

*М.М. Семерак, д-р техн. наук, професор, В.В. Ковалишин, канд. техн. наук, доцент,
А.М. Домінік, Я.Б. Кирилів, канд. техн. наук
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ТЕРМОСТІЙКІСТЬ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ МАШИННИХ ЗАЛІВ АЕС ПРИ ГОРІННІ ВОДНЮ

Розглядаються проблеми, які виникають при горінні водню в машинних залах об'єктів енергетики, зокрема в залах атомних електричних станцій, наводиться характеристика машинного залу і несучих конструкцій. Описуються параметри пожежі при горінні водню. Визначено температурні потоки, зумовлені випромінюванням факела пожежі. Визначено аналітичні залежності для знаходження температурного поля в несучих конструкціях при дії теплових потоків.

Ключові слова: машинні зали АЕС, пожежа, водень, несучі конструкції, термостійкість.

Постановка проблеми. Машинні зали об'єктів енергетики: атомних електричних станцій (АЕС), теплових електричних станцій (ТЕС) і державних районних електричних станцій (ДРЕС) є одноповерховими будівлями. За висотою розділяються на два приміщення. В верхньому приміщенні встановлюються турбоагрегати, в нижньому – конденсаційному – розміщують конденсатори, дренажні та інші насоси і допоміжне обладнання. Під підлогою конденсаційного приміщення влаштовують підвал глибиною 3–4 м, в якому розміщують насоси, електричні кабелі та інші лінії комунікації. Турбоагрегати в машинному залі компонується за “острівним” принципом. Між верхнім приміщенням турбогенераторів і нижнім – конденсаційним, суцільного перекриття не роблять, а навколо турбогенераторів влаштовують майданчики, які з'єднані між собою поздовжніми проходами вздовж стіни машинного залу.

Майданчики обслуговування, залежно від типу турбіни, можуть знаходитися на висоті від 7 до 15,6 м від підлоги конденсаційного приміщення. Поперечні розміри залу становлять від 28 до 54 м залежно від типу турбогенератора, поздовжні – до 300 м. Віддаль від підлоги до кроквяних ферм перекриття становить 21–25,5 м.

Несучі конструкції АЕС і ТЕС це колони і ферми перекриття виконані із металевого прокату. Віддалі між осями колон машинного залу в поздовжньому напрямку становить 6 або 12 метрів. Машинні зали АЕС ВВЕР-440, в яких, як правило, розміщують 4 (по два на енергоблок) турбогенератори, розташовані вздовж машзалу. Довжина машзалу становить 260 м, ширина 40 м. Майданчик обслуговування турбіни розташований на відмітці 9,5 м. Відмітка низу кроквяних ферм перекриття 25,5 м. Позначка покриття машзалу у верхній точці 29,2 м. Несучі конструкції колон в поздовжньому напрямку мають крок 12 м. Колони двотаврового перерізу, стінки двотавра 1279x25 мм, ширина полиць 560 мм, товщина 25–30 мм.

Кроквяні ферми мають змінну висоту з ухилом верхнього поясу в обидві сторони від центра 1:10. Нижній пояс таврового перерізу з двох кутників 160x100 мм, верхній пояс – тавр з двох кутників перерізом 150x10 мм, розкоси – з кутників 140x9 мм і 125x8 мм, стійки – кутник 125x8 мм і 110x7 мм. Покрівельне покриття – з типових покрівельних панелей.

Вентиляція машзалу природна, повітрообмін на початковій стадії пожежі (до руйнування шибок у вікнах) можливий через нещільність транспортного отвору в торці машзалу і через розташований на покрівлі, вздовж машинного залу по його осі, світло-аераційний ліхтар з розмірами: довжина 108 м, ширина 6 м, висота 3 м. Загальна площа вентиляційних отворів 650 м².

У нормативних документах вимоги щодо забезпечення пожежної та техногенної безпеки АЕС і ТЕС різні, але пожежна небезпека їх машинних залів є майже подібною. Про те слід зауважити, що наслідки пожеж на об'єктах АЕС є значно важчими, порівняно з ТЕС [1,2].

Згідно зі статистичними даними, за період з 1965 року і до сьогодні (враховуючи катастрофу в Японії на АЕС “Фукусіма-1”) у машинних залах АЕС і ТЕС усього світу з турбогенераторами потужністю 50 МВт і більше зафіксовано понад сто аварійних ситуацій. З них пожеж – 35, вибухів – 6, вибухів з пожежами – 6. У 24-х випадках пожежі супроводжувалися

обваленням покрівлі машзалу, травмуванням обслуговуючого персоналу, пожежників та пошкодженням технологічного обладнання.

Основним джерелом виникнення пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС є система водневого охолодження статора генератора і система мащення генератора [3, 4].

Сьогодні практично на всіх атомних електростанціях світу для якісного охолодження турбогенераторів потужності понад 50 МВт використовується система водневого охолодження.

Охолодження воднем, що циркулює в статорі генератора, здійснюється в чотирьох газоохолоджувачах. Для запобігання витоку водню з корпусу статора передбачається оливне ущільнення вала генератора кільцевого типу. Турбогенератор має систему мащення опорних підшипників, яка за допомогою оливних насосів постійно подає оливу під тиском до підшипникових вузлів, забезпечуючи при цьому їх ущільнення. Оливне ущільнення опорних підшипників запобігає витіканню водню з системи охолодження генератора в машзал. З цією метою тиск оливи в ущільненні підтримується вищим від тиску водню. При нормальній експлуатації генератора надлишковий тиск водню дорівнює 0,3-0,4 МПа, а тиск оливи на 0,07-0,08 МПа більший.

Підвишена пожежна небезпека машинних залів АЕС і ТЕС визначається, головним чином, можливістю виникнення аварійних ситуацій турбоагрегатів з викидом і наступним займанням великої кількості водню та оливи. Цьому сприяє також фізичне зношування технологічного устаткування, його неякісний ремонт, помилки обслуговуючого персоналу, відсутність досконалих засобів виявлення і гасіння пожежі [2].

Згідно з довідковими даними вибухонебезпечні властивості водневої суміші з повітрям характеризується такими даними: область займання 4,12 – 75,4 % обсягу, мінімальна енергія запалювання – 0,017 МДж, температура самозаймання – 783К, максимальна нормальна швидкість горіння в повітрі – 2,7 м/с, мольна теплота згоряння – 241,6 кДж/моль, максимальний тиск вибуху – 730 кПа, мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню – 5 % об'єму.

Інтенсивне горіння водню і турбінної оливи приводить до утворення щільних теплових потоків, які зумовлюються випромінюванням факела полум'я, який може досягати висоти 25 м. Температура факела понад 2000 °С. При локальній дії висхідних потоків проходить нагрів незахищених металевих конструкцій до критичної температури (500 °С), при цьому втрата несучої здатності конструкцій може наступити значно раніше від проектного значення (15 хв).

У зв'язку з вищенаведеними фактами машинні зали АЕС та ТЕС можна віднести до найвищої категорії за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

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

Як розрахунковий варіант пожежі водню приймаються варіанти факельного горіння водню з параметрами: висота факела 25,0 м і 12,0 м, відповідно тривалість горіння – 20,0 і 90,0 с. Розміри отвору, з якого надходить водень з корпусу генератора, від 0,05 м до 0,10 м. При розмірах отвору більших за 0,10 м тривалість горіння мала, 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 25,0 м конструкції віддалені від осередку пожежі на відстань 18,0-25,0 м (конструкції покрівельного покриття) або 12 м (колони), будуть перебувати протягом 20,0 с в середовищі з температурою понад 2000 °С.

При дослідженні теплообміну випромінювання між факелом і будівельними конструкціями необхідно визначити долю енергії випромінювання факела, яка поглинається конструкцією. Якщо факел рухається вгору паралельно колоні, то цей потік визначається за формулою [5].

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

де $\varepsilon_{\text{ж}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$ – зведений ступінь чорноти системи полум'я–колона;

ε_1 – ступінь чорноти поверхні колони;

ε_2 – ступінь чорноти факела;

ϕ_{2-1} – частина повної енергії випромінювання факела, яка поглинається поверхнею несучої колони (кутовий коефіцієнт випромінювання);

T_1 – температура поверхні колони, K ;

T_2 – температура факела, K (рис. 1).

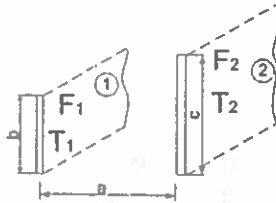


Рис. 1. Схема взаємного розміщення колони "1" і факела "2"

Якщо ширина факела дорівнює c , ширина колони – b , а віддаль між ними – a , то кутовий коефіцієнт випромінювання дорівнює:

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

За формулою (1) проведені розрахунки величини теплового потоку залежно від віддалі a та величини температури T_1 і T_2 . Розрахунки проведені для $c = 3$ м, $b = 1,8$ м, $\varepsilon_1 = 0,3$, $\varepsilon_2 = 0,9$. Результати зображені графічно на рис. 2.

Аналіз проведених досліджень показує, що величина теплового потоку, що падає на колону, значною мірою залежить від температури полум'я та чорноти поверхонь колони і факела. При збільшенні віддалі між колоною і факелом величина теплового потоку різко зменшується.

Знаючи величину теплових потоків, які падають на колону, можемо визначити і дослідити процес нагріву колони в часі.

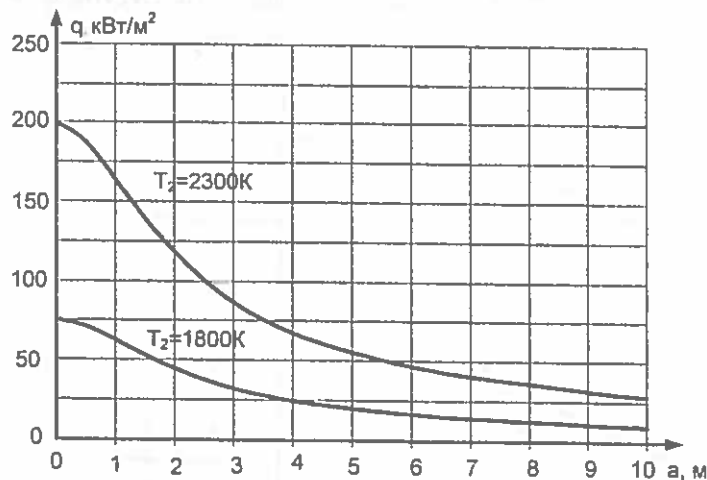


Рис. 2. Залежність величини теплового потоку від віддалі до конструкції

Дослідження нагріву колони. Несучу металеву колону машзалау, яка має форму двотавра, змодельюємо пластиною з приведеною товщиною 2δ , температура якої рівна T_0 . З деякого часу, який прийемо за початок відліку $\tau = 0$, колона з обох боків нагрівається тепловим потоком q . Необхідно знайти розподіл температури по товщині пластини в будь-який момент часу.

Початок координат помістимо в середній площині пластини.

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

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

За умови $T(x, 0) = T_0 = const,$ (4)

$$-\frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} + \frac{q}{\lambda} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (6)$$

Застосувавши перетворення Лапласа знаходимо рішення задачі у вигляді

$$T(x, \tau) - T_0 = \frac{q}{\lambda} \left[\frac{a\tau}{\delta} - \frac{\delta^2 - 3x^2}{6\delta} + \delta \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{2}{\mu_n^2} \cos \mu_n \frac{x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 Fo) \right], \quad (7)$$

де $\mu_n = n\pi$ – характеристичні числа;

$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ – критерій Фур'є;

$a = \frac{\lambda}{c_v \cdot \rho}$ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{M^2}{c}$;

λ – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

c_v – питома ізохорна теплоємність, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$;

ρ – густина тіла, $\frac{кг}{м^3}$.

За формулою (7) проведено дослідження температурного поля в металевій колоні. При розрахунках прийнято, що приведена товщина колони $2\delta = 30$ мм. Початкова температура колони $T_0 = 30$ °С. Дослідження проводились для температури факела T_2 рівній 1800 К і 2300 К. Результати розрахунку зображені графічно на рисунках 3 і 4.

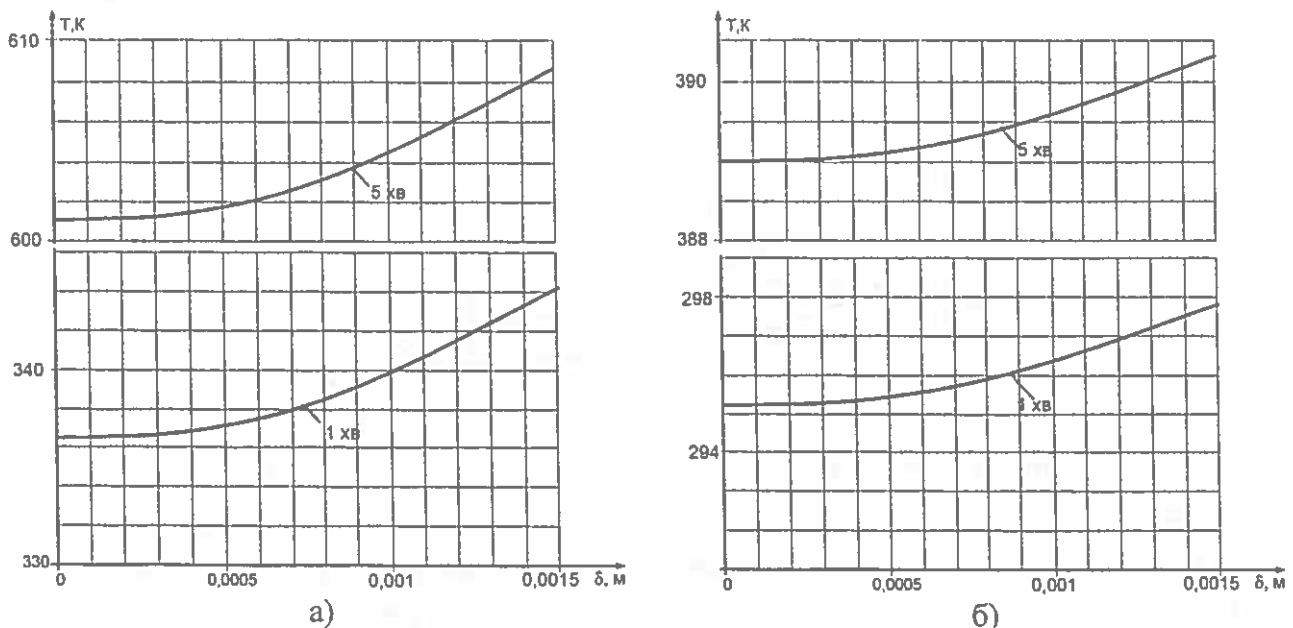


Рис. 3. Залежність величини температури в перерізі конструкції залежно від часу і віддалі до джерела теплоти при $T_2 = 1800 K$:

а) при відстані до джерела теплоти 1 м; б) при відстані до джерела теплоти 5 м

Аналіз графіків (рис.3) показує, що в екстремальних випадках, коли полум'я пожежі ($T_2 = 1800K$) знаходиться на віддалі 1м від металевої конструкції, вогнестійкість втрачається за 4 хв, а на віддалі 5м – за 8 хв. Якщо температура полум'я рівна $2300K$ то втрага вогнестійкості конструкції наступає за 1,5 хвилини при віддалі до полум'я 1 м, і за чотири хвилини при віддалі до полум'я 5 м (рис.4).

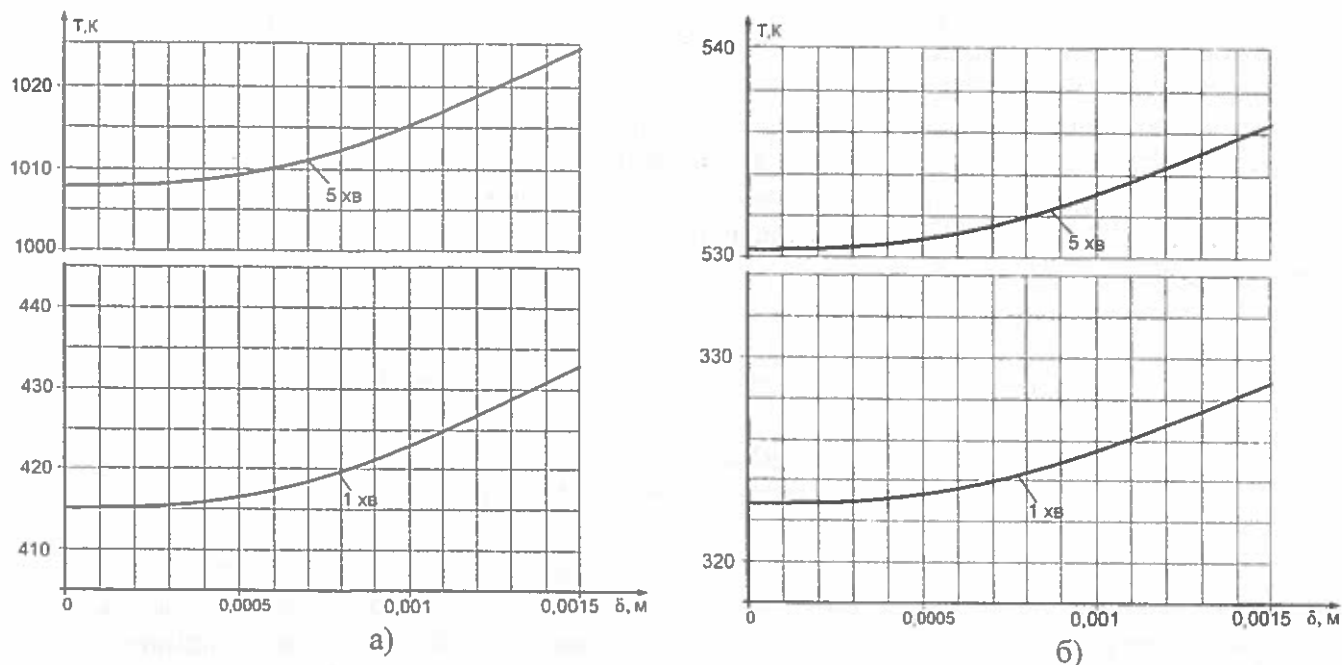


Рис. 4. Залежність величини температури в перерізі конструкції залежно від часу і віддалі до джерела теплоти при $T_2 = 2300K$:

а) при відстані до джерела теплоти 1 м; б) при відстані до джерела теплоти 5 м

Висновок. Для підвищення вогнестійкості песучих металевих конструкцій машинних залів АЕС, при можливому екстремальному горінні водню, необхідно конструкцію покрити вогнезахисними фарбами.

Список літератури

1. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Жаров А.П. Противопожарная система для турбогенераторов энергоблоков ТЭС / Жаров А.П., Беликов Н.З., Келлер В.Д., Ржевников Ю.В., Комаров В.А. // Электрические станции – 2001. – №6.
3. Руководство МАГАТЭ по безопасности № 50-SG-D2. Противопожарная защита на атомных электростанциях, МАГАТЭ, Вена, 1998.
4. ВСН 01-87. Противопожарные нормы проектирования атомных станций, М.: Минатом, 1987.
5. Романенко П.Н., Бубырь Н.Ф., Башкирцев М.П. Теплопередача в пожарном деле. М.: ВШ МВД СССР, 1969. – 425 с.
6. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

М.М. Семерак, В.В. Ковальшин, А.М. Доминик, Я.Б. Кырылив

ТЕРМОСТОЙКОСТЬ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦИЙ МАШИННЫХ ЗАЛОВ АЭС ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА

Рассматриваются проблемы, возникающие во время горения водорода в машинных залах объектов энергетики, в частности в залах атомных электрических станций, приводится характеристика машинного зала и несущих конструкций. Описываются параметры пожара при горении водорода. Определены температурные потоки, обусловленные излучением факела пожара. Определены аналитические зависимости для нахождения температурного поля в несущих конструкциях при воздействии тепловых потоков.

Ключевые слова: пожар, несущие конструкции, машинные залы АЭС, водород, термостойкость.

M.M. Semerak, V.V. Kovalyshyn, A.M. Dominik, Ya.B. Kyrlyiv

HEAT-RESISTANT BEARING STRUCTURES ENGINE ROOMS NPP DURING COMBUSTION HYDROGEN

The article deals with the problems that arise during the combustion of hydrogen in the engine rooms of energy facilities, particularly in the halls of nuclear power stations to provide characteristics of the turbine hall and supporting structures. The parameters of fire by hydrogen burning are described. The temperature flows caused by radiation torch fire are defined. The analytical dependence for finding the temperature field in the supporting structure under the action of heat fluxes is found.

Key words: fire, supporting structures and machine halls NPS, hydrogen, heat resistance.

