

*Я.Б. Кирилів, канд. техн. наук, ст. наук. співр., С.І. Білик, О.В. Хлевной  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## АНАЛІЗ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ МАШИННИХ ЗАЛІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Проаналізовано основні причини, що призводять до утворення вибухопожежонебезпечної суміші, її спалахування або вибуху і наступної пожежі у машинних залах АЕС. Наведені можливі заходи щодо запобігання вибухам та катастрофічним пожежам, а за неможливості їх уникнення – до зниження матеріальних збитків. Пропонованими заходами є нанесення вогнезахисних покриттів на несучі металоконструкції машзалів, встановлення стаціонарних лафетних стволів, зокрема роботизованих установок пожежогасіння, та застосування пасивних автоматичних рекомбінаторів водню, що дає змогу підвищити межу вогнестійкості.

**Ключові слова:** атомна електростанція, турбогенератор, водень, спеціальна оливна система, пожежна небезпека, машинні зали, металеві конструкції, гасіння лафетними стволами, роботизовані установки пожежогасіння, пасивні автоматичні рекомбінатори водню, підвищення межі вогнестійкості.

**Вступ.** Сьогодні практично на всіх атомних електростанціях світу для якісного охолодження турбогенераторів великої потужності (понад 50 МВт) використовується система водневого охолодження.

Використання водню як охолоджувального агента зумовлено такими факторами [1]:

- підвищення одиничної потужності турбогенераторів шляхом збільшення їх габаритів обмежене величиною граничних механічних навантажень на елементи ротора;
- подальше підвищення потужності потребує підвищення густини струму в обмотках генератора та інтенсифікації його охолодження;
- для інтенсифікації процесу охолодження необхідне використання ефективного охолоджувального агента (з технологічної точки зору оптимальним холодоагентом є водень, теплопровідність якого у 6-7 разів вища за теплопровідність повітря);
- використання водню, на відміну від повітря, дає змогу збільшити відведення тепла з поверхонь, які охолоджуються і відповідно підвищити потужність турбогенератора при заданих розмірах;
- використання водню забезпечує зменшення вентиляційних втрат завдяки значно меншій щільності водню порівняно з повітрям.

Тому на даний момент система водневого охолодження є єдиною можливою системою охолодження для турбогенераторів великої потужності. Проте, слід відзначити, що її використання пов'язане з необхідністю використання спеціальної оливної системи, яка подає оливу для ущільнення турбогенератора. Це, своєю чергою, запобігає витоків водню з корпусу генератора через ущільнення вала. Поряд з цим використання оливи значно підвищує ступінь пожежної небезпеки у турбінному відділенні машзалу.

Підвищена пожежна небезпека машинних залів АЕС 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 зі статистичними даними [3], за період з 1965 року у машзалах АЕС і ТЕС усього світу з турбоагрегатами потужністю 50 МВт і більше зафіксовано 97 аварійних ситуа-

цій: з них пожеж – 31, вибухів – 2, вибухів з пожежами – 2. У 22-ох випадках пожежі супроводжувалися обваленням покрівлі машзалу, травмуванням обслуговуючого персоналу, пожежників та пошкодженням технологічного обладнання.

Також під час експлуатації турбогенераторів виникала значна кількість вибухів водню у газооливних системах турбогенераторів, що не завжди фіксувалося у звітній документації, оскільки це не призводило до виникнення пожеж або людських жертв [3].

**Постановка проблеми.** Аналіз статистичних даних щодо виникнення аварійних ситуацій, які пов'язані з витокami водню з технологічного устаткування, свідчить про таке: пожежі у турбінному відділенні виникають через дефекти конструкції обладнання і систем, що забезпечують його роботу; порушення ущільнень валів генераторів та збій роботи оливної системи, що надалі призводить до виникнення витоків водню або оливи та їх займання; найбільш небезпечними за своїми масштабами та швидкістю поширення є аварійні ситуації, які виникають внаслідок обривання лопатей турбіни з наступною вібрацією роторів валопроводу турбогенератора. Через пошкодження підшипників та ущільнень вала турбогенератора, елементів оливної системи виникає витік водню або оливи з наступним утворенням вибухопожежонебезпечної суміші, її спалахування або вибухом і наступною пожежею.

**Мета роботи.** Проаналізувати стан вибухопожежної та пожежної безпеки машинних залів АЕС та визначити шляхи її підвищення.

**Виклад основного матеріалу.** Для машинних залів АЕС, які експлуатуються з ядерними реакторами типу ВВЕР встановлений ступінь вогнестійкості будівлі – III-а [4], [5].

Необхідний ступінь вогнестійкості будівлі машинного залу (III-а) визначає і мінімальні межі вогнестійкості елементів конструкцій каркаса будівлі.

У процесі натурного обстеження стану будівельних конструкцій машзалів [6], виходячи з передбачуваних варіантів підвищення їх стійкості при пожежі, був зроблений акцент на такі питання:

- 1) аналіз характеристик міцності кроквяних ферм з метою забезпечення їх теплового захисту шляхом підвіски до них теплостійких стель;
- 2) конструкція з'єднання вузлів будівельних ферм перекриття машзалу з колонами каркаса;
- 3) стан антикорозійного покриття металевих будівельних конструкцій каркаса і марки застосованих лакофарбових матеріалів.

По суті наведених вище питань [6] зазначається таке: будівельні ферми і елементи каркасу машзалів діючих АЕС розраховувалися на міцність, стійкість і деформацію без урахування можливого температурного впливу пожежі.

З огляду на те, що розрахунок проводився за граничним станом міцності, будівельні ферми не мають додаткового запасу міцності. Як наслідок, облаштування вогнезахисних стель по фермах перекриття неможливе через малий запас міцності конструкцій. Вузли з'єднання будівельних ферм з колонами каркаса машзалів АЕС з турбоустановками всіх типів виконані з урахуванням сприйняття горизонтальних навантажень (сейсмічних впливів) і додаткових розкріплень не потребують. Ці конструкції каркаса покрівлі не є визначальними у його стійкості та теплових деформаціях будівельних ферм.

Антикорозійні покриття каркаса машзалу знаходяться в задовільному стані. Проектною документацією передбачалося покриття колон і ферм зі зв'язками синтетичними емалями типу ХВ-110 заводською ґрунтовкою марки ФО-ОКК. У ряді випадків, наприклад, на енергоблоках № 1, 2 Хмельницької АЕС і № 1, 4 Рівненської АЕС, колони машзалу покриті епоксидними складами.

Вирішальне значення при нанесенні вогнезахисного складу на елементи каркаса має марка застосованого антикорозійного захисту. Згідно з [7], після неодноразових пожеж у машзалі АЕС і ТЕС за рекомендацією ВНДІПО з 1993 року мінімальну межу вогнестійкості металевих

конструкції каркаса і ферм машзалу всіх АЕС України підвищено від R15 до R45 (від 15 хвилин до 45 хвилин) [5] шляхом нанесення на їх поверхню різних вогнезахисних покриттів.

Згідно з [6], приміщення машзалів АЕС характеризуються виділенням тепла впродовж цілого року, а також виділенням вологи і водню. Схемою вентиляції машзалів передбачається подача зовнішнього повітря припливними камерами. У теплий період року здійснюється додаткова подача зовнішнього повітря: для машзалів з турбоустановками К-220-44 через віконні отвори; для машзалів з турбоустановками К-1000-60/1500 і 3000 – за допомогою осьових вентиляторів. Видалення повітря з машзалів з турбінами К-1000 (обох типів) здійснюється через світлоаераційні панелі, що не задуваються, а з машзалів з турбінами К-220-44 – через щілинний ліхтар у перекритті. У результаті досліджень [8] було встановлено, що робочі майданчики мають істотний вплив на формування повітряних потоків і розподіл температур в машзалі. Однак розміщення світлоаераційних панелей по торцю кроквяних ферм дає змогу знизити температуру в нижній (робочій) зоні машзалу до 30-40 °С. Для видалення водню в покрівлі машзалу (для всіх типів розглянутих турбін) встановлені дефлектори. У той же час, нормативні документи не передбачають необхідності видалення диму при пожежі з приміщення машзалу.

Через відсутність вогнезахисних складів, здатних задовольнити всі зростаючі вимоги з вогнестійкості, прийнято рішення [9] про охолодження в повному обсязі ферм і колон машзалу шляхом зрошення їх технічною водою. Для нового проекту прийнято рішення про винесення маслобаків і маслосистем за межі машзалів.

Стосовно машинних залів АЕС, де горючі матеріали (турбінна олива і водень) знаходяться в герметичному технологічному обладнанні, їх взаємодія з киснем повітря можлива лише при розгерметизації обладнання. В якості можливих джерел запалювання можуть розглядатися нагріті поверхні технологічного обладнання і, перш за все, паропроводи турбіни. Наповнене оливою обладнання розташоване нижче рівня майданчика обслуговування турбіни (демпферний і напірний баки) і знаходиться на значній відстані від можливих джерел запалювання, що дозволяє не розглядати його в цій роботі.

Машинні зали АЕС ВВЕР-440, в яких, як правило, розміщуються 4 (по два на блок) турбоагрегати, розташовані вздовж машзалу.

Таким чином, подальшу оцінку впливу пожежі на несучі конструкції машзалу АЕС доцільно проводити як факельне горіння водню при його витіканні з корпусу генератора. Водень, зважаючи на його вибухопожежонебезпечні параметри, що наведені нижче, є одним з найнебезпечніших газів.

Відповідно до вимог [4], трубопровід скидання водню з корпусу турбогенератора виводиться в атмосферу на 2 м вище від відмітки покрівлі машзалу.

Ця система, зокрема, передбачає підведення нейтрального газу – азоту (у систему подачі оливи на ущільнюючі підшипники в аварійній ситуації, пов'язаній з руйнуванням і займанням оливи і водню) для витіснення водню з корпусу турбогенератора і заповнення його після скидання водню з метою запобігання утворенню вибухонебезпечної суміші водню з повітрям.

Прискорене видалення водню не можна застосовувати при нормальній експлуатації турбогенераторів, оскільки це небезпечно для технічного стану генератора. Завод-виробник не рекомендує різко змінювати тиск газу при його випусканні з корпусу зібраного турбогенератора.

Попри застосовані протипожежні заходи, горіння оливи і водню все ж призводить до катастрофічних наслідків – обвалень покрівлі і значних пошкоджень будівельних конструкцій машинних залів електростанцій [10].

Таким чином, для зниження ступеня ризику катастрофічної пожежі в машинному залі електростанції актуальними два напрямки робіт:

- зниження ймовірності (частоти) катастрофічних пожеж, тобто запобігання пожежам шляхом підвищення надійності турбоагрегатів та якості експлуатації;

- зниження матеріальних збитків від пожежі, тобто обсягу руйнувань і тривалості простою турбоагрегату, шляхом підвищення ефективності ліквідації пожежі.

При гасінні пожеж у машинних залах першочерговим завданням є захист огороджувальних конструкцій і ферм перекриття, а також маслбаків від впливу теплових потоків шляхом зрошення їх струменями води з лафетних стволів.

Досвід великих аварій і пожеж на АЕС у різних країнах виразно виявив необхідність створення дистанційно керованих апаратів і пристроїв запобігання та гасіння пожеж і загорянь, зокрема, пожежних роботів і роботизованих пожежних комплексів на їх основі [11].

Разом з тим, незахищені металеві конструкції, зокрема, ферми, мають істотний недолік – при пожежі ці конструкції інтенсивно нагріваються, внаслідок чого вже на початковій стадії пожежі під дією власної ваги відбувається їх обвалення на значних площах.

Відповідно до діючої нормативної документації, в машинних залах АЕС слід передбачати охолодження металевих ферм із стаціонарно встановлених лафетних стволів, розміщених на позначці обслуговування турбін. При цьому система зрошення ферм струменями води з лафетних стволів має забезпечувати можливість зрошення кожної точки ферми двома компактними струменями. Лафетні стволи дають змогу при меншій загальній витраті вогнегасних речовин зосередити їх подачу в задану зону з більшою інтенсивністю [12].

В умовах вже побудованих і експлуатованих машинних залів АЕС найбільш прийнятним способом захисту металевих ферм перекриття є їх охолодження струменями води, що подаються з лафетних стволів. Це підтверджує також техніко-економічне обґрунтування різних варіантів захисту, яке показало найбільшу доцільність цього рішення, що надалі відображено в [13].

Подача струменів води на охолодження металевих ферм покриттів в машинних залах АЕС має починатися з моменту, коли температура поверхні ферм ще не перевищує  $100^{\circ}\text{C}$ , що забезпечить найбільш ефективний режим охолодження. подача води на охолодження ферм після їх прогріву до високих температур видається менш ефективною, оскільки інтенсивність тепловіддачі в цих умовах охолодження низька. подача води на охолодження ферм перекриття з роботизованих установок пожежогасіння має здійснюватися відразу після виникнення осередку горіння, що можливо здійснити, як це показано вище, тільки за допомогою пожежних роботів [12].

Відмінною особливістю застосування пожежних роботів є можливість виконувати свої функції у відсутності повної видимості при сильному задимленні, характерному для пожеж в турбінних залах. Точно вивірена програма охолодження перекриттів складається і перевіряється заздалегідь. При надзвичайній ситуації достатньо лише вказати зону загоряння на мнемосхемі або пульті управління, все інше пожежні роботи зроблять в автоматичному режимі [12].

Пожежні роботи нового покоління мають програму самотестування, що дає змогу підтримувати їхню готовність до роботи та своєчасно проводити профілактичні заходи.

На сьогодні є позитивний досвід застосування пожежних роботів для захисту об'єктів АЕС. Пожежні роботи використовувалися під час ліквідації наслідків на Чорнобильській АЕС у 1986 році; встановлювалися в машинному залі Ленінградської АЕС за проектом ДПП «Спецавтоматика». Розроблялися також проекти захисту машинних залів АЕС із застосуванням пожежних роботів на Ігналінській АЕС в Литві і АЕС в Енергодарі, що в Україні [12].

Впровадження системи видалення водню. Завдання цього заходу – запобігання вибухонебезпечним концентраціям водню в гермооб'ємі. Її рішення українські атомники бачать в установці пасивного автокаталітичного рекомбінатора водню.

Розроблені та узгоджені конструктивно-технічні рішення для всіх енергоблоків з установки пасивного автокаталітичного рекомбінатора водню для важких аварій.

Для блоків №1 і №2 ПУАЕС проведено розрахунки, укладений контракт на поставку пасивного автокаталітичного рекомбінатора водню. По інших блоках роботи ведуться за графіком [14].

Аналіз ряду аварійних ситуацій із значною розгерметизацією генератора показав, що час від виявлення витoku водню персоналом до відключення генератора від мережі становить від 2 до 7 хв [15]. Ручні маніпуляції з арматурою потребують до 5 хв. При збої в роботі схем сигналізації та захисту і запізненні з уживанням заходів персоналом, цей час може непередбачувано збільшуватися.

Як показано вище, швидке видалення водню дає змогу значно знизити пожежне навантаження від тепловиділення при горінні водню в машинному залі. А головне, після видалення водню можна застосувати розпилу та тонкорозпилу воду для гасіння факела палаючої оливи. Не можна гасити водою водневе полум'я, оскільки температура водневого полум'я перевищує 2000 °С, а при температурі понад 1700 °С вода розкладається на водень і кисень. Тому введення води в будь-якому вигляді в водневе полум'я лише посилить пожежу. Так, в [16] зазначено, що загорання водню небезпечно гасити, поки весь водень не витратиться, через загрозу вторинного займання та вибуху, а водою слід тільки охолоджувати навколишні конструкції.

Крім того, навіть значний витік водню далеко не завжди супроводжується займанням та пожежею, а незначні локальні загорання не настільки небезпечні, щоб піддавати генератор вельми серйозному негативному впливу скидання водню без крайньої необхідності.

Маловитратні витoki водню в водяні системи охолодження, в оливні системи і в короби струмопроводів контролюються газоаналізаторами, що, як показує досвід експлуатації, виключає можливість накопичення та вибуху водню в зазначених місцях. Такі витoki ніколи не були причиною пожежі в машинному залі. Передбачені штатною системою контролю і інструкцією з експлуатації процедури виявлення цих витоків і усунення їх, включаючи, за необхідності, відключення і зупинку турбогенератора у звичайному порядку, досить ефективні і не вимагають екстреного скидання водню.

Відомо [15], що всі аварійні ситуації, першопричиною яких було механічне руйнування вузлів турбоагрегатів, призводили до швидкого розвитку катастрофічної пожежі оливи і водню з пошкодженням будівельних конструкцій машинного залу. Для появи і розвитку небезпечних, з точки зору пожежі, механічних пошкоджень вузлів турбоагрегату найбільш інформативною ознакою є значне підвищення контрольованої вібрації підшипників. Тому для достовірної ідентифікації початку руйнування турбоагрегату і необхідності запуску системи протипожежного захисту, включаючи видалення водню, найбільше підходить вібродинамічний критерій.

Згідно з [17], за проектом всі металоконструкції не мали вогнезахисного покриття.

Як було сказано раніше, деяке зниження температурного впливу на конструкції машзалу дає змогу досягти скерування в заданому напрямі газових потоків у випадку пожежі. При цьому можливі наступні варіанти: вільне поширення продуктів горіння по всьому об'єму машзалу через природну конвекцію вогнища пожежі; забезпечення видалення продуктів згорання через світлоаераційні ліхтарі на покрівлі машзалу або покрівельні панелі, які автоматично відкриваються при досягненні заданої температури; забезпечення видалення продуктів горіння через світлоаераційні панелі на фасаді машзалу, які розміщені нижче несучих конструкцій покриття.

Якщо факел полум'я водню нагріває металевий каркас ферми покрівлі залу, який покритий вогнезахисним покриттям, що спучується, то критична температура (500 °С) досягається за 55 хвилин [8].

**Висновки:** 1. Необхідно здійснити вогнезахист несучих металевих конструкцій машинного залу вогнезахисними матеріалами, які забезпечують межу вогнестійкості не менше 45 хв та випробувані за вуглеводневою кривою [18]. Але вуглеводнева крива має значно нижчі температурні показники, ніж ті, які можуть виникати при горінні водню (2000 °С), тому доцільно було б розробити водневу криву. Викид газових потоків в атмосферу має здійснюватися через аераційні ліхтарі в покрівлі машинного залу.

2. Потрібне вдосконалення вже існуючих та розроблення нових вискоефективних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій і їх експериментальна перевірка.

3. В умовах вже збудованих і експлуатованих машинних залів АЕС найбільш прийнятним способом захисту металевих ферм перекриття є їх охолодження струменями води з лафетних стволів, зокрема з роботизованих установок пожежогасіння. Розробка роботизованих установок пожежогасіння нового покоління є на сьогодні перспективним напрямом.

4. Актуальним є вдосконалення та розробка пасивних автокаталітичних рекомбінованих водню, що дають змогу зменшувати концентрацію водню в приміщеннях машзалів.

5. На підставі проведених досліджень [8, 19], які показали що стійкість вогнезахисних конструкцій значно збільшилась, необхідно підкоректувати п. 5.2.10 [4] в частині визначення безпечного часу аварійного скидання водню з корпусу генератора в сторону його збільшення.

### Список літератури:

1. **Пособие** для изучения технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Издательство «Энергия», 1979. – 400 с.

2. **Противопожарная система** для турбогенераторов энергоблоков ТЭС / А. П. Жаров, Н. З. Беликов, В. Д. Келлер [и др.] // Электрические станции – 2001. – №6. – С. 43 – 46.

3. **Сравнительный анализ** аварийных ситуаций, пожаров и взрывов в машзалах АЭС, электростанциях РАО ЕЭС при нарушениях в работе турбогенераторов с проливом масла и утечкой водорода: Технический отчет / ОАО «ВНИИАЭС». – М., 2008. – 88 с.

4. **НАПБ 03.005-2002** (ВБН В.1.1-034-03.307-2003) Противопожарные нормы проектирования атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами.

5. **ДБН В.1.1-7-2002** Защита от пожара. Пожарная безопасность объектов строительства.

6. **Технические предложения** по повышению пожарной безопасности машзалов АЭС и устойчивости их строительных конструкций при пожаре: КИЭП – ТППБ – К., 1993. – 97 с.

7. **43-601.6.202.001.П300** Технические предложения. Мероприятие 29112. Разработать и реализовать систему по сигналу «пожар» сброса водорода из корпуса генератора за пределы машзала. Этап 1: КИЭП – 2007. – 38 с.

8. **Аналіз пожежної безпеки** машзалу енергоблоку №1 під час виникнення пожежі з викидом водню із корпусу генератора: Звіт / ЛДУБЖД – 2010. – 43 с.

9. **Приказ МАЭП СССР** от 21.01.92 г. №21 «О первоочередных мероприятиях по предотвращению происшествий, аналогично имевших место 10.11.91 на Чернобыльской АЭС».

10. **Голоднова О. С.** Об аварийном сбросе водорода из турбогенератора с водородным охлаждением / О. С. Голоднова // Вести в электроэнергетике. – 2010. – №2. – С. 8 – 15.

11. **Технический проект по НИОКР** "Разработка конструкторской документации на пожарные роботы для машзалов АЭС", утвержденной председателем Бюро Совета Министров СССР по ТЭК от 02.04.1988 г.

12. <http://www.algorithm.org/arch/arch.php?id=52&a=996>.

13. **ВСН 01-87** «Противопожарные нормы проектирования атомных станций».

14. <http://www.atominfo.ru/newsc/10882.htm>.

15. **Солдатов Г. Е.** О путях снижения риска пожаров в машинных залах АЭС / Г. Е. Солдатов, О. С. Голоднова // Атомкон. – 2009. – № 2(3). – С. 42 – 46.

16. **H2BestPractices Home** (Last Updated: August, 2009. Pacific Northwest National Laboratory and Los Alamos National Laboratory with funding from the U.S. Department of Energy).

17. **Горев Н. Ф.** Уроки некоторых аварий, Электрические станции, 7/92.

18. **ДБН В.1.2-7-2008** Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека.

19. **Термостійкість несучих конструкцій** машинних залів АЕС при горінні водню / М. М. Семерак, В. В. Ковалишин, А. М. Домінік, Я. Б. Кирилів // Пожежна безпека. – 2011. – №19. – С. 7 – 12.

## **АНАЛИЗ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МАШИННЫХ ЗАЛОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Проанализированы основные причины, приводящие к образованию взрывопожароопасных смесей, ее воспламенению или взрыву и последующему пожару в машинных залах АЭС. Указаны возможные меры по предотвращению взрывов и катастрофических пожаров, а при невозможности к снижению материального ущерба. Предлагаемыми мерами является нанесение огнезащитных покрытий на несущие металлоконструкции машзала, установка стационарных лафетных стволов, особенно роботизированных установок пожаротушения, и применение пассивных автоматических рекомбинаторов водорода, позволяющие повысить предел огнестойкости.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, турбогенератор, водород, специальная масляная система, пожарная опасность, машинные залы, металлические конструкции, тушение лафетными стволами, роботизированные установки пожаротушения, пассивные автоматические рекомбинаторы водорода, предел огнестойкости.

*Ya. B. Kyryliv, S.I. Bilyk, O.V. Khlevnoy*

## **ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANTS MACHINE HALLS FIRE SAFETY**

The article deals with the main reasons that can cause the formation of explosive mixtures and their ignition or explosion with the subsequent fire in the machine halls. Actions for prevention the explosions, catastrophic fires are described. Also the ways to reduce material losses are shown. It is proposed to use fire protective coatings for covering the metal constructions, stationary barrels, particularly robotic fire extinguishing systems and of passive automatic hydrogen recombinators.

**Key words:** nuclear power, turbine, hydrogen, special oil system, fire danger, machine halls, metal constructions, fire barrels, robotic fire-extinguishing systems, passive automatic hydrogen recombinators, fire resistance.

