1-го прошарку, m
h2=0.5e-1; % h2-половина товщини стальної пластини, m
n2=20; %n2- кількість шарів розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина ш. розбит. 2-го прошарку, m
%-----
global qrr;% фоновий рівень променистого питомого теплового потоку, Вт/м2
qrr=0*1e3;
%-----
global Tf_max Tf0 tau_f;
Tf_max=950+273; % Tf_max - максимальн. абсолютн. температура джерела, К
Tf0=20+273;% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, К
tau_f=10; % tau_f - характерний час розігріву джерела, c
% Tff(t)=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f);
%-----
global T0 alf;
T0=273+20; %T0 - початк. температура, К
alf=25; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
y1=T0; y2=T0; y3=T0; y4=T0; y5=T0; y6=T0; y7=T0; y8=T0; y9=T0; y10=T0;

```

```

y11=T0; y12=T0; y13=T0; y14=T0; y15=T0; y16=T0; y17=T0; y18=T0; y19=T0; y20=T0;
y21=T0; y22=T0; y23=T0; y24=T0; y25=T0; y26=T0; y27=T0; y28=T0; y29=T0; y30=T0;
y31=T0; y32=T0; y33=T0; y34=T0; y35=T0; y36=T0; y37=T0; y38=T0; y39=T0; y40=T0;
y41=T0; y42=T0; y43=T0; y44=T0; y45=T0; y46=T0; y47=T0; y48=T0; y49=T0; y50=T0;
time_f=7000; % time process, c
%----- Numerical solution -----
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[T,Y]=ode15s('eq_10_20_20metal_f',[0 time_f],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10...
        y11 y12 y13 y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20...
        y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
        y31 y32 y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40...
        y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49 y50],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,Tff(T)-273,T,Y(:,1)-273,T,(Y(:,10)+Y(:,11))/2-273,T,Y(:,30)-273,...
        T,Y(:,31)-273,T,Y(:,50)-273)
        legend('t_f','t_s','t_{*s}','t_{*m}','t_{*s free}','t_{*m free}');
xlabel('\tau, c');
ylabel('t^oC');
title('Захист металевої конструкції')
grid on;

```

```

function Go_eq_10_20_20woode_f
% solution of eq_10_20_20wood_f
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно товстому тілі
% температура Tff=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f)
% tt- time, c - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и сосни lamn и
% теплоємність сосни cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів з першого (захисного) прошарку, K
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів из другого (захищеного)
прошарку, K
%-----
% y31,y32,...,y49,y50 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищеного
прошарку, K
%----- global variables -----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 den2;
den1=490; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг K)
%-----
% параметри захищеного тіла
den2=550; % густина сосни, kg/m3
%-----
global h1 h2 dx1 dx2;
h1=1.0e-2; % h1-товщина 1-го прошарку, m
n1=10; %n1- кількість шарів розбит.1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина ш. розбит. 1-го прошарку, m
h2=1.0e-1; % h2-половина товщини соснової балки, m
n2=20; %n2- кількість шарів розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина ш. розбит. 2-го прошарку, m

```



```

%-----
global qrr;% фоновий рівень променистого питомого теплового потоку, Вт/м2
qrr=0*1e3;
%-----
global Tf_max Tf0 tau_f;
Tf_max=950+273;% Tf_max - максимальн. абсолютн. температура джерела, К
Tf0=20+273;% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, К
tau_f=10;% tau_f - характерний час розігріву джерела, с
% Tff(t)=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f);
%-----
global T0 alf;
T0=273+20;% T0 - початк. температура, К
alf=10;% коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
y1=T0; y2=T0; y3=T0; y4=T0; y5=T0; y6=T0; y7=T0; y8=T0; y9=T0; y10=T0;
y11=T0; y12=T0; y13=T0; y14=T0; y15=T0; y16=T0; y17=T0; y18=T0; y19=T0; y20=T0;
y21=T0; y22=T0; y23=T0; y24=T0; y25=T0; y26=T0; y27=T0; y28=T0; y29=T0; y30=T0;
y31=T0; y32=T0; y33=T0; y34=T0; y35=T0; y36=T0; y37=T0; y38=T0; y39=T0; y40=T0;
y41=T0; y42=T0; y43=T0; y44=T0; y45=T0; y46=T0; y47=T0; y48=T0; y49=T0; y50=T0;
time_f=900;% time process, с
%----- Numerical solution -----
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[T,Y]=ode15s('eq_10_20_wood_f',[0 time_f],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10...
y11 y12 y13 y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20...
y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
y31 y32 y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40...
y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49 y50],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,TTf(T)-273,T,Y(:,1)-273,T,(Y(:,10)+Y(:,11))/2-273,T,Y(:,31)-273)
    legend('t_f','t_s','t_{*s}','t_{*s free}');
xlabel('\tau, c');
ylabel('t^oC');
title('Захист соснової балки')
grid on;
.....

function Tff=TTf(t)
% температура джерела тепла Tf, К,
% в залежності від часу t, с
global Tf_max Tf0 tau_f;
% Tf_max - максимальн. абсолютн. температура джерела, К
% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, К
% tau_f - характерний час розігріву джерела, с
%-----
Tff=Tf_max-(Tf_max-Tf0)*exp(-t/tau_f);
.....

```

Додаток Є

Комп'ютерна програма розрахунку температури поверхні тіла, що захищене поглинаючим покриттям, при зростанні температури середовища за формулою стандартної пожежі

1) Наведені нижче файли розміщуються у одній папці, яку поміщають у папку «work» середовища Matlab.

2) В залежності від характеру підзахисного тіла вибирається файл «Go***.m». В його текст вводяться чисельні значення всіх параметрів покриття підзахисного тіла. Далі цей файл запускається на виконання. В результаті програма почне обраховуватися і видасть результат (графіки залежностей температур від часу теплового впливу).

Різним варіантам підзахисних тіл відповідають наступні файли:

1) термічно тонке тіло - «Go_eq_10_20_20metal_st.m»;

2) термічно товсте тіло – «Go_eq_10_20_20beton_st.m»;

```

.....
function d22=d2(y1,y2,y3)
% друга різниц. у
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d22=y1+y3-2*y2;
.....

function dy=eq_10_20_20beton_st(t,y)
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно товстому тілі
% температура стандартної пожежі
% tt- time, c - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и бетона lamм и
% теплоємність бетона cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів из першого (защитного) прошарку, К
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів из другого (захищаємого)
% прошарку, К
%-----
% y31,y32,...,y49,y50 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищаємого
% прошарку, К
%-----
dy=zeros(50,1);
%----- global variables -----

```

```

global den1 cp1;
global den2;
global h1 h2 dx1 dx2;
global qrr;
global T0 alf;
%-----
f=zeros(50,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; % cpv1 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
f1=1/cpv1/dx1^2; % f1-характерн. коеф. ш. товщиною dx1 1-го прошарку, К*с2/kg/m
f2=1/den2/dx2^2; % f2-характерн. коеф. ш. товщиною dx2 2-го прошарку, м/kg
%-----
f(1)=1/cpv1/dx1*(T_stan(t)+qrr/alf-y(1))./(1/alf+dx1/2./lamt(y(1)))...
-(y(1)-y(2)).*lamt((y(1)+y(2))/2)*f1;
f(2)=d2t(y(1),y(2),y(3))*f1;
f(3)=d2t(y(2),y(3),y(4))*f1;
f(4)=d2t(y(3),y(4),y(5))*f1;
f(5)=d2t(y(4),y(5),y(6))*f1;
f(6)=d2t(y(5),y(6),y(7))*f1;
f(7)=d2t(y(6),y(7),y(8))*f1;
f(8)=d2t(y(7),y(8),y(9))*f1;
f(9)=d2t(y(8),y(9),y(10))*f1;
f(10)=(y(9)-y(10)).*lamt((y(9)+y(10))/2)*f1...
-1/cpv1/dx1*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)));
f(11)=(1/den2/dx2*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)))...
-(y(11)-y(12)).*lamm((y(11)+y(12))/2)*f2)./cm(y(11));
f(12)=d2m(y(11),y(12),y(13))*f2./cm(y(12));
f(13)=d2m(y(12),y(13),y(14))*f2./cm(y(13));
f(14)=d2m(y(13),y(14),y(15))*f2./cm(y(14));
f(15)=d2m(y(14),y(15),y(16))*f2./cm(y(15));
f(16)=d2m(y(15),y(16),y(17))*f2./cm(y(16));
f(17)=d2m(y(16),y(17),y(18))*f2./cm(y(17));
f(18)=d2m(y(17),y(18),y(19))*f2./cm(y(18));
f(19)=d2m(y(18),y(19),y(20))*f2./cm(y(19));
f(20)=d2m(y(19),y(20),y(21))*f2./cm(y(20));
f(21)=d2m(y(20),y(21),y(22))*f2./cm(y(21));
f(22)=d2m(y(21),y(22),y(23))*f2./cm(y(22));
f(23)=d2m(y(22),y(23),y(24))*f2./cm(y(23));
f(24)=d2m(y(23),y(24),y(25))*f2./cm(y(24));
f(25)=d2m(y(24),y(25),y(26))*f2./cm(y(25));
f(26)=d2m(y(25),y(26),y(27))*f2./cm(y(26));
f(27)=d2m(y(26),y(27),y(28))*f2./cm(y(27));
f(28)=d2m(y(27),y(28),y(29))*f2./cm(y(28));
f(29)=d2m(y(28),y(29),y(30))*f2./cm(y(29));
f(30)=(y(29)-y(30)).*lamm((y(29)+y(30))/2)*f2./cm(y(30));
%-----
f(31)=(1/den2/dx2*(T_stan(t)+qrr/alf-y(31))./(1/alf+dx2/2./lamm(y(31)))...
-(y(31)-y(32)).*lamm((y(31)+y(32))/2)*f2)./cm(y(31));
f(32)=d2m(y(31),y(32),y(33))*f2./cm(y(32));
f(33)=d2m(y(32),y(33),y(34))*f2./cm(y(33));
f(34)=d2m(y(33),y(34),y(35))*f2./cm(y(34));

```

```

f(35)=d2m(y(34),y(35),y(36))*f2./cm(y(35));
f(36)=d2m(y(35),y(36),y(37))*f2./cm(y(36));
f(37)=d2m(y(36),y(37),y(38))*f2./cm(y(37));
f(38)=d2m(y(37),y(38),y(39))*f2./cm(y(38));
f(39)=d2m(y(38),y(39),y(40))*f2./cm(y(39));
f(40)=d2m(y(39),y(40),y(41))*f2./cm(y(40));
f(41)=d2m(y(40),y(41),y(42))*f2./cm(y(41));
f(42)=d2m(y(41),y(42),y(43))*f2./cm(y(42));
f(43)=d2m(y(42),y(43),y(44))*f2./cm(y(43));
f(44)=d2m(y(43),y(44),y(45))*f2./cm(y(44));
f(45)=d2m(y(44),y(45),y(46))*f2./cm(y(45));
f(46)=d2m(y(45),y(46),y(47))*f2./cm(y(46));
f(47)=d2m(y(46),y(47),y(48))*f2./cm(y(47));
f(48)=d2m(y(47),y(48),y(49))*f2./cm(y(48));
f(49)=d2m(y(48),y(49),y(50))*f2./cm(y(49));
f(50)=(y(49)-y(50)).*lamm((y(49)+y(50))/2)*f2./cm(y(50));
dy=f;
%-----

function d2=d2m(y1,y2,y3)
% друга різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamm((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamm((y2+y3)/2);
%-----

function lam=lamm(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=1.05; % W/m/K
lam1=-5.8e-4; % W/m/K2
%-----
lam=lam0+lam1*(T-273);
%-----

function d2=d2t(y1,y2,y3)
% друга різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamt((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamt((y2+y3)/2);
%-----

function lamd=lamt(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K
% захисного шару
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)

```

```

% від температури по Цельсию t, C
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=0.11; % W/m/K
lam1=0*1e-4; % W/m/K2
lam2=0*2e-6; % W/m/K3
%-----
lamd=lam0+lam1*(T-273)+lam2*(T-273).^2;
%-----

function cmm=cm(T)
% теплоємність, Дж/кг/К
% залежить від абсолютної температури "T", К
% cm0, cm1, cm2, cm3 - коефіцієнти ступеневої залежності cm(t)
% від температури по Цельсию t, C
%global cm0, cm1, cm2, cm3;
%-----
cm0=770; % Дж/кг/К
cm1=0.63; % Дж/кг/К2
cm2=-1.69e-3*0; % Дж/кг/К3
cm3=0*2.22e-6; % Дж/кг/К4
%-----
cmm=cm0+cm1*(T-273)+cm2*(T-273).^2+cm3*(T-273).^3;
.....

function dy=eq_10_20_20metal_st(t,y)
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно тонкому тілі
% температура стандартної пожежі
% tt- time, c - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и метала lamtm и
% теплоємність метала cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів из першого (защитного) прошарку, К
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів из другого (захищаємого)
% прошарку, К
%-----
% y31,y32,...,y49,y50 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищаємого
% прошарку, К
%-----
dy=zeros(50,1);
%----- global variables -----
global den1 cp1;
global den2;
global h1 h2 dx1 dx2;
global qrr;
global T0 alf;
%-----
f=zeros(50,1);
%-----
cpv1=den1*cp1; % cpv1 - питом. ізобарн. об'ємна. теплоємність матеріалу 1-го прошарку,
Дж/(м3 К)
f1=1/cpv1/dx1^2; % f1-характерн. коеф. ш. товщиною dx1 1-го прошарку, К*с2/kg/m
f2=1/den2/dx2^2; % f2-характерн. коеф. ш. товщиною dx2 2-го прошарку, m/kg

```

```

%-----
%-----
f(1)=1/cpv1/dx1*(T_stan(t)+qrr/alf-y(1))./(1/alf+dx1/2./lamt(y(1)))...
    -(y(1)-y(2)).*lamt((y(1)+y(2))/2)*f1;
f(2)=d2t(y(1),y(2),y(3))*f1;
f(3)=d2t(y(2),y(3),y(4))*f1;
f(4)=d2t(y(3),y(4),y(5))*f1;
f(5)=d2t(y(4),y(5),y(6))*f1;
f(6)=d2t(y(5),y(6),y(7))*f1;
f(7)=d2t(y(6),y(7),y(8))*f1;
f(8)=d2t(y(7),y(8),y(9))*f1;
f(9)=d2t(y(8),y(9),y(10))*f1;
f(10)=(y(9)-y(10)).*lamt((y(9)+y(10))/2)*f1...
    -1/cpv1/dx1*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)));
f(11)=(1/den2/dx2*(y(10)-y(11))./(dx1/2./lamt(y(10))+dx2/2./lamm(y(11)))...
    -(y(11)-y(12)).*lamm((y(11)+y(12))/2)*f2)./cm(y(11));
f(12)=d2m(y(11),y(12),y(13))*f2./cm(y(12));
f(13)=d2m(y(12),y(13),y(14))*f2./cm(y(13));
f(14)=d2m(y(13),y(14),y(15))*f2./cm(y(14));
f(15)=d2m(y(14),y(15),y(16))*f2./cm(y(15));
f(16)=d2m(y(15),y(16),y(17))*f2./cm(y(16));
f(17)=d2m(y(16),y(17),y(18))*f2./cm(y(17));
f(18)=d2m(y(17),y(18),y(19))*f2./cm(y(18));
f(19)=d2m(y(18),y(19),y(20))*f2./cm(y(19));
f(20)=d2m(y(19),y(20),y(21))*f2./cm(y(20));
f(21)=d2m(y(20),y(21),y(22))*f2./cm(y(21));
f(22)=d2m(y(21),y(22),y(23))*f2./cm(y(22));
f(23)=d2m(y(22),y(23),y(24))*f2./cm(y(23));
f(24)=d2m(y(23),y(24),y(25))*f2./cm(y(24));
f(25)=d2m(y(24),y(25),y(26))*f2./cm(y(25));
f(26)=d2m(y(25),y(26),y(27))*f2./cm(y(26));
f(27)=d2m(y(26),y(27),y(28))*f2./cm(y(27));
f(28)=d2m(y(27),y(28),y(29))*f2./cm(y(28));
f(29)=d2m(y(28),y(29),y(30))*f2./cm(y(29));
f(30)=(y(29)-y(30)).*lamm((y(29)+y(30))/2)*f2./cm(y(30));
%-----
f(31)=(1/den2/dx2*(T_stan(t)+qrr/alf-y(31))./(1/alf+dx2/2./lamm(y(31)))...
    -(y(31)-y(32)).*lamm((y(31)+y(32))/2)*f2)./cm(y(31));
f(32)=d2m(y(31),y(32),y(33))*f2./cm(y(32));
f(33)=d2m(y(32),y(33),y(34))*f2./cm(y(33));
f(34)=d2m(y(33),y(34),y(35))*f2./cm(y(34));
f(35)=d2m(y(34),y(35),y(36))*f2./cm(y(35));
f(36)=d2m(y(35),y(36),y(37))*f2./cm(y(36));
f(37)=d2m(y(36),y(37),y(38))*f2./cm(y(37));
f(38)=d2m(y(37),y(38),y(39))*f2./cm(y(38));
f(39)=d2m(y(38),y(39),y(40))*f2./cm(y(39));
f(40)=d2m(y(39),y(40),y(41))*f2./cm(y(40));
f(41)=d2m(y(40),y(41),y(42))*f2./cm(y(41));
f(42)=d2m(y(41),y(42),y(43))*f2./cm(y(42));
f(43)=d2m(y(42),y(43),y(44))*f2./cm(y(43));
f(44)=d2m(y(43),y(44),y(45))*f2./cm(y(44));
f(45)=d2m(y(44),y(45),y(46))*f2./cm(y(45));

```

```

f(46)=d2m(y(45),y(46),y(47))*f2./cm(y(46));
f(47)=d2m(y(46),y(47),y(48))*f2./cm(y(47));
f(48)=d2m(y(47),y(48),y(49))*f2./cm(y(48));
f(49)=d2m(y(48),y(49),y(50))*f2./cm(y(49));
f(50)=(y(49)-y(50)).*lamm((y(49)+y(50))/2)*f2./cm(y(50));
%-----
dy=f;
%-----

function d2=d2m(y1,y2,y3)
% друга різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamm((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamm((y2+y3)/2);
%-----

function lam=lamm(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=54; % W/m/K
lam1=-3.33*1e-2; % W/m/K2
%-----
lam=lam0+lam1*(T-273);
%-----

function d2=d2t(y1,y2,y3)
% друга різниц. у з коефіцієнтом, котрий залежить від "у"
% y1,y2,y3- послідовні значен. змінної "у"
%-----
d2=(y1-y2).*lamt((y1+y2)/2)-(y2-y3).*lamt((y2+y3)/2);
%-----

function lamd=lamt(T)
% коеф.теплопровідності, W/m/K
% захисного шару
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% lam0, lam1, lam2 - коефіцієнти ступеневої залежності lam(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global lam0, lam1, lam2;
%-----
lam0=0.11; % W/m/K
lam1=0*1e-4; % W/m/K2
lam2=0*2e-6; % W/m/K3
%-----
lamd=lam0+lam1*(T-273)+lam2*(T-273).^2;
%-----

function cmm=cm(T)

```

```

% теплоємність, Дж/кг/К
% залежить від абсолютної температури "Т", К
% cm0, cm1, cm2, cm3 - коефіцієнти ступеневої залежності cm(t)
% від температури по Цельсию t, С
%global cm0, cm1, cm2, cm3;
%-----
cm0=425; % Дж/кг/К
cm1=0.773; % Дж/кг/К2
cm2=-1.69e-3; % Дж/кг/К3
cm3=2.22e-6; % Дж/кг/К4
%-----
cmm=cm0+cm1*(Т-273)+cm2*(Т-273).^2+cm3*(Т-273).^3;
.....

function Go_eq_10_20_20beton_st
% solution of eq_10_20_20beton_st
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно товстому тілі
% температура стандартної пожежі
% tt- time, с - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и бетона lamm и
% теплоємність бетона cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів из першого (защитного) прошарку, К
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів из другого (защищаемого)
% прошарку, К
%-----
% y31,y32,...,y49,y350 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищаємого
% прошарку, К
%----- global variables -----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 den2;
den1=490; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг К)
%-----
% параметри захищаємого тіла
den2=1900; % густина бетона, kg/m3
%-----
global h1 h2 dx1 dx2;
h1=2.0e-2; % h1-товщина 1-го прошарку, m
n1=10; %n1- кількість шарів розбит.1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина ш. розбит. 1-го прошарку, m
h2=2.0e-1; % h2-половина товщини сталъной пластини, m
n2=20; %n2- кількість шарів розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина ш. розбит. 2-го прошарку, m
%-----
global qrr;% фоновий рівень променистого питомого теплового потоку, Вт/м2
qrr=0*1e3;
%-----
global Tf0;
Tf0=273+20;% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, К
% TT=Tf0+345*log10(8/60*t+1);
%-----
global T0 alf;

```



```

T0=273+20; %T0 - початкова температура, K
alf=25; % коефіцієнт тепловіддачі, W/(m2*K)
y1=T0; y2=T0; y3=T0; y4=T0; y5=T0; y6=T0; y7=T0; y8=T0; y9=T0; y10=T0; y11=T0; y12=T0;
y13=T0; y14=T0; y15=T0; y16=T0; y17=T0; y18=T0; y19=T0; y20=T0; y21=T0; y22=T0;
y23=T0; y24=T0; y25=T0; y26=T0; y27=T0; y28=T0; y29=T0; y30=T0; y31=T0; y32=T0;
y33=T0; y34=T0; y35=T0; y36=T0; y37=T0; y38=T0; y39=T0; y40=T0; y41=T0; y42=T0;
y43=T0; y44=T0; y45=T0; y46=T0; y47=T0; y48=T0; y49=T0; y50=T0;
time_f=4500; % time process, c
%----- Numerical solution -----
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точності
[T,Y]=ode15s('eq_10_20_20beton_st',[0 time_f],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10...
        y11 y12 y13 y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20...
        y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
        y31 y32 y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40...
        y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49 y50],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,T_stan(T)-273,T,Y(:,1)-273,T,(Y(:,10)+Y(:,11))/2-273,T,Y(:,31)-273)
    legend('t_{f.st}','t_s','t_{*s}','t_{*s free}');
axis([0,time_f,0,900]);
xlabel('\tau, c');
ylabel('t^oC');
title('Захист бетонної плити')
grid on;
.....

function Go_eq_10_20_20metal_st
% solution of eq_10_20_20metal_st
% захисний поглинаючий екран з двох боків на термічно тонкому тілі
% температура стандартної пожежі
% tt- time, c - незалежний аргумент
% теплопровідності захисту lamt и метала lamm и
% теплоємність метала cm залежить від температури
%-----
% y1,y2,...,y9,y10 - температури 1-го,2-го,...,10-го шарів из першого (защитного) прошарку, K
% y11,y12,...,y29,y30 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів из другого (захищаємого)
% прошарку, K
%-----
% y31,y32,...,y49,y350 - температури 1-го,2-го,...,20-го шарів другого не захищаємого
% прошарку, K
%----- global variables -----
% параметри екранної задачі
global den1 cp1 den2;
den1=490; % густина матеріалу 1-го прошарку, кг/м3
cp1=1.0e3; % теплоємність матеріалу 1-го прошарку, Дж/(кг K)
%-----
% параметри захищаємого тіла
den2=7850; % густина стали, kg/m3
%-----
global h1 h2 dx1 dx2;
h1=35.5e-3; % h1-товщина 1-го прошарку, m
n1=10; %n1- кількість шарів розбит.1-го прошарку
dx1=h1/n1; %ширина ш. розбит. 1-го прошарку, m

```

```

h2=5.37e-3; % h2-половина товщини сталюї пластини, m
n2=20; %n2- кiлькiсть шарiв розбит. 2-го прошарку
dx2=h2/n2; %ширина ш. розбит. 2-го прошарку, m
%-----
global qrr;% фоновий рiвень променистого питомого теплового потоку, Вт/м2
qrr=0*1e3;
%-----
global Tf0;
Tf0=273+20;% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, К
% TT=Tf0+345*log10(8/60*t+1);
%-----
global T0 alf;
T0=273+20; %T0 - початк. температура, К
alf=25; % коефiцiєнт тепловiддачi, W/(m2*K)
y1=T0; y2=T0; y3=T0; y4=T0; y5=T0; y6=T0; y7=T0; y8=T0; y9=T0; y10=T0;
y11=T0; y12=T0; y13=T0; y14=T0; y15=T0; y16=T0; y17=T0; y18=T0; y19=T0; y20=T0;
y21=T0; y22=T0; y23=T0; y24=T0; y25=T0; y26=T0; y27=T0; y28=T0; y29=T0; y30=T0;
y31=T0; y32=T0; y33=T0; y34=T0; y35=T0; y36=T0; y37=T0; y38=T0; y39=T0; y40=T0;
y41=T0; y42=T0; y43=T0; y44=T0; y45=T0; y46=T0; y47=T0; y48=T0; y49=T0; y50=T0;
%-----
time_f=10000; % time process, c
%----- Numerical solution -----
options=odeset('RelTol',1.0e-3,'AbsTol',1.0e-6);%задан. точностi
[T,Y]=ode15s('eq_10_20_20metal_st',[0 time_f],[y1 y2 y3 y4 y5 y6 y7 y8 y9 y10...
            y11 y12 y13 y14 y15 y16 y17 y18 y19 y20...
            y21 y22 y23 y24 y25 y26 y27 y28 y29 y30...
            y31 y32 y33 y34 y35 y36 y37 y38 y39 y40...
            y41 y42 y43 y44 y45 y46 y47 y48 y49 y50],options);
%----- graph plotting -----
figure;
plot(T,T_stan(T)-273,T,Y(:,1)-273,T,(Y(:,10)+Y(:,11))/2-273,T,Y(:,31)-273)
    legend('t_{f.st}','t_s','t_{*s}','t_{*s free}');
axis([0,time_f,0,1100]);
xlabel('\tau, c');
ylabel('t^oC');
title('Захист сталевої конструкції')
grid on;
.....

function TT=T_stan(t)
% стандартний температурний режим
% температура джерела тепла T_stan, C,
% в залежності від часу t, c
global Tf0;
% Tf0 - початк. абсолютн. температура джерела, C
%-----
TT=Tf0+345*log10(8/60*t+1);
.....

```

Додаток Ж
Акти впровадження

Копія

Приватне підприємство
«НПП «Спецпожтехніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор

М. Харків

підпис, печатка

Володимир СТІЛЕЦЬ

" 22 " _____ січня _____ 2020 р.

Акт
про використання наукових результатів, отриманих
у дисертаційній роботі Шаршанова А.Я.

Комісія у складі: консультанта ПП «НПП «Спецпожтехніка» д.т.н., доцента Росохи Сергія Володимировича (голова комісії), директора лабораторії Ткачова Андрія Федоровича, фахівця Гіля В'ячеслава Федоровича склала даний акт, про те, що наукові результати, отримані у дисертаційній роботі Шаршанова А.Я., а саме:

- алгоритм, щодо визначення параметрів поглинаючого вогнезахисного покриття, нанесеного на металеву конструкцію, яке забезпечує заданий час вогнезахисту, і містить визначення залежності температури захищеної конструкції від часу при впливі на неї зовнішнім тепловим потоком;

- математична модель процесу нагрівання захищеної конструкції і комп'ютерна програма, що реалізує дану модель,

використані на ПП «НПП «Спецпожтехніка» при проведенні прогнозування основних параметрів і характеристик захисного покриття, що забезпечать заданий рівень захисту.

Використання результатів дисертаційних досліджень Шаршанова А.Я. привело до автоматизації процесу підбору необхідної товщини захисного

покриття, що дозволило зменшити час цієї операції у 4 рази у порівнянні з існуючими методами оцінок.

Голова комісії консультант ПП «НПП «Спецпожтехніка» д.т.н., доцент	підпис	Сергій РОСОХА

Члени комісії директор лабораторії ПП «НПП «Спецпожтехніка»	підпис	Андрій ТКАЧОВ

фахівець ПП «НПП «Спецпожтехніка»	підпис	В'ячеслав ГІЛЬ

Копія вірна Учений секретар НУЦЗУ		Андрій ПОБІДАШ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Черкаського
міськрайонного відділу
Управління ДСНС України
у Черкаській області

підпис, печатка Андрій ХИЖНЯК

"15" січня 2019 р.

АКТ

про використання наукових результатів, отриманих
у дисертаційній роботі Шаршанова А.Я.

Комісія у складі: заступника начальника Черкаського міськрайонного відділу Управління ДСНС України у Черкаській області Шкабрата Ю.О. та головного інспектора Черкаського міськрайонного відділу Управління ДСНС України у Черкаській області Ярошенка О.Ю. склала даний акт про те, що наукові результати отримані в дисертаційній роботі Шаршанова А.Я., а саме:

- алгоритм, щодо визначення часу вогнезахисту металевої конструкції нанесеним на неї поглинаючим вогнезахисним покриттям заданої товщини, який містить визначення залежності температури захищеної конструкції від часу при впливі на неї зовнішнім тепловим потоком;

- математична модель процесу нагрівання захищеної конструкції і комп'ютерна програма, що реалізує дану модель,

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.

Використання результатів дисертаційних досліджень Шаршанова А.Я. привело до скорочення часу оцінювання межі вогнестійкості захищеної конструкції у 4 рази у порівнянні з існуючими методами оцінок.

Голова комісії

підпис

Юрій ШКАБРАТ

Член комісії

підпис

Олександр ЯРОВЕНКО

Копія вірна

Учений секретар НУЦЗУ

Андрій ПОБІДАШ

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з навчальної та методичної
роботи НУЦЗ України,
кандидат психологічних наук, професор

підпис, печатка _____ Олег НАЗАРОВ

„11” _____ грудня _____ 2019 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» А.Я. Шарпанова

Комісія у складі:

голова комісії – начальник кафедри спеціальної хімії та хімічної технології,
к.т.н., доцент Тарахно О.В.,

члени комісії:

– професор кафедри спеціальної хімії та хімічної технології, д.т.н., доцент
Кіреєв О.О.,

– доцент кафедри спеціальної хімії та хімічної технології, к.т.н., доцент
Трегубов Д.Г.,

склала цей акт про те, що результати науково-дослідної дисертаційної роботи, а саме:

- залежність інтенсивності опромінювання об’єктів факелом ландшафтної пожежі від відстані до нього;
- залежність результуючого променистого теплового потоку, що падає на поверхню тіла, яке захищено одношаровим відбиваючим екраном, від часу теплового впливу;
- залежність температури поверхні масивного тіла, захищеного теплопровідним поглинаючим покриттям, від часу теплового впливу;
- залежність температури поверхні термічно тонкого тіла (металевої конструкції), захищеного теплопровідним поглинаючим покриттям, від часу теплового впливу;
- залежність критичної (щодо спалаху пари горючої рідини) товщини ізолюючого гранульованого покриття від температури системи;

впроваджені в навчальний процес Національного університету цивільного захисту України при вивченні дисциплін:

«Термодинаміка і теплопередача» у розділах «Променистий теплообмін. (Теплові екрани. Визначення безпечних відстаней за теплообміну випромінюванням)», «Нестаціонарна теплопровідність. (Нагрівання тіл за малих критеріях Біо. Нестаціонарна теплопровідність у напівобмеженому тілі)»;

«Моделювання процесів горіння» у розділі «Горіння рідин».

Це дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання аспектів взаємозв'язку означених дисциплін з майбутньою професією слухачів.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із фондів Національного університету цивільного захисту України.

Голова комісії:	підпис	Олена ТАРАХНО

Члени комісії:	підпис	Олександр КІРЄЄВ

	підпис	Дмитро ТРЕГУБОВ

Копія вірна
Учений секретар НУЦЗУ

Андрій ПОБІДАШ