

9. Rezakazemi M., Ghafarinazari A., Shirazian S. and Khoshshima A. Numerical modeling and optimization of wastewater treatment using porous polymeric membranes. *Polymer Engineering & Science*. No. 53 (6), 2012, pp. 1272–1278. URL: <https://doi.org/10.1002/pen.23375>.

10. Viccione G. and Evangelista S. Experimental and numerical analysis of the hydraulic performance of filtering cartridges for water treatment. *EPiC Series in Engineering*. Vol. 3, 2018, pp. 2187–2195. URL: <https://doi.org/10.29007/b26c>.

Надійшла до редакції: 11.07.2022.

УДК 699.81:614.84:536.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.20.873

ДО ПИТАННЯ ЗНИЖЕННЯ ГОРЮЧОСТІ ТА ПІДВИЩЕННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КОВАЛЕНКО О. В.², *докт. економ. наук, проф.*,
КЛИМЕНКО Г. О.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ХАРЧЕНКО В. В.⁴

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: belikov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682;

² Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, вул. Січеславська Набережна, 17, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: dniprondise@ukr.net

^{3*} Кафедра безпеки життєдіяльності. Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: klimenko.anna@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144;

⁴ Дніпропетровський науково-дослідний інститут судових експертиз Міністерства юстиції України, вул. Січеславська Набережна, 17, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: dniprondise@ukr.net

Анотація. Постановка проблеми. Виходячи з концепції пожежної безпеки в державній програмі України, проблема зниження горючості матеріалів і підвищення вогнестійкості конструкцій виділена в один із пріоритетних наукових напрямів фундаментальних та прикладних досліджень. У ній передбачено виконання робіт, спрямованих на забезпечення протипожежного захисту, розроблення вогнезахисних засобів, що знижують горючість матеріалів і підвищують вогнестійкість будівельних конструкцій, розроблення та вдосконалення методів визначення пожежної небезпеки матеріалів. **Мета дослідження** – підвищення вогнестійкості металевих конструкцій за рахунок використання вогнезахисних спучуваних покриттів, розроблення нових підходів, критеріїв та методів оцінювання вогнестійкості та підвищення вогнестійкості сучасних металевих конструкцій. **Висновки.** В результаті аналітичних досліджень отримано математичні моделі, що дозволяють прогнозувати вогнестійкість та підвищення вогнестійкості металевих конструкцій залежно від товщини покриття, наведеної товщини металу та виду вогнезахисної композиції. Розроблено інженерну методику оцінювання вогнестійкості та підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій.

Ключові слова: пожежна безпека; вогнестійкість будівельних конструкцій; вогнезахисні покриття

TO THE ISSUE OF THE FLAMMABILITY REDUCING AND THE FIRE RESISTANCE INCREASING OF METAL STRUCTURES

BELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOVALENKO O.V.², *Dr. Sc. (Economy), Prof.*,
KLYMENKO G.O.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
HARCHENKO V.V.⁴

¹ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: belikov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Dnipropetrovsk Scientific Research Institute of Forensic Sciences, 17, Str. Sicheslavs'ka Naberejna, Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: dniprondise@ukr.net

^{3*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: klimenko.anna@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

⁴ Dnipropetrovsk Scientific Research Institute of Forensic Sciences, 17, Str. Sicheslavs'ka Naberejna, Dnipro, 49000, Ukraine, e-mail: dniprondis@ukr.net

Abstract. Problem statement. Based on the fire safety concept in the state program of Ukraine, the issue of flammability reducing for materials and fire resistance increasing for structures is selected as one of the priority scientific areas in fundamental and applied research. It provides for the implementation of works aimed at ensuring fire protection, the development of fire protection products that reduce the flammability of materials and increase the fire resistance of building structures, the development and improvement of methods for determining the fire hazard of materials. **The purpose of the article.** Increasing the fire resistance of metal structures due to the use of fire-resistant intumescent coatings, developing new approaches, criteria and methods for assessing fire resistance and increasing the fire resistance of modern metal structures. **Conclusions.** As a result of the analytical studies, mathematical models were obtained that allow predicting the fire resistance and increasing the fire resistance for metal structures depending on the thickness of the coating, the given thickness of the metal and the type of fire retardant composition. An engineering methodology for assessing fire resistance and increasing the fire resistance of steel structures was developed.

Keywords: *fire safety; fire resistance of building structures; fire-resistant coatings*

Актуальність. Відомо, що в Україні щорічно виникає понад 50 тис. пожеж, у яких гинуть люди, а матеріальна шкода перевищує 20 млн грн, побічні збитки в 20 разів більші. Значною мірою така тривожна статистика зумовлена збільшенням пожежної небезпеки будівель і споруд, що зводяться та експлуатуються, за рахунок зміни технології виробництва, підвищення поверховості та щільності забудови, зміни традиційних і матеріалоємних технологій зведення будівель на нові прогресивні технології з ефективними будівельними матеріалами із дерева, пластмас, полімерів, металу тощо.

Постановка проблеми. Виходячи з концепції пожежної безпеки в державній програмі України, проблема зниження горючості матеріалів і підвищення вогнестійкості конструкцій виділена в один із пріоритетних наукових напрямів фундаментальних та прикладних досліджень. У ній передбачено виконання робіт, спрямованих на забезпечення протипожежного захисту, розробку вогнезахисних засобів, що знижують горючість матеріалів і підвищують вогнестійкість будівельних конструкцій, розроблення та вдосконалення методів визначення пожежної небезпеки матеріалів.

Мета дослідження – підвищення вогнестійкості металевих конструкцій за рахунок використання вогнезахисних спечених покриттів, розроблення нових підходів, критеріїв та методів оцінювання

вогнестійкості та підвищення вогнестійкості металевих конструкцій.

Результати досліджень. Розраховано процеси тепломасообміну під час нагрівання металевих конструкцій, захищених покриттями, що спучуються. Цікавим бачиться аналітичне вивчення тепломасообміну під час нагрівання металу під вогнезахисним покриттям, що дозволяє проводити вибір та розробку покриттів з урахуванням їх вогнезахисної ефективності.

Нові можливості у створенні покриттів зниженої горючості і негорючих для металевих поверхонь відкрилися з появою ефективних систем, які спучуються, утворюючи при нагріванні спінений теплоізолювальний шар, що блокує металеву підкладку.

Вогнезахисні покриття, що формуються на основі фосфатних цементів, рідиною замішування для яких служать цинк-фосфатні зв'язки, застосовуються для покриття металевих будівельних конструкцій та можуть забезпечувати перепад температур до 700 °С при захисті сталевих виробів та 850 °С при захисті алюмінієвих конструкцій. Ці фосфатні покриття можуть містити нефелін або спечений фосфат карбаміду як антипірени.

Добрим вогнезахисним ефектом вирізняються покриття складу ОФП-ММ, які залежно від товщини захисного шару (10...50 мм) підвищують вогнестійкість металевих конструкцій від 0,5 до 3 годин.

Результати експериментальних досліджень показують, що вогнезахисні

покриття на основі рідкого скла можуть забезпечувати захист металевих конструкцій за перепаду температури 900 °C і вище [1].

Процеси тепломасообміну за вогневого впливу на систему «покриття, що спучується, – металева конструкція» описуються складною системою рівнянь у частинних похідних: збереження імпульсу та енергії. Для формулювання системи рівнянь тепло- і масообміну за вогневого впливу з боку покриття, що спучується, вводиться припущення, що конденсована фаза кожної зі складових системи складається з трьох компонентів: вихідного матеріалу, проміжного конденсованого продукту, кінцевого конденсованого продукту розкладання. А також у системі відбуваються дві гомогенні незворотні реакції розкладання.

Справжня кінетика реакцій розкладання, як правило, не відома, тому для простоти вважаємо, що реакція розкладання – це реакція першого порядку і дотримується закону Арреніуса з ефективними значеннями енергії активації та передекспонента, що визначаються за допомогою дослідницьких даних.

До системи «теплофізичні та термодинамічні рівняння параметри вихідного матеріалу, конденсованого та газоподібного продуктів реакції» додається рівняння теплопровідності у металевій конструкції (для випадку плоскої пластини).

Аналіз числового алгоритму розв'язання такої системи рівнянь для полімерних матеріалів із відносно невеликим обсягом спучування наведено у працях [2; 3]. Результати числових розрахунків наведені у публікації [4].

Застосування числових методів для оцінювання межі вогнестійкості покриття, що спучується, вимагає експериментального оцінення ряду теплофізичних і термохімічних параметрів і величин, що входять у досліджувану математичну модель, що змінюються в ході процесу спучування. Тобто проведення розрахунків кожного конкретного матеріалу покриття вимагає виконання цілого комплексу непростих експериментів.

Тому, з погляду практики, найбільш доцільним бачиться отримання достовірних дослідних даних вогневих випробувань та побудова на їх основі інженерних номограм залежностей термічного опору найбільш поширених покриттів від температури, часу та товщини спученого шару за стандартною кривою пожежі [5].

Для розрахунку полів температур у системі «негорюче покриття – металева основа» застосуємо таку розрахункову схему. Процес теплообміну за умов стандартної пожежі розіб'ємо на два розрахункові етапи: перший етап – це прогрівання металевої основи до спучування покриття, без урахування впливу теплофізичних властивостей та товщини останнього; другий – це подальше прогрівання конструкції з урахуванням впливу параметрів спученого покриття.

У результаті аналітичних досліджень отримано математичні моделі, що дозволяють визначити межу вогнестійкості для досягнення критичної температури на поверхні металевої конструкції.

Аналітичні дослідження зміни теплообміну в металевій конструкції, захищеній вогнезахисними покриттями, що спучуються, під час нагрівання в режимі стандартної пожежі були проведені для двох розрахункових етапів. На першому етапі розрахунку полів температур розглядали процес нагрівання металевої конструкції під покриттям до його спучування без урахування впливу теплофізичних властивостей та товщини. На другому розрахунковому етапі досліджень розглядався подальший процес прогрівання конструкції з урахуванням зміни теплофізичних властивостей і товщини покриття, що вже спучене.

Значною мірою пожежна безпека будівель та споруд залежить від достовірності оцінки вогнестійкості та підвищення вогнестійкості конструкцій, що застосовуються. Вогнестійкість оцінюють експериментальними та розрахунковими методами.

Експериментальні методи – це основні джерела інформації, проте через високу вартість і трудомісткість дедалі більше

поступаються місцем розрахунковим [7–12]. При цьому визначення вогнестійкості металевих конструкцій зводиться до розв'язання статичної та теплотехнічної задач. Розв'язання статичної задачі не становить складності, тому розрахунок вогнестійкості металевих конструкцій зводиться здебільшого до визначення часу досягнення критичної температури. Аналіз публікацій [1–7; 9–12] показав, що нині існує безліч розрахункових методів оцінювання вогнестійкості металевих конструкцій, проте через складність, трудомісткість, значну розбіжність з експериментальними даними вони не знаходять застосування. Отож ми поставили завдання на основі узагальнення отриманих результатів вогнестійкості методами, що найбільше застосовуються, розробити інженерну методику, яка дозволяє уникнути зазначених недоліків. Порівняльну оцінку вогнестійкості незахищених металевих конструкцій проводили за інженерними методиками А. М. Зайцева, Г. М. Крикунова, А. І. Яковлева та ін. [7; 12–17] з експериментальними даними, отриманими під час випробування на лабораторній установці.

У цих методиках робиться припущення, що прогрівання металу в осередку пожежі йде поступово за перерізом і залежить від наведеної товщини металу. Так, згідно з методикою розрахунку А. М. Зайцева, вогнестійкість металевих конструкцій визначається на основі розв'язання диференціального рівняння Фур'є та дозволяє у спрощеному вигляді визначити межу вогнестійкості за залежністю:

$$\tau = 1,43 \cdot C_{cp} \cdot j \cdot \delta_{np} \cdot \bar{\tau}, \quad (1)$$

де C_{cp} – середнє значення коефіцієнта питомої теплоємності, кДж/кг·К; j – щільність сталі, 7 800 кг/м³; δ_{np} – наведена товщина металу, м; τ – аргумент, який визначається за номограмою.

Складність цього методу полягає у визначенні емпіричних коефіцієнтів за номограмою, що значно знижує точність обчислень, особливо це помітно зі збільшенням наведеної товщини металу.

Відповідно до методики А. І. Яковлева визначення межі вогнестійкості металевих конструкцій зводиться до розв'язання рівняння теплового балансу під час нагрівання металеві пластили товщиною δ_{np} , одна з поверхонь якої теплоізолювана. Числове розв'язання вогнестійкості зводиться до визначення максимального проміжку часу D_{tmax} для початкової та максимально можливої температури.

Застосування цього методу пов'язане зі значною обчислювальною роботою, тому без ЕОМ практично неможливе.

Аналіз даних показав, що між розрахунковими даними методом А. М. Зайцева та експериментальними отриманими на лабораторній установці є значні відхилення (до 24 %). Відхилення розрахункових даних за А. І. Яковлевим та експериментальних на лабораторній установці становлять до 10 %. Особливо значущі відхилення розрахункових методів між собою (до 31 %). Враховуючи значні розбіжності в оцінці вогнестійкості наведеними методами, ми обробили на ЕОМ як найбільш достовірні дані, отримані під час випробування металевих конструкцій в експериментальних установках. Після обробки даних отримали залежність визначення межі вогнестійкості від наведеної товщини:

$$\tau = e^{-1,4385} \cdot \delta_{np}^{0,5834}, \quad (2)$$

де τ – межа вогнестійкості, год.; δ_{np} – наведена товщина металу, см.

Отримана залежність найповніше описує експериментальні дані (відхилення не перевищують 3,5 %). Порівняльний аналіз отриманих даних вогнестійкості за залежністю 27 та методом А. І. Яковлева не перевищує 9 %, що дозволяє говорити про допустиму збіжність застосовуваних методів оцінювання вогнестійкості незахищених металевих конструкцій.

Враховуючи необхідність на стадії як проектування, так і експлуатації будівель та споруд, з урахуванням межі вогнестійкості основних конструкцій, встановлення ступеня вогнестійкості об'єкта загалом, а, у разі невиконання вимог пожежних норм

розроблення ефективних заходів підвищення вогнестійкості, ми запропонували інженерну методику. В основу методики покладено результати досліджень та експериментів отриманих нами.

Висновки.

1. В результаті аналітичних досліджень отримано математичні моделі, що

дозволяють прогнозувати вогнестійкість та підвищення вогнестійкості металевих конструкцій залежно від товщини покриття, наведеної товщини металу та виду вогнезахисної композиції.

2. Розроблено інженерну методику оцінювання вогнестійкості та підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Баратов А. Н., Андрианов Р. А., Корольченко А. Я. и др. Пожарная опасность строительных материалов. Москва : Стройиздат, 1988. 380 с.
2. Беликов А. С. Теоретичне та практичне обґрунтування ефективності застосування вогнезахисних покриттів для зниження горючості матеріалів і підвищення вогнестійкості будівельних конструкцій. Дніпропетровськ, 2000. 196 с.
3. Развитие пожара в помещении и его математическое моделирование : сб. науч. тр. Тбилиси : АН ГССР, 1992. 120 с.
4. Беликов А. С. Дослідження з розробки вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій : зб. наук. пр. ПДАБА. Вип. 2, ч. 1. Дніпропетровськ, 1997. С. 65–72.
5. Беликов А. С. Вогнестійкість і підвищення вогнестійкості металевих конструкцій. *Вісник ПДАБА*. 2000. № 3. С. 57–61.
6. Монахов В. Г. Справочные данные по горению, развитию и тушению пожаров. Москва : Высшая школа, 1963. 260 с.
7. Астапенко В. М., Кошмаров Ю. А., Шевляков А. К. и др. Термодинамика пожаров в помещениях. Москва: Стройиздат, 1988. 488 с.
8. Баратов А. Н., Годшело М. Г. Пожарная опасность производств применяющих газы и жидкости. Москва : Изд-во МПХ РСФСР, 1981. 120 с.
9. Молчадский И. С., Корчагин П. Г. Распределение горения по поверхности твердых материалов. *Огнестойкость строительных конструкций*. Москва : ВНИИПО, 1981. Вып. 9. С. 69–82.
10. Баратов А. Н., Корольченко А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов : справ. Москва : Стройиздат, 1990. 361 с.
11. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ. Москва : Химия, 1979. 42 с.
12. Марголин А. Д., Крупкин В. Г. Критические условия горения полимеров. Горение гетерогенных и газовых смесей. Черноголовка, 1977. С. 11–14.
13. Рыбанин С. С., Соболев С. Л. Распространение волны горения при гетерогенной реакции. Черноголовка, 1981. 12 с.
14. Романенков Н. Г., Зигерн-Корн В. Н. Развитие противопожарных норм проектирования зданий и сооружений. Обзор информации. *Строительство и архитектура. Серия 8: Строительные конструкции*. Вып. 2. Москва : ВНИИПС, 1985. 60 с.
15. Burgoyne J. A., Neale R. F. Some new Measurements Inflammability Ranfes in Air. *Fuel*. 1953. Vol. 32. Pp. 18–26.
16. Besson et Facler. Nouveaux essais d'incendies dans des immeubles recis. Livraison № 36 du G.S.T.B. cahier № 292. Pp. 120–128.
17. Building Materials Directory. Underwrites Laboratories. January, 1980. 537 p.

REFERENCES

1. Baratov A.N., Andrianov R.A., Korolchenko A.Ya. and oth. *Pojarnaya opasnost stroitelnih materialov* [Fire hazard of building materials]. Moscow : Sroyizdat Publ., 1988, 380 p. (in Russian).
2. Belikov A.S. *Teoretychne ta practychnе obgruntuvannia efektyvnosti zastosuvannia vognезahysnyh pokryttiv dlia znyjennia goruchosti materialiv i pidvyschennia vognestiykosti budivelnyh konstrukciy* [Theoretical and practical substantiation of the effectiveness of the use of fire-resistant coatings to reduce the flammability of materials and increase the fire resistance of building structures]. Dnipropetrovsk, 2000, 196 p. (in Ukrainian).
3. *Razvitie poжara v pomeschenii I ego matematicheskoe modelirovanie* [Development of a fire in a room and its mathematical modeling]. Journal of Scientific Works. Tbilisi : Academy of Sciences of the HSSR, 1992, 120 p. (in Russian).
4. Belikov A.S. *Doslidzennia z rozrobky vognезahysnyh pokryttiv dlia metalovyh konstrukciy : zbirnyk naukovykh prats' PDABA* [Research on the development of fire-resistant coatings for metal structures : a collection of scientific works of the PSACEA]. No. 2, p. 1, Dnipropetrovsk, 1997, pp. 65–72. (in Ukrainian).

5. Belikov A.S. *Vognestiykist' i pidvyschennia vognestiykosti metalevykh konstrukciy* [Fire resistance and increase in fire resistance of metal structures]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of the PSACEA]. 2000, no. 3, pp. 57–61. (in Ukrainian).
6. Monahov V.G. *Spravochnye dannye po goreniu, razvitiu i tusheniu pojarov* [Reference data on burning, development and extinguishing of fires]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1963, 260 p. (in Russian).
7. Astapenko V.M., Koshmarov Yu.A., Shevliakov A.K. and oth. *Termodinamika pojarov v pomescheniyah* [Thermodynamics of indoor fires]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1988, 488 p. (in Russian).
8. Baratov A.N. and Godshelo M.G. *Pojarnaya opasnost' proizvodstv primeniaschih gazy i jidkosti* [Fire hazard in industries using gases and liquids]. Moscow : Publishing House MPH RSFSR, 1981, 120 p. (in Russian).
9. Molchadskiy I.S. and Korchagin P.G. *Raspredelenie gorenia po poverhnosti tverdykh materialov* [Distribution of burning on the surface of solid materials]. *Ognestoykost' stroitel'nykh konstruktsiy* [Fire Resistance of Construction Structures]. Moscow: VNIPO Publ., 1981, no. 9, pp. 69–82. (in Russian).
10. Baratov A.N. and Korol'chenko A.Ya. *Pojarovzryvoopasnost' veschestv i materialov : spravochnik* [Fire and explosion hazard of substances and materials : handbook]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1990, 361 p. (in Russian).
11. Monahov V.T. *Metody issledovaniya pojarnoy opasnosti veschestv* [Methods of research of fire hazard substances]. Moscow : Chemistry Publ., 1979, 42 p. (in Russian).
12. Margolin A.D. and Krupkin V.G. *Kriticheskie uslovia gorenia polimerov* [Critical burning conditions of polymers]. Combustion of heterogeneous and gas mixtures. Chernogolovka, 1977, pp. 11–14. (in Russian).
13. Rybanin S.S. and Sobolev S.L. *Rasprostranenie volny gorenia pri geterogennoy reakcii* [Propagation of a combustion wave in a heterogeneous reaction]. Chernogolovka, 1981, 12 p. (in Russian).
14. Romanenkov N.G. and Zigern-Korn V.N. *Razvitie protivopojarnykh norm proektirovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Development of fire safety standards for the design of buildings and structures]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Seriya 8: Stroitel'nyye konstruktsii* [Overview of Construction and Architecture Information. Series 8: Building Structures]. Iss. 2, Moscow : VNIIPS Publ., 1985, 60 p. (in Russian).
15. Burgoyne J.A. and Neale R.F. Some new Measurements Inflammability Ratios in Air. *Fuel*. 1953, vol. 32, pp. 18–26.
16. Besson et Facler. Nouveaux essais d'incendies dans des immeubles reeis. Livraison no. 36 du G.S.T.B. cahier no. 292, pp. 120–128.
17. Building Materials Directory. Underwrites Laboratories. January, 1980, 537 p.

Надійшла до редакції: 02.07.2022.