

*М.М. Семерак¹, д-р техн. наук, професор
А.В. Субота¹, В.М. Новак², В.М. Байтала¹*

*(¹Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
²Державна інспекція техногенної безпеки України)*

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ НЕСУЧИХ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ МАШИННИХ ЗАЛІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Проаналізовано причини виникнення та протікання пожеж у машинних залах електростанцій. Розглянуто процес горіння водню та воднево-оливних сумішей в машинних залах за умов пожежі. Проаналізовано найбільш вірогідні місця виникнення пожежонебезпечних концентрацій сумішей водень-олива-повітря. Розроблено методику дослідження теплових процесів, які протікають під час пожежі. Визначено температурні потоки, зумовлені випромінюванням факела пожежі. Досліджено температурне поле по товщині металеві конструкції залежно від величини теплового потоку, товщини конструкції та вогнезахисного покриття, їх теплофізичних характеристик. Показано, що вогнезахисні покриття, що спучуються, значно підвищують вогнестійкість несучих конструкцій машинних залів.

Ключові слова: машинні зали електростанцій, горіння водню і воднево-оливної суміші, теплові потоки, температурне поле, турбогенератор, несучі металеві конструкції машинних залів.

Проблема пожежної безпеки машинних залів електростанцій. Аналіз статистичних даних аварійних ситуацій, які виникли на теплових (ТЕС) та атомних (АЕС) електростанціях України і світу за останні десятиліття (врахувавши аварію на 2-му енергоблоці Чорнобильської атомної електростанції 1991 року, пожежу на Рефтинській ДРЕС (Росія) 2006 року та катастрофу 2011 року на АЕС Фукусіма-1 (Японія)), що супроводжувались пожежами в машинних залах електростанцій, показав, що до швидкого розвитку пожежі оливи і водню, з пошкодженням несучих будівельних конструкцій машинних залів, приводили майже всі аварійні ситуації (близько 70% пожеж з пошкодженням конструкцій кривлі в машинних залах електростанцій), першопричиною яких було механічне руйнування вузлів турбогенераторів. З них приблизно дві третини випадків відносяться до турбіни (механічне розбалансування, розгін), а решта — до генератора (пошкодження бандажних вузлів). Руйнування турбіни завжди викликає розгерметизацію газооливного ущільнення турбогенератора, що призводить до витoku великої кількості оливи та руйнування турбогенератора з викидом водню, пожежі воднево-оливної суміші.

Горіння оливи на відмітці обслуговування турбоустановки представляє серйозну небезпеку як для металоконструкцій кроквяних ферм кривлі, так і для несучих колон машинного залу, а також сприяє швидкому розповсюдженню пожежі в інші приміщення. Інтенсивне горіння турбінної оливи (температура спалахування близько 180⁰С) призводить до утворення щільних теплових потоків, що випромінюються факелом полум'я, температура якого сягає 1600⁰С. Швидкість збільшення площі пожежі при розтіканні турбінної оливи, що горить, може сягати 25 м²/хв. Дослідженнями встановлено, що при горінні турбінної оливи на площі 5 м² зниження видимості до 1 м в приміщенні відбувається протягом 5 хв. Найбільшою небезпекою для людей є токсичні продукти горіння. Через 0,5÷1 хв після виникнення пожежі в турбогенераторному залі гранично допустимі концентрації токсичних речовин в місцях перебування персоналу перевищують норму, видимість знижується до допустимої межі протягом 1,5÷3,5 хвилин, температура підвищується до небезпечних значень за 6÷8 хв [2]. Далекобійні струмені оливи і водню, що горять, швидко нагрівають елементи металевих ферм до критичної температури (500 – 550⁰С), що призводить до втрати несучої здатності і обвалення кривлі [1].

Пожежонебезпечними порушеннями в роботі устаткування газооливної системи турбогенератора з водневим охолодженням є втрата газощільності, через перебої оливопоста-

чання до ущільнень. Також неприпустимим є зниження до нуля перепаду тиску системи олива-водень, тобто зниження тиску ущільнюючої оливи до значення, що дорівнює тискові водню, а в найгіршому випадку – припинення подачі оливи.

Якщо виникла аварійна ситуація з газооливним ущільненням генератора, то найбільш дієвим способом запобігання розвитку такої аварії і зниження збитку є припинення надходження водню і оливи у вогнище спалаху за максимально короткий час. Це можливо, якщо здійснити прискорений аварійний викид водню з генератора в атмосферу. Викид водню має супроводжуватися подачею інертного газу в зону ущільнення. Після зниження тиску газу в генераторі до 0,05 МПа може бути припинена подача оливи в ущільнення. Ця процедура, від моменту виявлення аварійної ситуації до припинення витoku водню і оливи, триває до 7 хвилин. За цей час несучі металеві конструкції нагріваються до критичної температури, з подальшою втратою несучої здатності [2]. Тому дослідження вогнестійкості металевих несучих конструкцій машинних залів є надзвичайно актуальною проблемою.

Постановка задачі. Інтенсивність і величина нагріву несучих конструкцій машинних залів залежить від величини температури і величини теплового потоку, обумовлених пожежею. Своєю чергою, тепловий потік залежить від температури полум'я, його висоти і ширини, ступеня його чорноти та віддалі до конструкцій.

Дослідження нагріву конструкцій проведемо у дві стадії. Найбільш небезпечним є витікання водню з отвору приведений діаметр якого дорівнює 0,10 м. За таких умов висота факела полум'я сягає 18 м, а тривалість горіння менша за 30 с. При розмірах отвору більших за 0,10 м тривалість горіння значно зменшується, а при розмірах менших за 0,05 м, довжина факела полум'я водню не перевищує 1,5 м. Розміри полум'я визначаються головним чином швидкістю витікання газу. При довжині полум'я 18,0 м, металеві кроквяні ферми покрівлі віддалені від осередку пожежі на відстані 10 – 15 м, а несучі металеві колони – на 12 м. Ці конструкції можуть перебувати 20 с в середовищі з температурою 2000-2300 К. Коли водень повністю витече і вигорить, пожежа переходить в стадію горіння оливи. В цьому випадку висота полум'я зменшується до 13 м, а температура – до 1400 К [1, 2].

При дослідженні теплообміну випромінювання між факелом і будівельними конструкціями необхідно визначити долю енергії випромінювання факела, яка поглинається конструкцією. Якщо факел рухається вгору паралельно до колони, то цей потік визначається за формулою [4].

$$q = \varepsilon_{36} \cdot 5.67 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \phi_{2-1}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{36} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}$ – зведений ступінь чорноти системи полум'я–конструкція; ε_1 –

ступінь чорноти поверхні конструкції; ε_2 – ступінь чорноти факела полум'я; ϕ_{2-1} – частина повної енергії випромінювання факела, яка поглинається поверхнею несучої конструкції (кутовий коефіцієнт випромінювання); T_1 – температура поверхні конструкції, К; T_2 – температура факела, К.

Кутовий коефіцієнт випромінювання дорівнює [5]:

$$\phi_{2-1} = \frac{1}{2 \cdot \frac{c}{a}} \left(\sqrt{\left(\frac{b+c}{a} \right)^2 + 4} - \sqrt{\left(\frac{b-c}{a} \right)^2 + 4} \right), \quad (2)$$

де c – ширина факела, м, b – ширина конструкції, м, a – віддаль між ними, м.

За формулами (2) і (1) проведені розрахунки величини кутового коефіцієнта випромінювання ϕ_{2-1} та теплового потоку q залежно від віддалі a та величини температур T_1 і T_2 . Розрахунки проведені для горіння суміші водню з оливою з такими вихідними дани-

ми: $c = 3$ м, $b = 1,8$ м, $\varepsilon_1 = 0,9$, ступінь чорноти полум'я горіння воднево-оливної суміші рівний $\varepsilon_2 = 0,65$, а при горінні самої оливи – $\varepsilon_2 = 0,8$. Результати зображені графічно на рис. 1 і 2 відповідно.

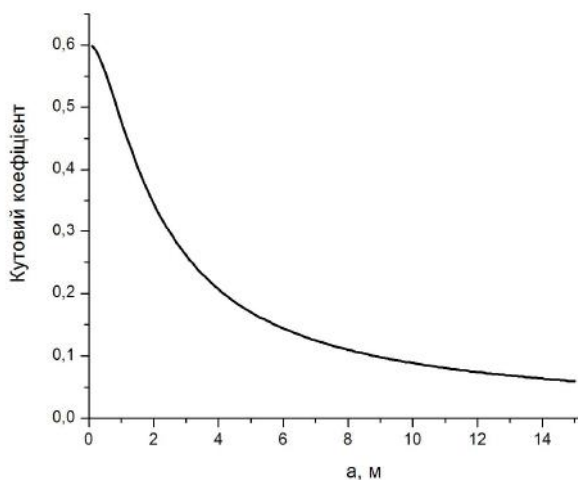


Рис. 1. Залежність величини кутового коефіцієнта випромінювання ϕ_{2-1} від віддалі полум'я до конструкції

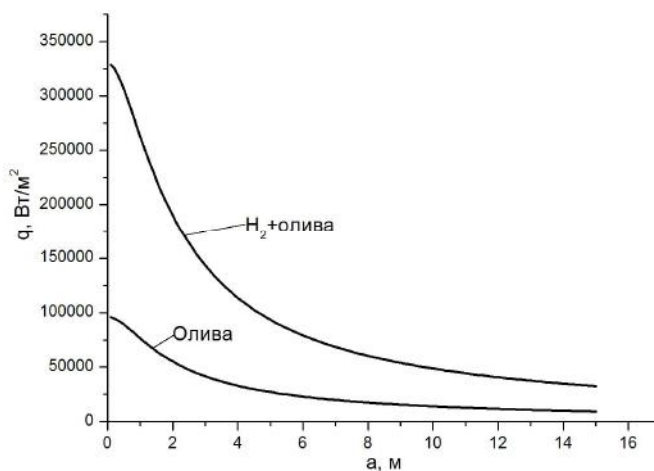


Рис. 2. Залежність величини теплового потоку від віддалі до конструкції за умов горіння воднево-оливної суміші (температура полум'я – 2000 К) та горіння оливи

Аналіз графічної залежності (рис. 1) показує, що кутовий коефіцієнт випромінювання ϕ_{2-1} різко зменшується при збільшенні відстані між полум'ям і конструкцією.

З аналізу графічних залежностей (рис. 2) випливає, що густина теплового потоку від горіння воднево-оливної суміші (температура полум'я $T=2000$ К) значно більша від густини теплового потоку горіння самої оливи (температура полум'я $T=1400$ К).

Порівнюючи одержані результати з дослідженнями, раніше проведеними в роботі [8], бачимо, що густина теплового потоку полум'я від горіння воднево-оливної суміші є значно більшою (рис. 2) ніж густина теплового потоку зумовленого горінням чистого водню (температура полум'я $T=2300$ К). Це обумовлено різними значеннями величини ступеня чорноти полум'я ε . При горінні водню $\varepsilon = 0,3$, а при горінні воднево-оливної суміші – $\varepsilon = 0,65$

Знаючи величину теплових потоків, які падають на несучі металеві конструкції, можемо визначити і дослідити їх процес нагріву в часі.

Дослідження нагріву металевих конструкцій. При дослідженні температури несучу металеву колону та металеву кроквяну ферму перекриття машзалу, які мають форму двотавра (висота балки $h = 1250$ мм, ширина полиць $b = 650$ мм, товщина стінки і полиці $d = 30$ мм) та тавра відповідно, змодельємо пластиною з приведеною товщиною 2δ , 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.

Початок координат системи $xO\tau$ помістимо в середній площині пластини. Вісь x лежить в площині перерізу пластини і перпендикулярна до площини стінки двотаврової балки.

Умову задачі математично можемо сформулювати таким чином. Маємо диференціальне рівняння теплопровідності [6, 7]:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (\tau > 0; -\delta < x < +\delta), \quad (3)$$

і крайові умови:

$$-\frac{\partial t(\delta, \tau)}{\partial x} + \frac{q}{\lambda} = 0, \quad t(x, 0) = t_0 = const, \quad \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

де $t(x, \tau)$ – нестационарна температура в поперечному перерізі пластини, $^{\circ}C$; $\pm \delta$ – бокові поверхні пластини; $a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, m^2 / c ; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м \cdot К}$; c_v – питома ізохорна теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$; ρ – густина тіла, $\frac{кг}{м^3}$; q – тепловий потік від полум'я пожежі, який поглинається пластиною, $\frac{Вт}{м^2}$, τ – час, c .

Застосувавши перетворення Лапласа, знаходимо рішення задачі у вигляді

$$t(x, \tau) - t_0 = \frac{q}{\lambda} \left[\frac{a \cdot \tau}{\delta} - \frac{\delta^2 - 3x^2}{6\delta} + \delta \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{2}{\mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 Fo) \right], \quad (5)$$

де $\mu_n = n\pi$ – характеристичні числа; $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ – критерій Фур'є.

За формулою (5) проведені дослідження температурного поля в металевих крокв'яних фермах перекриття та несучих колонах. При розрахунках ми враховували реальні товщини конструкцій. Приведена товщина конструкції дорівнює $2\delta = 30$ мм. Початкова температура конструкції $t_0 = 30^{\circ}C$. Дослідження проводились для температури факела T_2 дорівнює $2000 K$ (горіння воднево-оливної суміші) та T_2 дорівнює $1400 K$ (горіння оливи). Результати розрахунку зображені графічно на рис. 2 і 3.

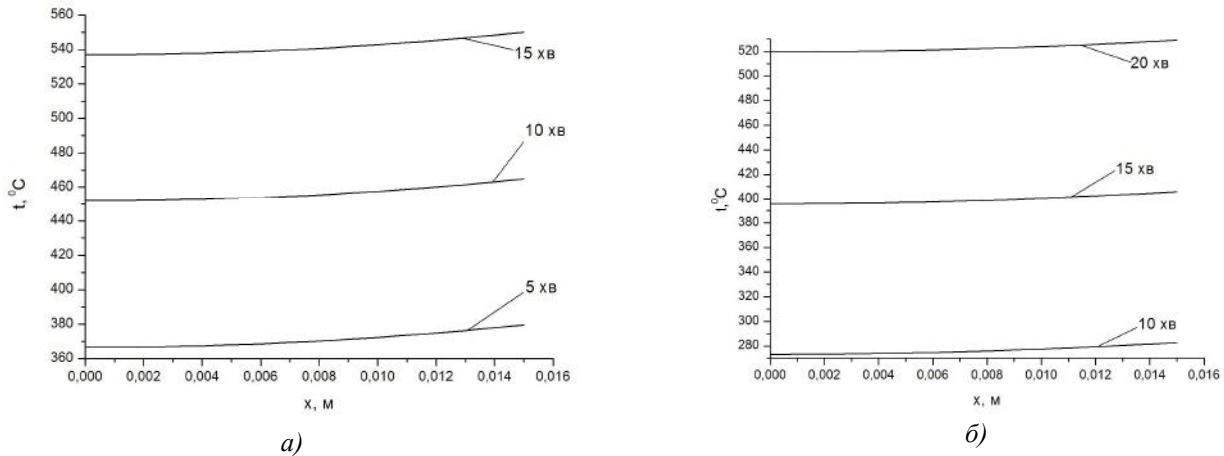


Рис. 3. Залежність величини температури в перерізі металеві ферми перекриття залежно від часу і віддалі до полум'я пожежі за умов горіння самої оливи ($T_2 = 1400 K$): а) при відстані до полум'я 10 м; б) при відстані до полум'я 15 м

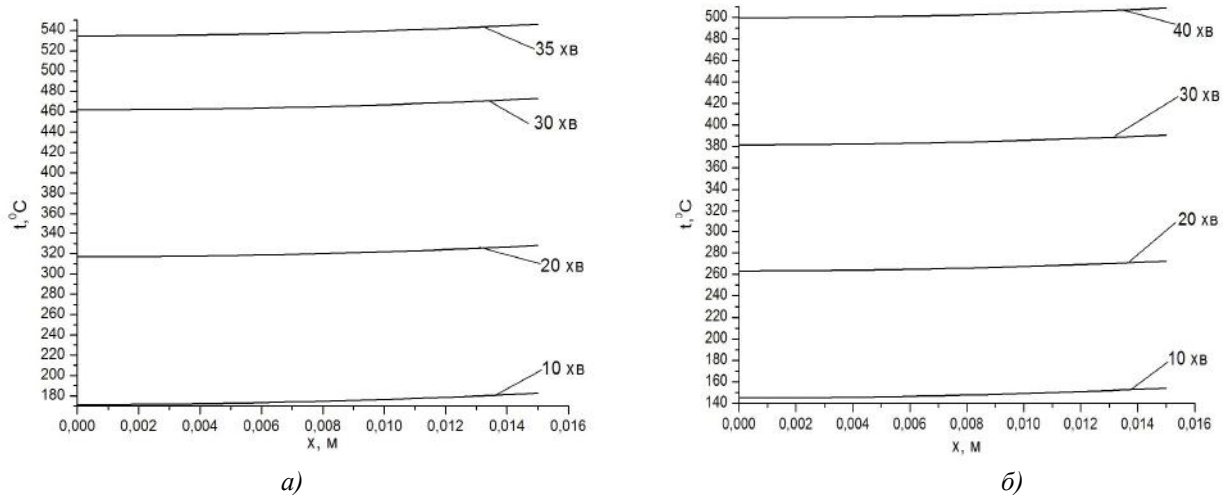


Рис. 4. Залежність величини температури від часу і віддалі до полум'я в перерізі металеві колони за умов горіння оливи ($T_2 = 1400 \text{ K}$): а) при відстані до полум'я 5 м; б) при відстані до полум'я 10 м

Аналіз графічних залежностей (рис. 3) показує, що під час горіння самої оливи температура полум'я якої дорівнює 1400 K і факел полум'я знаходиться на віддалі 10 м від металеві ферми покрівлі, вогнестійкість конструкцією втрачається за 15 хвилин, якщо віддаль становить 15 м, то вогнестійкість втрачається за 20 хв.

Аналіз графіків (рис. 4) показує, що під час горіння оливи з температурою полум'я 1400 K і віддалю між факелом полум'я і несучою металеві колоною дорівнює 5 м, вогнестійкість конструкції втрачається за 35 хвилин, якщо віддаль між факелом і колоною дорівнює 10 м – 40 хв.

Висновок:

1. Металеві несучі колони, незахищені вогнезахисним покриттям, при горінні оливи, факел горіння якої наближається до колони на відділь 5 м нагрівається до критичної температури ($500 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$) за час 35 хвилин.
2. Конструкції металевих кроквяних ферм при горінні воднево-оливної суміші нагріваються до критичної температури ($500 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$) за 15 хвилин.
3. Для підвищення вогнестійкості несучих металевих конструкцій стропильних ферм перекриття машинних залів АЕС при можливому екстремальному горінні суміші водню і оливи та самої оливи необхідно покрити конструкції вогнезахисними фарбами, що спучуються.

Література:

1. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Голоднова О.С. О факторах, способствующих повышению риска крупных техногенных аварий. Вести в электроэнергетике 2010; № 1. – С. 3-10.
3. Типовая инструкция по эксплуатации газомасляной системы водородного охлаждения генераторов. РД 153-34.0-45.512-97. М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
4. Р. Зигель. Теплообмен излучением/ Р.Зигель, Дж.Хауэлл. – М.: Изд. "МИР". – 918.
5. Романенко П.Н., Бубырь Н.Ф., Башкирцев М.П. Теплопередача в пожарном деле. М.: ВШ МВД СССР, 1969. – 425 с.
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
7. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
8. М.М. Семерак. Термостійкість несучих конструкцій машинних залів АЕС при горінні водню / Пожежна безпека: Збірник наукових праць. – Львів: ЛДУБЖД, 2011. – № 19. – С. 1-7.

М.М. Семерак, А.В. Субота, В.М. Новак, В.М. Байтала

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕСУЩИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ МАШИННЫХ ЗАЛОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Проанализированы причины возникновения и протекания пожаров в машинных залах электростанций. Рассмотрен процесс горения водорода и водородно-масляных смесей в машинных залах при условиях пожара. Проанализированы наиболее достоверные места возникновения пожароопасных концентраций смесей водорода с маслом. Разработана методика исследования тепловых процессов, протекающих во время пожара. Определены температурные потоки, обусловленные излучением факела пожара. Исследовано температурное поле по толщине металлической конструкции в зависимости от величины теплового потока, толщины конструкции и огнезащитного покрытия, их теплофизических характеристик. Показано, что огнезащитные вспучивающиеся покрытия значительно повышают огнестойкость несущих конструкций машинных залов.

Ключевые слова: машинные залы электростанций, горения водорода и водородно-масляной смеси, тепловые потоки, температурное поле, турбогенератор, несущие металлические конструкции машинных залов.

M.M. Semerak, A.V. Subota, V.N. Novak, V.M. Baytala

MATHEMATICAL DESIGN OF FIRE-RESISTANCE OF BEARING METAL CON- STRUCTIONS OF MACHINE HALLS OF POWER-STATIONS

Reasons of fire origins and their progress in the machine halls of electric power stations are analyzed. The burning process of hydrogen and hydrogen-oil mixtures in machine halls in conditions of fire is considered. The most possible places of origin of fire risk concentrations of mixtures of hydrogen-oil-air are analyzed. The research method of thermal processes which appear during fires is developed. Temperature flows caused by irradiation of fire are determined. Temperature field is investigated according to thickness of metal construction depending on thermal flow rate, thickness of construction, fire resistance coating and their thermal physical features. It is shown that bulged fire proof surface can increase the fire-resistance of bearing constructions of machine halls.

Key words: machine halls of power-stations, burning of hydrogen and hydrogen-oil mixture, thermal flows, temperature field, turbogenerator, bearing metal constructions of machine halls.

