

SECTION 10. METALLURGY AND ENERGY**10.1 Умови виникнення пожеж під час витоку водню і його вплив на стійкість будівельних конструкцій машзалу АЕС**

Однією із основних причин аварійних зупинок та руйнувань турбогенераторів, синхронних компенсаторів та електричних машин великої потужності, що охолоджуються газами, зокрема воднем, як у нашій країні, так і за кордоном, є інтенсивне забруднення охолоджуючого водню вологою з вмістом домішок кисню та турбінного мастила. Основними домішками, що можуть потрапити до корпусу генератора, є вода (з максимальною концентрацією 25 – 30 г/м³), кисень (0,2 г/м³), турбінне мастило (5,0 г/м³), водневомастильні аерозолі (0,15 г/ м³), тощо [575, 576].

Тільки за останні роки на електростанціях країн Європи сталося 28 аварій із руйнуванням турбогенераторів, що охолоджуються воднем. Причинами понад 90 % таких аварій є невірні дії обслуговуючого персоналу, який не дотримується правил експлуатації обладнання газомастильних систем турбогенераторів, а також встановленого порядку проведення вогневих ремонтних робіт.

На електростанціях мали місце ряд великих аварій з пожежею та частковим руйнуванням машзалу внаслідок горіння водню та мастила. Незважаючи на те, що причиною цих аварій не є порушення роботи газомастильної системи та ущільнень валу генератора, а, як правило, відбулось зростання вібрації валу та пошкодження підшипників, однак катастрофічний розвиток аварії відбувався саме внаслідок витоку і загорання водню та мастила після механічного пошкодження вузла ущільнень та кріплення зовнішніх щитків генератора.

Газова система турбогенератора має спеціальне обладнання, що дає можливість здійснювати безпечне заповнення генератора воднем та його видалення шляхом використання у якості проміжного агента інертного газу: видаляється інертним газом, потім повітрям, а повітря аналогічно видаляється інертним газом, потім воднем. За помилкового виконання цих операцій та відсутності контролю за складом газової суміші також можуть утворюватися

вибухонебезпечні суміші в корпусі генератора, поплавковому гідрозатворі, баці продувки. Водень може потрапляти до картерів підшипників, шинопроводів, системи охолодження обмотки статора дистилятом, водяної системи газоохолоджувачів, та, накопичуючись, за визначеного відсоткового вмісту також утворює вибухонебезпечне середовище.

Займання можливе у будь яких місцях, де відбуваються витoki водню із корпусу генератора або газомасильної системи. Ступінь небезпеки визначається місцем витoku, близькістю людей та можливістю їхнього травмування, кількістю водню, що викидається, та можливістю запобігання подальшого горіння без зупинки турбоагрегату.

Пожежі відбуваються за значних витоків водню, частіше всього пов'язаних з повним або частковим руйнуванням генератора, або за значних витоків мастила. Горіння водню завжди супроводжується горінням мастила. Займання ж мастила ззовні генератора за його цілісності не призводить до займання водню.

Вибух у корпусі призупиненого генератора можливий лише внаслідок грубого порушення правил витіснення та заміни газового середовища у сполученні з несвоєчасним виконанням та низькою якістю аналізу вмісту водню в газовій суміші.

Аналіз причин аварій та аварійних ситуацій на турбогенераторах з водневою системою охолодження дав можливість виділити основні причини та місця виникнення аварій:

- утворення тріщин в ущільненнях прокладок генератора (водень виходить через нещільності до машзалу внаслідок збільшення підживлення генератора воднем);
- утворення тріщин у гумових прокладках газоохолоджувача (водень виходить через нещільності до машзалу внаслідок збільшення витрати водню);
- зниження тиску водню у корпусі генератора внаслідок значних витоків водню разом з мастилом через роз'ємні з'єднання зливного трубопроводу мастила;

- порушення вимог безпеки під час відбору проб газу (під час відкривання вентиля газового поста можливі витіки та займання водню);
- накопичення воднево-повітряної суміші у картері підшипника та під захисною обшивкою генератора;
- неякісний ремонт ущільнень, що зумовлює надходження мастила до генератора;
- розрив гумової ущільнюючої прокладки люка генератора;
- пошкодження і розгерметизація зовнішніх щитків генератора внаслідок виходу із ладу валу (відрив лопаток турбіни з наступною вібрацією).

Аналізом статистичних даних аварій на турбогенераторах було встановлено, що у більшості випадків причиною аварій та аварійних ситуацій є зниження перепаду тиску мастила та водню. До зниження перепаду тиску мастила та водню призводять:

- відмова або помилкові перемикання джерел мастилопостачання;
- неякісний ремонт або невірне налаштування регулювання перепаду тиску мастила і водню;
- помилкове перекриття вентиля (засувки) на напірних трубопроводах від джерел мастилопостачання до регулятора перепаду тиску і далі після регулятора до ущільнень;
- зростання гідравлічного опору на напірних трубопроводах від джерел мастилопостачання до регулятора перепаду тиску і далі після регулятора до ущільнень (забруднення тощо);
- порушення мастилощільності на будь якій ділянці напірних трубопроводів;
- значна витрата мастила.

Порушення в роботі обладнання газомасильної системи, що супроводжуються витіками водню та його загорянням, поділяються таким чином [577]:

- витіки через фланцеві з'єднання трубопроводів та штуцери – 20%;

- деформація ущільнюючих гумових прокладок (кришки люку, фланцю корпусу генератора, між корпусом ущільнення та зовнішнім щитком тощо) – 20%;
- прорив через поплавковий гідрозатвор – 10%;
- витoki та самозаймання водню за різкого відкривання вентиля на газовому посту – 10%;
- витoki через ущільнюючі гумові прокладки газоохолоджувачів – 10 %;
- витoki через прорив в картері підшипників – 9 %;
- витoki через зварні з'єднання трубопроводів – 6 %;
- витoki через фланцеві з'єднання поплавкового гідрозатвору – 6 %;
- порушення роботи регуляторів перепаду тиску мастила та водню – 6 %;
- витoki через горизонтальні роз'єми торцевих щитків – 3 %.

Частка випадків витоків водню, що супроводжуються вибухами водню, складає понад 15 %.

Просочування водню вздовж валу через нещільності також можливе і за нормального перепаду тиску мастила та водню – через перекося або пошкодження, заклинювання вкладиша ущільнення за неякісного ремонту ущільнень та подачі забрудненого мастила. Просочування водню через поплавковий гідрозатвор до зливної системи підшипників турбоагрегату через дефект клапана гідрозатвору, що зависає у відкритому положенні, досить небезпечний. Вибухи водневої системи охолодження генераторів, що виникають під час пожежі у машзалі, призводять до руйнування мастилопроводів та до розтікання мастила по майданчикам і на нульовій відмітці, сусідніх агрегатах, до кабельних тунелів тощо. За умов пожежі створюється небезпека обладнання і трубопроводів, що працюють під високим тиском.

Таким чином, найбільш пожежонебезпечними порушеннями під час експлуатації турбогенераторів з водневою системою охолодження є порушення, що супроводжуються втратою газощільності. Найбільш небезпечним є вихід водню до зливного мастилопроводу та до картерів підшипників: вздовж валу через ущільнення; через поплавковий гідрозатвор.

До основних причин пожежовибухонебезпеки турбогенераторів варто віднести: використання великої кількості горючих речовин та матеріалів, підвищення тиску мастила в системах регулювання, збільшення довжини мастилопроводів, ускладнення схеми регулювання і захисту, підвищення температури паропроводів, корпусу турбін тощо.

Встановлені на діючих АЕС України турбогенератори потужністю 220 і 1000 МВт також обладнані системою водневого охолодження. Використання водню у якості охолоджувального середовища у цих турбогенераторах зумовлено такими факторами [577]:

- підвищення одиничної потужності турбогенераторів за рахунок зростання їхніх габаритів обмежено величиною граничних механічних навантажень на елементи ротора;
- для подальшого підвищення потужності необхідне підвищення густини струму в обмотках і інтенсифікація охолодження;
- для інтенсифікації охолодження необхідне використання більш ефективного охолоджувального агента – водню, теплопровідність якого в 6 – 7 разів є більшою ніж теплопровідність повітря;
- застосування водню забезпечує також зменшення вентиляційних втрат завдяки його значно меншій густині порівняно із повітрям.

Система водневого охолодження є єдиною можливою системою охолодження для турбогенераторів великої потужності. Застосування цієї системи пов'язано із необхідністю створення спеціальної мастилосистеми для подачі мастила до ущільнень турбогенератора, що перешкоджає протіканням водню із корпусу через ущільнення вала. Разом з тим, застосування мастила сприяє підвищенню пожежної безпеки у турбінному відділенні.

Підвищення тиску водню зі зростанням потужності турбогенератора пояснюється тим, що у разі зростання тиску підвищується теплопровідність водню.

Нормативним документом [578] регламентується, крім чистоти водню, також і вміст кисню в водні, що знаходиться в корпусі турбогенератора (0,8 – 1,2

% залежно від тиску), коливання тиску водню в корпусі – не більше ± 20 кПа (за тиску більше 0,1 МПа) і допустимі добові витoki водню – не більше 5 % від загальної кількості газу за робочого тиску.

Подача водню для заповнення корпусів турбогенераторів здійснюється із загально-станційного трубопроводу через спеціальний управляючий вузол. Спустошення корпусів від водню у разі виведення турбогенератора в ремонт також здійснюється через цей вузол. Діаметр трубопроводів підведення водню складає 25 мм, скидання водню у атмосферу – 50 мм. Для витіснення водню із корпусу турбогенератора і заповнення його після скидання водню передбачено підведення нейтрального газу – азоту з метою убезпечення від утворення вибухонебезпечної суміші водню з повітрям.

Досвід експлуатації енергоблоків ТЕС і АЕС, на яких встановлені турбогенератори з водневим охолодженням, показав, що мали місце неодноразові порушення з виходом водню із корпусу турбогенератора. Ці порушення можна розділити за причинами їх виникнення на:

- протікання водню внаслідок видавлювання ущільнювальних прокладок між корпусом ущільнення і зовнішнім щитом або прокладкою кришки люка і фланця корпусу;
- протікання водню внаслідок часткового руйнування прокладок в горизонтальних роз'ємах торцевих щитів;
- протікання водню в картерах підшипників;
- протікання водню в зоні торцевого щита і корпусу ущільнення із-за руйнування ущільнень.

Більшість порушень не супроводжувалось загоранням або воно носило локальний характер і не мало серйозних наслідків із-за малих витрат горючих компонентів. Найбільш небезпечними порушеннями з аварійними наслідками є протікання водню внаслідок руйнування газомасильних ущільнень.

Причиною таких аварій є лавиноподібне підвищення вібрації валопроводу над допустимі межі внаслідок обриву лопаток, яке призвело до руйнування ущільнень і інтенсивного виходу водню із корпусу турбогенератора. У цьому

випадку відбувається горіння водню. У випадку змішування водню, що горить, з турбінними мастилом, що витікає із зруйнованих внаслідок вібрації мастилосистем, утворюється газомастильний факел з дуже високою температурою – більше 2000 °С, висота якого сягала металевих ферм і інших металлоконструкцій даху машзалу. Внаслідок дії такої температури металлоконструкції втрачали стійкість і відбувався її обвал. Ліквідація наслідків руйнування вимагала значних затрат і тривалого простоювання енергоблоку.

Статистика подібних аварій показує, що основною причиною виникнення пожежі в газомастильних ущільненнях турбогенератора є підвищення допустимих меж вібрації валопроводу, що призводить до руйнування ущільнень і витіканню водню, а також до протікання ущільнювального мастила. Водень, що виходить із корпусу турбогенератора, може за визначених умов спалахувати і утворювати горючий факел. Область спалахування суміші водню з повітрям 4,12 – 75,4 % об'єму, мінімальна енергія запалювання 0,002 МДж, температура samozapalювання 510 °С [579, 580, 581]. У випадку попадання ущільнювального мастила в факел згораючого водню мастило, що має температуру запалювання 210 – 220 °С, також загорасться і в результаті утворюється газомастильний факел з дуже високою температурою в його ядрі. Висота факела залежить від швидкості витікання газу, розмірів отвору, а також фізичних характеристик горючого продукту. Швидкість витікання визначається за загальними законами гідродинаміки залежно від різниці тиску водню в корпусі турбогенератора і в навколишньому середовищі, коефіцієнта витрати через аварійний отвір і густини газу. Час витікання залежить від об'єму газу в корпусі і швидкості витікання. Результати виконаних розрахунків для турбогенератора ТВВ-220-2АУЗ з об'ємом газу 73,0 м³ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика факельного горіння водню для турбогенератора
ТВВ-220-2ФУЗ

Назва параметра	Діаметр отвору, мм				
	5	10	50	100	200
Висота факела, м	1,15	2,3	11,5	23	46
Тривалість горіння, с	8850	2212	89	22	6
Швидкість витікання, м/с	420	420	418	413	387

Аналіз сучасного стану проблем, пов'язаних із 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 (турбінне мастило $T = 1400$ К, водень $T = 2200$ К). Інтенсивність теплового потоку за таких температур сягає $300 - 450$ кВт/м². Режими вогневої дії у випадку пожеж на цих об'єктах суттєво відрізняються від «стандартного температурного режиму» (тривалістю $\tau = 120$ хв, $T_{\max} = 1329$ К рис. 1 (крива 1)), «температурного режиму вуглеводневої пожежі» (тривалістю $\tau = 40$ хв, $T_{\max} = 1380$ К, рис. 1 (крива 2)), «температурного режиму модифікованої вуглеводневої пожежі» (тривалістю $\tau = 40$ хв, $T_{\max} = 1600$ К рис. 1 (крива 3)) [582].

На сьогодні в Україні немає методик теоретичного дослідження вогнестійкості металевих конструкцій 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.

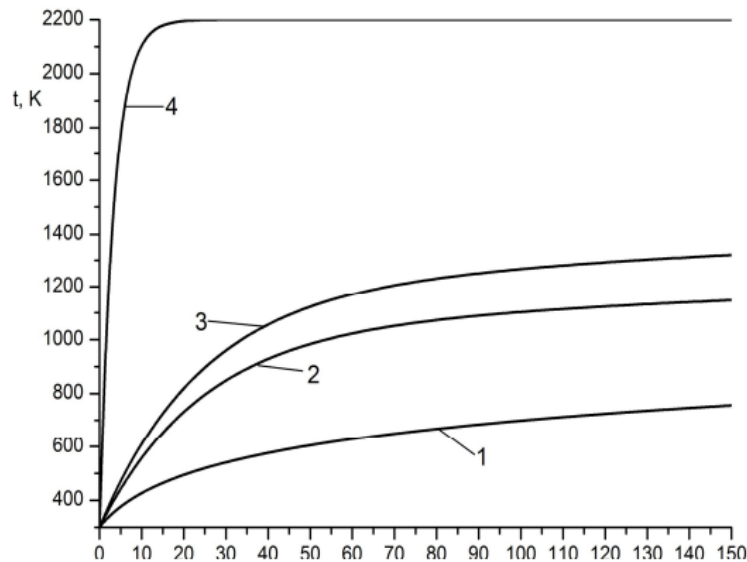


Рис. 1. Температурні режими пожежі: 1 – «стандартний температурний режим пожежі»; 2 – «температурний режим вуглеводневої пожежі»; 3 – «модифікований температурний режим вуглеводневої пожежі»; 4 – «температурний режим водневої пожежі»

Розглянемо зміну температури факела полум'я горіння воднево-повітряної суміші, яка коливається в межах від 2200 до 2600 К залежно від концентрації водню в повітрі [581]. Тривалість аварійного витoku (горіння) струменя водню досліджено в роботі [583] і вона становить 2,5 хв. Враховуючи, що температура факела полум'я дорівнює 2200 К і досягається за 15 – 20 с, температурний режим горіння водню математично змодельовано у вигляді:

$$T(\tau) = 2200 - (2200 - T_0) \cdot \exp(-0,3 \cdot \tau), \quad (1)$$

де τ – тривалість пожежі, с; T_0 – початкова температура, К.

Відповідно до рівняння (1) графік зміни температурного режиму водневої пожежі описується кривою 4, що зображена на рис. 1.