

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

ВИЗНАЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЕЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗА УМОВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ГОРІННЯ ВОДНЮ

Проаналізовано температурні режими пожеж за якими досліджується вогнестійкість будівельних конструкцій. Показано, що відомі режими дослідження не відображають характеру пожежі за умов горіння водню. Запропоновано математичну модель температурного режиму, яка описує пожежу з горіння водню (температура полум'я 2200 K). На основі отриманих результатів запропоновано методику дослідження розподілу температурного поля по товщині будівельних конструкцій.

Ключові слова: машинні зали електростанцій, горіння воднево-повітряної суміші, коефіцієнт теплообміну, температурне поле, будівельні конструкції.

Аналіз сучасного стану проблем, пов'язаних з забезпеченням вогнестійкості сталевих будівельних конструкцій, показує, що на багатьох об'єктах у технологічному процесі використовується велика кількість горючих газів та речовин з високими температурами горіння (турбінна олива $T = 1400\text{ K}$, водень $T = 2200\text{ K}$). Інтенсивність теплового потоку при таких температурах сягає $300\text{--}450\text{ кВт/м}^2$. Режими вогневої дії при пожежах на цих об'єктах суттєво відрізняються від "стандартного температурного режиму" ($\tau = 120\text{ хв}$, $T_{\text{max}} = 1329\text{ K}$ рис. 1 (крива 1)), "температурного режиму вуглеводневої пожежі" ($\tau = 40\text{ хв}$, $T_{\text{max}} = 1380\text{ K}$, рис. 1 (крива 2)), "температурного режиму модифікованої вуглеводневої пожежі" ($\tau = 40\text{ хв}$, $T_{\text{max}} = 1600\text{ K}$ рис. 1 (крива 3)) [1].

На сьогодні в Україні немає методик теоретичного дослідження вогнестійкості металевих конструкцій (мінімальна межа вогнестійкості сталеві 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 (машинні зали), нафтопереробних заводах, заводах хімічної промисловості і т.д.

Постановка задачі. Розглянемо зміну температури факела полум'я горіння воднево-повітряної суміші, яка коливається в межах від 2200 до 2600 K залежно від концентрації водню в повітрі [2]. Тривалість аварійного витікання (горіння) струменя водню досліджено в роботі [3] і вона становить 2,5 хв. Враховуючи, що температура факела полум'я дорівнює 2200 K і досягається за 15-20 с, температурний режим горіння водню математично змодельовано у вигляді

$$T_{\text{пож.Н}_2}(\tau) = 2200 - (2200 - T_0) \cdot e^{-0,3 \cdot \tau} \quad (1)$$

де τ – тривалість пожежі, с;

T_0 – початкова температура, K.

Графіки зміни температурного режиму водневої пожежі зображені на рис. 1 (крива 4).

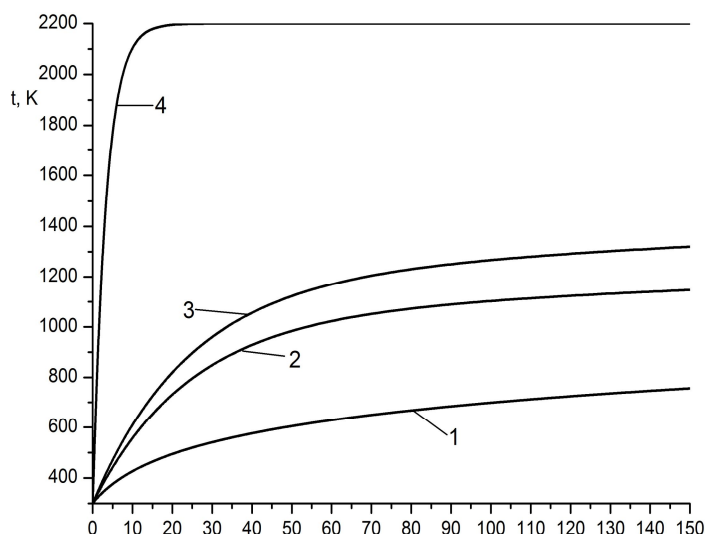


Рис. 1. Температурні режими пожежі:

- 1– "стандартний температурний режим пожежі";
- 2– "температурний режим вуглеводневої пожежі";
- 3– "модифікований температурний режим вуглеводневої пожежі";
- 4– "температурний режим водневої пожежі"

При дослідженні дії високих температур факела пожежі на несучі металеві колони, які мають форму двотавра (рис. 2) (для машинних залів використовуються металеві колони з розмірами: висота балки $h = 1250 \text{ мм}$, ширина полиці $b = 650 \text{ мм}$, товщина стінки і полиці $d = 30 \text{ мм}$), змодельуємо пластину з приведеною товщиною $\delta = \frac{A}{2 \cdot h + 3 \cdot b - 2 \cdot d}$ ($\delta = 0.017 \text{ м}$), температура якої дорівнює T_0 . З деякого часу, який приймемо за початок відліку $\tau = 0$, конструкція з обох боків нагрівається тепловим потоком q . Необхідно знайти розподіл температури по товщині пластини в будь-який момент часу.

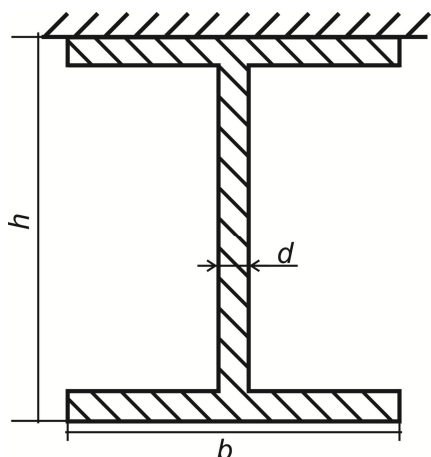


Рис. 2. Поперечний переріз колони

Початок координат системи xOz помістимо в середній площині приведеної пластини. Вісь x лежить в площині перерізу пластини і перпендикулярна до площини стінки двотавра.

Для знаходження температурного поля по товщині конструкції маємо диференціальне рівняння теплопровідності (2) та умови теплообміну між пожежею та поверхнею конструкції, що змінюються за законом Ньютона-Ріхмана [4]:

а) початкова

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

$$T(x, 0) = t_0 = \text{const}; \quad (3)$$

б) умова симетрії

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

в) гранична умова

$$-\frac{\partial t(\delta, \tau)}{\partial x} + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (2200 - (2200 - 300) \cdot e^{-0,3\tau} - t(\delta, \tau)) = 0, \quad (5)$$

де $a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; c_v – теплоємність при сталому об'ємі, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$, λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; α – коефіцієнт теплообміну, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Застосувавши перетворення Лапласа до рівняння (2) та граничних умов (3-5), знаходимо рішення задачі у вигляді [5]

$$T(x, \tau) = (T_{\text{max}} - T_0) \times \left(1 - \frac{\cos\left(\sqrt{\frac{k}{a}} \cdot x\right)}{\cos\left(\sqrt{\frac{k}{a}} \cdot \delta\right) - \frac{\lambda}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{k}{a}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{a}} \cdot \delta\right)} \cdot e^{-k\tau} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\left(1 - \frac{a \cdot \mu_n^2}{k \cdot \delta^2}\right)} \text{ccs}\left(\mu_n \cdot \frac{x}{\delta}\right) \cdot e^{(-\mu_n^2 \cdot \tau)} \right) + T_0 \quad (6)$$

де $k=0,3$ – стала; $A_n = \frac{2 \sin(\mu_n)}{\mu_n + \sin(\mu_n) \cdot \cos(\mu_n)} = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2Bi \cdot \sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n \cdot (Bi^2 + Bi + \mu_n^2)}$ – стала теплової амплітуди; μ_n – корені характеристичного рівняння $ctg\mu = \frac{1}{Bi} \mu$; $Fo = \frac{\alpha\tau}{\delta^2}$ – критерій Фур'є; $Bi = \frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}$ – критерій Біо.

За формулою (6) проведені дослідження температурного поля по товщині несучої металеві колони. При розрахунках враховували реальні товщини конструкцій. Початкова температура конструкції $T_0 = 300K$. Дослідження проводились для температури середовища (1) за водневим температурним режимом за різної інтенсивності теплообміну між пожежею та конструкцією. Результати розрахунку зображені графічно на рис. 3 і 4.

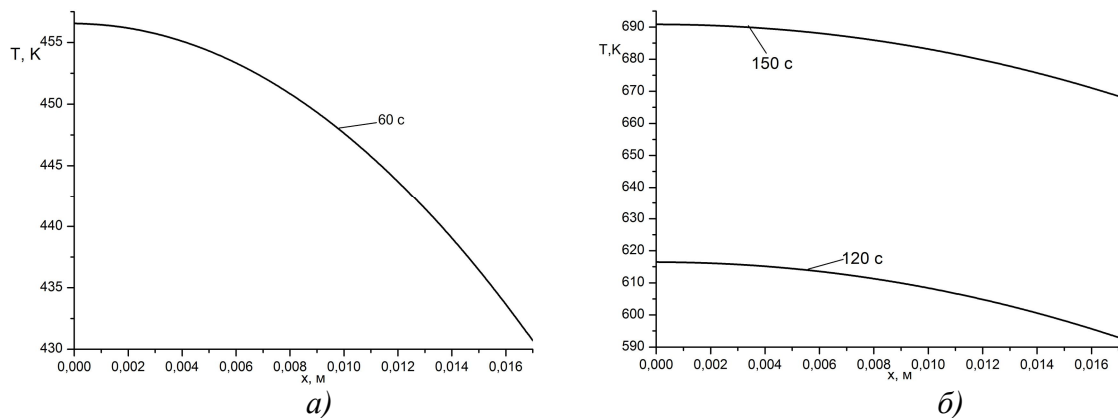


Рис. 3. Розподіл температурного поля по товщині металеві конструкції при $\alpha = 100 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ за різні інтервали часу: а) 60 с; б) 120 с і 150 с

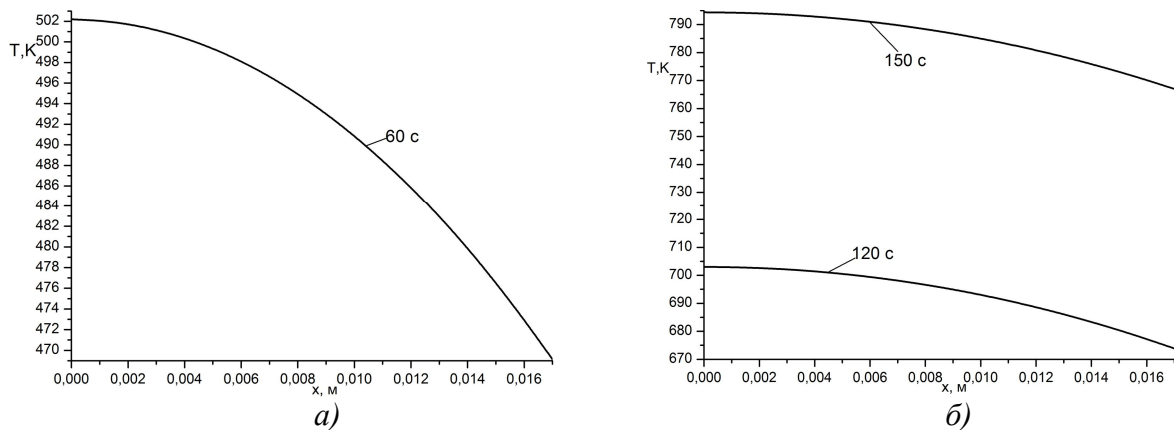


Рис. 4. Розподіл температурного поля по товщині металеві конструкції при $\alpha = 150 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ за різні інтервали часу: а) 60 с; б) 120 с і 150 с

Аналіз рис. 3 і 4 показує, що при збільшенні тепловіддачі від $\alpha = 100 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ до $\alpha = 150 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ температура нагріву конструкції збільшується на $100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Висновки.

1. В роботі запропоновано математичну модель температурного режиму горіння водню.
2. Одержано аналітичну залежність зміни температурного поля по товщині конструкції з врахуванням температурного режиму горіння водню.
3. Оскільки час витікання водню при аварії 2,5 хв, то металева конструкція не нагрівається до критичної температури.

Список літератури:

1. ДСТУ Б В.111-4-98* “Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги”.
2. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 288 с.
3. Семерак М.М. Моделювання термогазодинамічних параметрів струменя водню у разі розгерметизації корпусу турбогенератора електричної станції/ Семерак М.М., Субота А.В., Желяк В.І. / Вісник: Збірник наукових праць. – Львів: ЛДУБЖД, 2013. – №7. – С. 225 – 229.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
5. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

А.В. Субота, М.М. Семерак, О.В. Стокалюк

ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЭЛЕМЕНТАХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА

Проанализированы температурные режимы пожара по которым исследуется огнестойкость строительных конструкций. Показано, что существующие режимы исследования не отображают характера пожара при условии горения водорода. Предложена математическая модель температурного режима, описывающая пожар при условии горения водорода (температура пламени 2200 К). На основании полученных результатов предложена методика исследования распределения температурного поля по толщине строительных конструкций.

Ключевые слова: машинные залы электростанций, горение водородно-воздушной смеси, коэффициент теплообмена, температурное поле, строительные конструкции.

A.V. Subota, M.M. Semerak, O.V. Stokaluk

DEFINITION AND STUDY OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE ELEMENTS OF METAL STRUCTURE IN HYDROGEN COMBUSTION TEMPERATURE MODE

The fire temperature mode used while studying the fire resistance of building structures was analyzed. It was shown that certain modes of study do not reflect the nature of the fire if hydrogen burns. Mathematical model of temperature mode, which describes the fire caused by burning hydrogen, was suggested. Based on the results, the method of temperature field division study was suggested.

Key words: engine rooms of power plants, combustion of hydrogen-air mixture, heat transfer coefficient, temperature field structures.

