

*М. М. Семерак, д-р техн. наук, професор, А. В. Субота
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ВОГНЕСТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗАХИЩЕНИХ ВОГНЕЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ, ЩО СПУЧУЄТЬСЯ

Розглянуто вогнестійкість несучих сталевих конструкцій машинних залів атомних електростанцій, які захищені вогнезахисним покриттям, що спучується за умов пожежі. Одержано аналітичну залежність зміни температурного поля по товщині сталевій конструкції з врахуванням зміни теплофізичних характеристик та геометричних розмірів покриття при дії на нього теплових потоків полум'я пожежі. На основі отриманих результатів запропоновано методику дослідження розподілу нестационарного температурного поля по товщині сталевих конструкцій, захищених вогнезахисним покриттям, що спучується. Показано залежність вогнестійкості сталевих конструкцій від товщини вогнезахисних покриттів, що спучуються.

Ключові слова: машинні зали електростанцій, горіння воднево-повітряної суміші, система "конструкція-покриття", тепловий потік, нестационарне температурне поле, сталеві конструкції.

М. М. Семерак, А. В. Субота

ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗАЩИЩЕННЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ, КОТОРОЕ ВСПУЧИВАЕТСЯ

Рассмотрено огнестойкость несущих стальных конструкций машинных залов атомных электростанций, защищенных огнезащитным покрытием, которое вспучивается в условиях пожара. Получена аналитическая зависимость изменения температурного поля по толщине стальной конструкции с учетом изменения теплофизических характеристик и геометрических размеров покрытия при действии на него тепловых потоков пламени пожара. На основе полученных результатов предложена методика исследования распределения нестационарного температурного поля по толщине стальных конструкций, защищенных огнезащитным покрытием, которое вспучивается. Показана зависимость огнестойкости стальных конструкций от толщины огнезащитных покрытий.

Ключевые слова: машинные залы электростанций, горение водородно-воздушной смеси, система "конструкция-покрытие", тепловой поток, нестационарное температурное поле, стальные конструкции.

М. М. Semerak, A. V. Subota

FIRE-RESISTANCE OF BUILDING CONSTRUCTIONS PROTECTED BY UPWARDING FIREPROOF COVERAGE

Fire-resisting features of bearing steel constructions of nuclear power plant machine halls protected by upwarding fireproof coverage has been examined. Analysis of interdependence of the temperature change of the field throughout the thickness of steel construction taking into account the change of thermophysical descriptions and geometrical sizes of coverage under the influence of fire has been carried out. On the basis of the results the methods of research of distribution of the non-stationary temperature field on the thickness of steel constructions, protected by upwarding fireproof coverage have been offered. Interdependence of fire-resistance of steel constructions and the thickness of upwarding fireproof coverage has been shown.

Key words: machine halls of power-stations, burning of hydrogen-air mixture, the system "construction-coverage", thermal stream, non-stationary temperature field, steel constructions.

Турбогенератори машинних залів електростанцій потужністю понад 50 МВт охолоджуються газоподібним воднем, який знаходиться в системі під надлишковим тиском 0,3-0,4 МПа. Для запобігання витіку водню із корпусу генератора передбачається оливне ущільнення вала кільцевого типу. При пошкодженні ущільнюючої системи відбувається аварійний витік водню, тривалість якого знаходиться в діапазоні 20...150 с. При займанні струменя водню температура факела полум'я сягає 2200 К.

Для захисту несучих сталевих конструкцій (кроквяні ферми перекриття, несучі колони) використовують вогнезахисні покриття, що спучуються.

За інформацією виробників вогнезахисних покриттів протягом останніх 20 років на атомних електростанціях України для вогнезахисту несучих сталевих конструкцій машзалів були застосовані поліфосфатні речовини “Фламмопласт” і “Унітерм” (Німеччина), “Протермстїл” (Росія), засіб на сольвентній основі “Polylack-A” (Угорщина), “Interchar 963” (Швеція) та засіб на основі графіту “Ендотерм ХТ-150” (Україна). Всі ці засоби використовувалися на підставі даних сертифікаційних випробувань в умовах “стандартного температурного режиму пожежі” (максимальна температура – 1466 К). Оскільки час вільного витікання водню з корпусу турбогенератора під час аварійної ситуації може становити близько 3 хв, а температура полум'я факела сягає понад 2200 К, то виникає необхідність уточнення межі вогнестійкості конструкцій при такій високій температурі.

На сьогодні в Україні немає методик теоретичного дослідження вогнестійкості металевих конструкцій (мінімальна межа вогнестійкості сталевий будівельної конструкції R15) за умов високих температур полум'я та інтенсивного теплообміну. Експериментальним шляхом дослідити їх вогнестійкість дуже складно, а інколи просто неможливо. Проблемою їх дослідження є великі габаритні розміри. Такі конструкції широко використовуються на об'єктах енергетики (турбогенераторні зали), нафтопереробних заводах, заводах хімічної промисловості і т.п.

Постановка задачі. При дослідженні теплообміну між факелом полум'я і будівельними конструкціями необхідно визначити частину енергії випромінювання факела, яка поглинається ними.

В роботі [2] досліджено щільність теплових потоків і показано, що швидкість факела струменя водню становить 20 м/с, рухається вертикально вгору у вигляді теплової колонки, яка має форму циліндра.

Під час дослідження факел полум'я, що утворюється в результаті горіння воднево-повітряної суміші в приміщенні машинного залу, змодельовано циліндричною колонкою, яка характеризує об'ємне випромінювання факела пожежі (рис. 1).

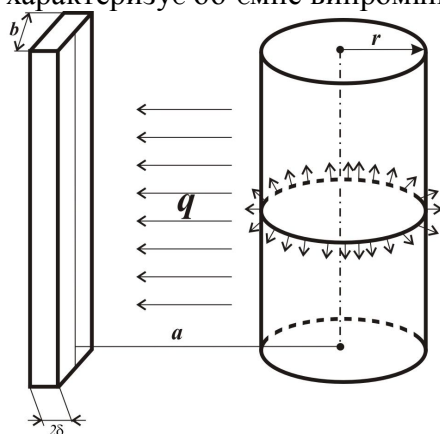


Рис. 1. Просторове зображення розташування конструкції відносно факела пожежі

При дослідженні прийнято, що теплообмін здійснюється в середовищі з вологістю повітря в діапазоні від 50 до 100%, для усієї системи “полум'я-конструкція” справедливі закони Стефана-Больцмана і Ламберта.

Для дослідження впливу теплофізичних та геометричних характеристик вогнезахисних покриттів на вогнестійкість несучих сталевих конструкцій розглянемо сталеву конструкцію, захищену вогнезахисним покриттям, що спучується. Для цього змодельовано її у вигляді двохарової конструкції з товщиною вогнезахисного покриття 1-1,5 мм. На конструкцію діє тепловий потік факела полум'я. Процес нагрівання проходить у дві стадії. В початковий час покриття нагрівається і спучується, при цьому змінюються його теплофізичні характеристики і товщина.

Розглянемо дві стадії процесу нагрівання сталевий конструкції з вогнезахистом: до спучення (рис. 1 а) і після спучення (рис. 2 б) вогнезахисного покриття. У праці [3] зазначено, що при прогріванні в інтервалі 250...500 °С покриття спучу-

ється, внаслідок чого його теплофізичні характеристики і геометричні розміри змінюються. Зокрема, товщина покриття під час спучення збільшується в 10-15 разів, а теплопровідність і густина зменшуються в декілька разів. Це призводить до зменшення інтенсивності нагрівання сталеві конструкції.

Оскільки товщина вогнезахисного покриття після спучення збільшується в декілька разів, а теплофізичні характеристики (теплопровідність і густина) зменшуються, то інтенсивність нагрівання сталеві конструкції зменшується. Тому дослідження проводились у дві стадії:

- 1) система “конструкція-покриття” до спучення (рис. 2 а);
- 2) система “конструкція-покриття” після спучення (рис. 2 б) вогнезахисного покриття.

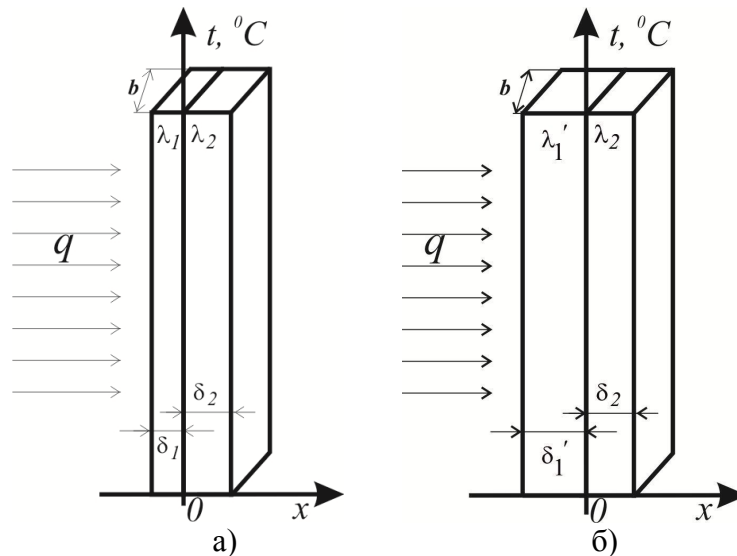


Рис. 2. Схематичне зображення сталеві конструкції з вогнезахистом:
а) до спучення вогнезахисної фарби; б) після спучення вогнезахисної фарби

Для дослідження розподілу температурного поля по товщині двохшарові конструкції використаємо диференціальне рівняння теплопровідності з початковою та граничними умовами

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0; -\delta < x < +\delta), \quad (1)$$

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0 = const, \quad (2)$$

$$\frac{\partial t_1(\delta_2, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau), \quad (4)$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial t_1(-\delta_1, \tau)}{\partial x} - \frac{q}{\lambda_2} = 0, \quad (6)$$

де $t(x, \tau)$ – нестационарна температура в поперечному перерізі пластини, °C; $\pm \delta$ – бокові поверхні пластини; q – тепловий потік, що поглинається поверхнею конструкції $x = \delta$, Bm/m^2 ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $Bm/(m \cdot K)$; t_0 – початкова температура конструкції, °C.

$t_1(-\delta_1, \tau)$, $t_2(\delta_2, \tau)$ – температура вогнезахисного покриття та сталевій конструкції відповідно, °C; λ_1 і λ_1' – теплопровідність вогнезахисного покриття до і після спучення відповідно, $Вт/(м \cdot К)$; δ_1 і δ_1' – товщина вогнезахисного покриття до і після спучення відповідно, $м$.

Застосувавши перетворення Лапласа до рівняння (1) та крайових умов (2)-(6), розв'язок знаходимо у вигляді [4]

$$t_2(x, \tau) = t_0 \left[\begin{aligned} & 1 + \frac{Ki\lambda^*}{\lambda^* + A\Delta} \times \left\{ Fo_1 + \frac{1}{2} A \left(\Delta - \frac{x}{\delta_1} \right)^2 - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \left(\lambda^* A\Delta^2 + A\Delta + \frac{1}{3} A^2 \Delta^3 + \frac{1}{3} \lambda^* \right) (\lambda^* + A\Delta)^{-1} \right\} + \\ & \left. + 2Ki_1 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \phi_n} \left(\cos \left(\mu_n A^{1/2} \right) \left(\Delta - \frac{x}{\delta_1} \right) \right) \cdot e^{(-\mu_n^2 \cdot Fo_1)} \right] \end{aligned} \right] \quad (7)$$

де $\lambda^* = \lambda_1/\lambda_2$ – критерій, що характеризує відносну теплопровідність тіла; $A = a_1/a_2$ – критерій, що характеризує теплоінерційні властивості другого тіла відносно першого; $a_1 = \lambda_1/(\rho_1 \cdot c_1)$, $a_2 = \lambda_2/(\rho_2 \cdot c_2)$ – коефіцієнти температуропровідності вогнезахисного покриття і сталевій конструкції відповідно, $м^2/с$; $\Delta = \delta_2/\delta_1$; q – величина теплового потоку, що поглинається конструкцією, $Вт/м^2$; $Fo_1 = (a_1 \cdot \tau) / \delta_1^2$ – критерій Фур'є;

$$\phi_n = \left(1 + \frac{1}{\lambda^*} (A)^{3/2} \Delta \right) \cos \mu_n \cos \left(\mu_n (A)^{1/2} \Delta \right) - \left(\Delta (A)^{1/2} + \frac{1}{\lambda^*} A \right) \times \left(\sin \mu_n \sin \left(\mu_n (A)^{1/2} \Delta \right) \right); \quad Ki = \frac{q \cdot \delta_2}{\lambda t_0}$$

критерій Кірпічова; μ_n – корені характеристичного рівняння

$$\lambda^* tg \mu + Atg \mu \cdot (A)^{1/2} \cdot \Delta = 0. \quad (8)$$

За формулою (7) проведені дослідження для несучої сталевій колони, захищеної вогнезахисними покриттями різних марок (“Polylack-A”, “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2”) товщиною 1-1,5 мм.

Під час першої стадії при інтенсивному нагріванні (температура факела – 2200 К) покриття спучується в інтервалі часу 15-20 с, внаслідок чого його теплофізичними характеристиками і геометричними розмірами за цей час змінюються. При спученні товщина покриття збільшується в 10-15 разів.

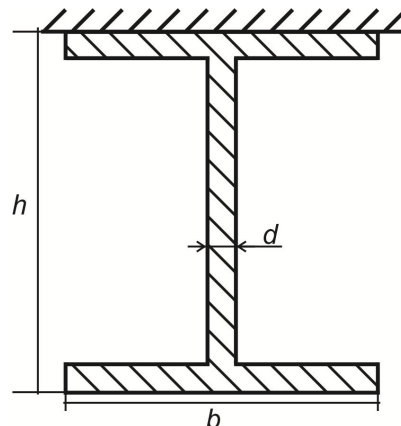


Рис. 3. Схематичне зображення поперечного перерізу несучої колони

Сталеві несучі колони машинних залів (рис. 3) мають форму двотаврової балки з такими розмірами поперечного перерізу: висота балки $h = 1250$ мм, ширина полиці $b = 650$ мм, товщина стінки і полиці $d = 30$ мм), змодельовано пластиною з приведеною товщиною $\delta = \frac{A}{2 \cdot h + 3 \cdot b - 2 \cdot d}$ ($\delta = 0.017$ м), де A – площа поперечного перерізу, m^2 . Для розглянутої конструкції $A = 0,075$ m^2 .

Результати дослідження під час першої стадії (до спучення) зображені графічно на рис. 4 (крива 1 – “Polylack-A”, крива 2 – “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2”).

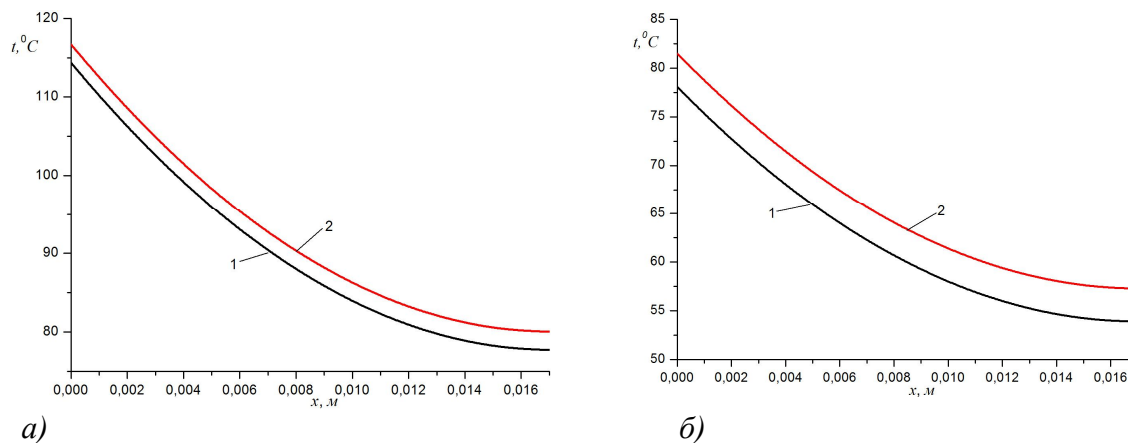


Рис. 4. Розподіл температурного поля по товщині несучої колони, захищеної вогнезахисним покриттям товщиною δ_1 , до спучення:
а) 1 мм; б) 1,5 мм

Аналіз рис. 4 показує, що сталева колона за 20 с прогрівається при товщині вогнезахисного покриття:

- 1 мм для “Polylack-A” до 87 °С, “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” – 90 °С;
- 1,5 мм для “Polylack-A” до 60 °С, “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” – 64 °С.

Після спучення теплофізичні характеристики і геометричні розміри покриття змінюються, внаслідок чого межа вогнестійкості конструкції збільшується.

Результати чисельного експерименту для другої стадії представлені графічно на рис. 5-6 (крива 1 – “Polylack-A”, крива 2 – “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2”).

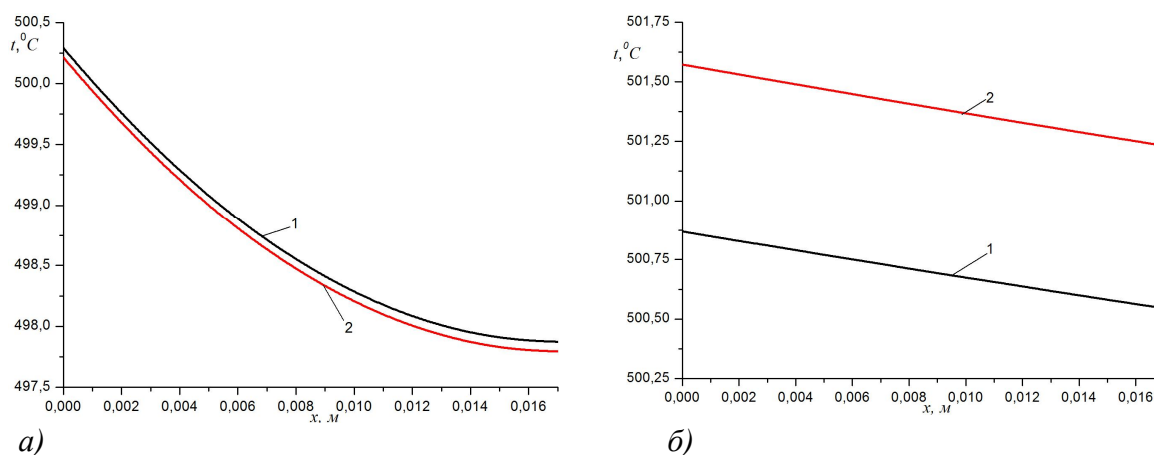


Рис. 5. Розподіл температурного поля по товщині несучої колони, захищеної вогнезахисним покриттям товщиною δ_1' , після спучення: а) 1 мм; б) 1,5 мм

Аналіз графічних залежностей рис. 5 показує, що перепад температури між поверхнями сталеві конструкції $x=0$ і $x=\delta_2$ не перевищує $3\text{ }^\circ\text{C}$, тобто прогрівання сталі є майже рівномірним.

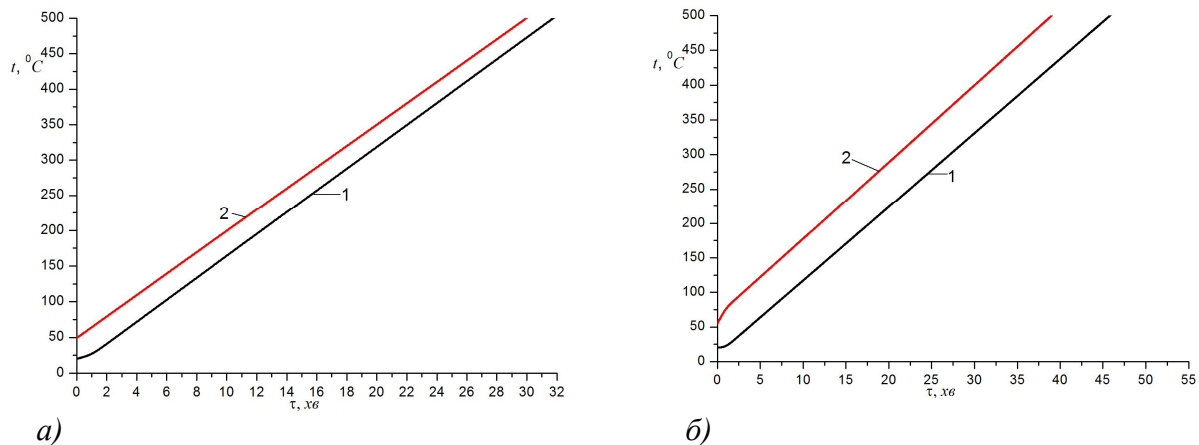


Рис. 6. Динаміка зміни температури несучої колони, захищеної вогнезахисним покриттям товщиною δ_1 після спучення:
а) 1 мм; б) 1,5 мм; в) 2 мм

Аналіз залежностей на рис. 6 показує, що критична температура ($500\text{ }^\circ\text{C}$) сталеві конструкції, захищеної покриттям, досягається:

- при товщині покриття 1 мм для “Polylack-A” за 32,5 хв, “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” – 30 хв;
- при товщині покриття 1,5 мм для “Polylack-A” за 51,3 хв, “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” – 44 хв.

Дослідження впливу товщини вогнезахисного покриття на вогнестійкість сталеві несучої колони зображені графічно на рис. 6.

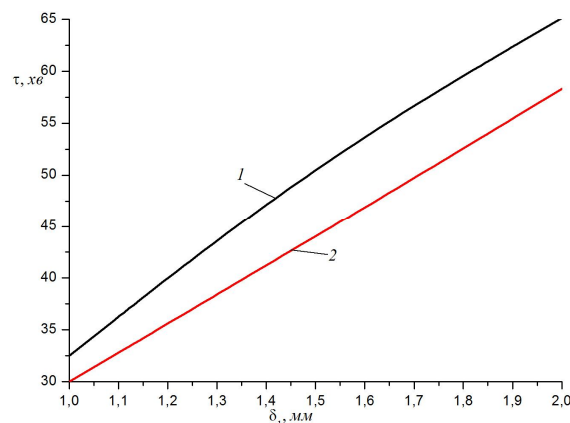


Рис. 6. Вплив товщини вогнезахисного покриття на вогнестійкість несучої колони:
1 – “Polylack-A”; 2 – “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2”

Аналіз рис. 6 показує, що вогнезахисні покриття “Polylack-A” та “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” збільшують вогнестійкість сталеві конструкції майже за лінійним законом і досягається критична температура $500\text{ }^\circ\text{C}$ за 65 хв і 55 хв відповідно.

Висновки

1. В роботі запропоновано методику дослідження вогнестійкості несучих сталевих конструкцій, захищених вогнезахисним покриттям, що спучується. В методиці враховано дві стадії нагрівання покриття, перша – до спучення, а друга – після спучення.

2. Одержано аналітичну залежність зміни температурного поля по товщині сталевій конструкції з врахуванням зміни теплофізичних характеристик та геометричних розмірів покриття. Досліджено залежність вогнестійкості сталевій конструкції від товщини покриття до спучення.

3. Показано, що при нанесенні вогнезахисного покриття товщиною 1,5 мм для “Polylack-A” вогнестійкість несучої колони втрачається за 51,3 хв, а при нанесенні “Pyro-Safe Flammoplast SP-A2” – за 44 хв.

Список літератури:

1. **Субота А. В.** Визначення та дослідження температурного поля в елементах металевих конструкцій за умов температурного режиму горіння водню / А. В. Субота, М. М. Семерак, О. В. Стокалюк // Пожежна безпека : зб. наук. пр. – Львів : ЛДУБЖД, 2014. – № 24. – С. 120-123.

2. **Субота А. В.** Математическое моделирование воздействия теплового излучения пожара на несущие конструкции машинных залов электростанций / А. В. Субота, В. В. Чернецкий, М. М. Семерак // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – Минск : НИИ ПБ и ЧС Республики Беларусь, 2013. – № 2(34). – С. 101–107.

3. **Вахитова Л. Н.** Огнезащита стальных конструкций / Л. Н. Вахитова, К. В. Калафат. – 2013. – 150 с.

4. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

References:

1. **Subota A. V.** Determination and research of the temperature field in the elements of metallic constructions in the conditions of temperature condition of burning of hydrogen / A. V. Subota, M. M. Semerak, O. V. Stokalyuk // Пожежна безпека : зб. наук. пр. – Львів : ЛДУБЖД, 2014. – № 24. – С. 120-123.

2. **Subota A. V.** Mathematical modeling of thermal radiation effects of fire on the axle plant constructions of the machinery halls of power plants / A. V. Subota, V.V. Chernetskiy, M. M. Semerak / «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация» Минск: НИИ ПБ и ЧС Республики Беларусь, 2013. – №2(34). – С. 101-107.

3. **Vahitova L.N.** Огнезащита стальных конструкций / L. N. Vahitova, K. V. Kalafat. – 2013. – 150 с.

4. **Lykov A.V.** Теория теплопроводности / A. V. Lykov. М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

