

*О.І. Балицький¹, д-р техн. наук, професор, М.М. Семерак² д-р техн. наук, професор,
В.О. Балицька², канд. фіз.-мат. наук, доцент, А.В. Субота², Я.Еліаш³, д-р хабіт., професор,
О.Б. Вус¹*

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів,

²Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів,

³Західнопоморський технологічний університет, Щецін, Польща)

АНАЛІЗ ПОЖЕЖНО-ВОДНЕВОЇ БЕЗПЕКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНИХ ЗАЛІВ НА ЕНЕРГОБЛОКАХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Розглянуто випадки, пов'язані з вибухами водню, пожежами, зумовленими загоранням воднево-оливних сумішей, кабельних комунікацій, руйнуваннями турбоагрегатів та трубопроводів в машинних залах на теплових (ТЕС) та атомних (АЕС) електростанціях за останні десятиріччя. Проаналізовано характеристики конструкцій, пов'язаних з експлуатацією водню під тиском, а також можливі шляхи підвищення водневої безпеки на енергоблоках та гасіння водневих пожеж.

Ключові слова: воднева пожежа, вибух водню, турбоагрегат, посудина під тиском водню.

Проблема водневої безпеки ТЕС, АЕС та крупних водневих об'єктів. Завдяки високій теплоємності та теплопровідності, газоподібний водень використовується як охолоджувальне середовище в потужних турбогенераторах на енергоблоках ТЕС та АЕС України. Водень надходить в ротор турбогенератора під надлишковим тиском за кімнатної температури, а на виході з ротора його температура становить 80 °С, після наступного охолодження та осушення, він знову поступає в ротор турбогенератора і охолоджує мідні провідники, бочку ротора і бандажні кільця. Контактуючи тривалий час з поверхнево активним воднем за підвищених температур, конструкційні матеріали ротора, а також ущільнення бабітових підшипників деградують [1].

Зміна властивостей конструкційних матеріалів, а також можливе просочування водню через ущільнення в генераторі може призвести до перевищення критичних концентрацій водню в машинному залі, у зв'язку з чим підвищується небезпека вибуху газової суміші повітря-водень з катастрофічними наслідками.

Зауважимо, що існує також небезпека вибуху водню в суміші з повітрям, киснем або азотом від іскри чи відкритого полум'я. Границя вибуху знаходиться в межах від 3,3 % до 81,5 % і 9,2 % до 91,6 % водню в повітрі і в кисні відповідно.

Статистика великих аварій в машинних залах ТЕС і АЕС за останні 40 років відображає понад 100 подій, серед яких 30 водневих пожеж, вибухів водню та вибухів з пожежами, що відбулися з людськими втратами [2-4].

Як правило, загорання спричинені різними порушеннями водневої газощільності. Більшу частину «хлопків» водню в газо-оливних системах турбогенераторів, як правило, не фіксують у звітній документації, якщо вони не призводять до пожеж, вибухів і жертв.

Водень в суміші з повітрям накопичується під декоративною обшивкою генератора, в результаті чого відбуваються локальні вибухи воднево-повітряної суміші та руйнування обшивки. Можливе також неповне витіснення водню вуглекислим газом з наступним заповненням корпусу повітрям за додаткового тиску, в результаті чого відбувається вибух воднево-повітряної суміші, особливо під час проведення зварювальних робіт на трубопроводах охолоджувачів.

Виникнення аварійних ситуацій з витіканням водню, що спричиняють вихід з ладу обладнання газо-оливної системи, розподіляються таким чином [5]: витікання через фланцеві з'єднання трубопровода і штуцера (до 20%), витіскування ущільнюючих гумових прокладок (кришки люку, фланців корпусу генератора між корпусом ущільнення і зовнішнім щитом і т. д., в тому числі з займанням водню) (до 20%), прорив через поплавковий гідрозатвор (в тому числі займання або «хлопок» в зливних оливопроводах підшипників (до 10%), витікання і са-

мозаймання водню при різкому відкритті вентиля на газовому посту (до 10%), витікання через ущільнюючі гумові прокладки газоохолоджувачів (до 10%), витікання чи прорив у картери підшипників (в тому числі «хлопок-спалах» в картері підшипника через дефект вкладиша ущільнення (до 9%), витікання через зварні з'єднання трубопроводів (до 6%), витікання через фланцеві з'єднання поплавкового гідрозатвору (до 6%), порушення роботи регуляторів перепаду тисків оливи і водню, регуляторів надлишкового тиску оливи (до 6%), витікання через горизонтальні роз'єми торцевих щитів (до 3%).

Частина випадків витікання водню, які супроводжувалися займанням чи «хлопками» водню, становить приблизно 15%.

Зупинимось на хронології великих аварій в машинних залах.

В Швейцарії на АЕС в Мюлеберзі (Muehleberg, енергоблок потужністю 355 МВт) в 1971 році в результаті протікання масла в головному турбінному залі станції виникла пожежа.

На Південно-Українській АЕС в 1984 році відбулось загорання кабелів і виникла пожежа на другому блоці (енергоблок потужністю 1000 МВт) на стадії будівельно-монтажних робіт. Протипожежна сигналізація не спрацювала. В результаті пожежі було пошкоджено 16 км кабелю. У випадку, якщо б аварія відбулася на працюючому реакторі, така ситуація призвела б до втрати контролю за станом реактора з непередбачуваними наслідками.

На Чорнобильській АЕС (енергоблок потужністю 1000 МВт) в 1986 році відбулась найбільша ядерна катастрофа з частковим руйнуванням активної зони реактора і вихід величезної кількості радіоактивних елементів у повітря.

В США в м. Колорадо на АЕС «Форт Сент-Врейн» (Fort St. Vrain, енергоблок потужністю 160 МВт) в 1987 році виникла пожежа в турбінному залі зі значними пошкодженнями кабелів диспетчерського пульта в результаті протікання масла.

На АЕС "Ігналіна" (Ignalina) в 1988 році відбулась велика пожежа в результаті загорання кабелю на другому блоці (енергоблок потужністю 1300 МВт) з подальшою зупинкою реактора.

В 1989 році на Хмельницькій АЕС (енергоблок потужністю 1000 МВт) відбулось витікання і самозаймання водню за різкого відкривання вентиля на рампі газового поста, внаслідок чого виникло локальне загорання водню, яке, тим не менше, не призвело до пошкоджень обладнання.

Слід відзначити також аварію на Ірклінській ГРЕС (енергоблок потужністю 300 МВт), коли в процесі розгону турбоагрегату відбулось руйнування підшипників з викидом і загоранням воднево-оливної суміші з подальшим водневим вибухом.

На АЕС Ванделлос (Іспанія) (енергоблок потужністю 480 МВт) в 1989 році відбулось пошкодження лопатей турбіни, розбалансування валопроводу, що призвело до різкого підвищення вібрації і пошкодження трубопроводів з оливою. Автоматично відключились оливні помпи і за кілька хвилин було перекачано 12 л оливи, яка загорілася під майданчиком турбіни. В процесі пожежогасіння було затоплено турбоагрегатне і реакторне приміщення.

В США на АЕС Maine Yankee (енергоблок потужністю 900 МВт) в 1991 році відбулось руйнування системи подачі водню, яке призвело до вибуху і пожежі в паровій турбіні, в результаті чого реактор було зупинено.

Руйнування опірних і ущільнюючих підшипників генератора, загорання оливи і водню та руйнування перекриття машинного залу відбулось на другому блоці Чорнобильської АЕС (енергоблок потужністю 500 МВт) в 1991 році. Відбулось самовільне відключення перемикача 330 кВ, в результаті чого була подана напруга на ротор, що обертався зі швидкістю 220 об/хв. Через виникнення значних термічних впливів сталося механічне руйнування роторних клинів з виникненням значних невірноважених ударних сил, під дією яких відбулось руйнування опорних підшипників з розгерметизацією генератора і наступним викидом оливи і водню. Як результат – виникла пожежа з руйнуванням перекриття машинного залу на площі 2500 м².

В Росії на Білоярській АЕС (енергоблок потужністю 160 МВт) в 1994 році відбувся витік водню з другого контуру, який спричинив пожежу. Станцію закрили на ремонт.

В 1996 році на Південно-Українській АЕС (енергоблок потужністю 1000 МВт) під час відбору проб газу у відбірній лінії відбулось загорання водню на газовому посту. Стосовно до машинних залів АЕС водень і олива знаходяться в герметичному технологічному устаткуванні, а їхня взаємодія з киснем і повітрям можлива лише в процесі розгерметизації цього обладнання, а можливі джерела запалювання – нагріті поверхні та іскріння агрегатів.

В Німеччині на АЕС «Брунсбюттель» (Brunsbuettel, енергоблок потужністю 800 МВт) в 2001 році в декількох метрах від реактора відбувся вибух водню в трубопроводі.

В Японії (префектура Шіцуока на АЕС «Хамаока-1» (Hamaoka-1, енергоблок потужністю 540 МВт) в 2001 році під час випробовувань відбувся розрив трубопроводу інжекційної системи високого тиску. Однією з причин виникнення аварії був вибух водню.

На Каширській ТЕС в 2002 році найбільш вірогідною причиною виникнення аварії було руйнування і виліт невеликого фрагмента бандажного кільця ротора генератора. Цьому сприяв малий запас пластичності металу з якого виготовлене кільце (титановий сплав) і, як наслідок, висока чутливість до концентрації напружень. Фрагмент, що відколовся зі швидкістю не менше 160 м/с пробив склотекстолітовий циліндр, що ізолював простір статора генератора (по якому протікала під тиском охолоджуюча олива) від внутрішньої частини в якій обертався ротор. Це призвело, по-перше, до витoku оливи в кільцевий повітряний простір між ротором (який обертався) і текстолітовим циліндром, швидкого спінення і утворення повітряно-оливної суміші, яка швидко нагрілась завдяки енергії тертя. По-друге, фрагмент бандажного кільця (який попав в статорну частину генератора) викликав пошкодження ізоляції обмотки статора і її замикання на землю, що призвело до спрацювання електрозахисту і відключення генератора від мережі з одночасним спрацюванням технологічного захисту і зупинкою подачі пари на турбіну. Виникло миттєве самозаймання (хлопок, вибух, який почув працюючий персонал) повітряно-оливної суміші в отворі між ротором і склотекстолітовим циліндром, внаслідок її швидкого нагріву до високої температури, або займання дугою короткого замкнення чи іскрами, які виникли при ударі фрагмента кільця об активну сталь статора. Продукти вибуху зірвали малий торцевий щиток генератора зі сторони збуджувача і викликали займання витікаючої оливи. Детонація була такої сили, що корпус машинного залу склався, розсипались перекриття і обвалилася покрівля (рис. 1, 2). За лічені секунди енергоблок охопив вогонь, який розповсюдився на площі більше 1000 м². На час прибуття пожежних підрозділів полум'я перекинулось на сусідні будівлі і вирувало на площі 3000 м², пожежа тривала 12,5 год.

Було встановлено, що внаслідок аварії вал турбогенератора розділився на чотири частини, весь лопатевий апарат ротора низького тиску зрізаний, а фундамент турбоагрегату в результаті динамічної дії значно пошкодився.

В США в м. Нью-Гемпшир на АЕС «Сібрук» (Seabrook-1, енергоблок потужністю 1200 МВт) в 2003 році в турбінному залі було виявлено накопичення водню вибухонебезпечної концентрації.

В 2004 році в м. Вермонт на АЕС "Янки-Роу" (Vermont Yankee-1, енергоблок потужністю 530 МВт) виникло загорання електричного кабелю, що спричинило пожежу в турбінному залі.

В Франції на АЕС в Каттеномі (Cattenom-2, енергоблок потужністю 1360 МВт) в 2004 році відбулось загорання кабельної траси в турбінному залі. Щоб добратись до кабелів, які горіли, пожежники були змушені розламати стіну.

У грудні 2006 року на десятому блоці Рефтинської ДРЕС (Росія) (енергоблок потужністю 500 МВт) відбулось руйнування бандажного кільця ротора, що спричинило трифазне коротке замикання обмотки статора турбогенератора і призвело до утворення небезпечної концентрації газо-оливної суміші і гідродинамічного зриву, що спричинив виникнення пожежі з обваленням покрівлі машинного залу.



Рис. 1. Турбогенераторний зал ТЕС до вибуху



Рис. 2. Характер руйнувань після вибуху воднево-оливної суміші в турбогенераторному залі ТЕС

В Японії на АЕС Фукусіма-1 (Fukushima-1 потужністю 1100МВт) в 2011 році виникли проблеми з системою охолодження реактора, пошкодженою землетрусом, що призвело до потужного вибуху водню.

Аналогічні випадки з викидом водню з корпусу генератора відбувалися і на інших тепло- та атомних електростанціях. Цьому сприяє старіння технологічного обладнання та відсутність ефективних методів виявлення та гасіння загорань водню.

До відомих пожеж на великих водневих об'єктах слід віднести пожежу на ракетно-космічному комплексі «Енергія-Буран», яка сталась на початку 90-х років минулого століття в кабельному каналі (патерні) через іскріння і загорання силових кабелів системи живлення електроустановок стартового комплексу, в якому розміщалося понад 200 електрокабелів. Довжина кожного кабеля становила близько 8 км. За допомогою пожежних танків та звичайних пожежних машин швидко локалізувати загорання не вдалось і тому загальна тривалість пожежі перевищила 24 год. В процесі гасіння пожежі було використано понад 60000 л фреону-114В2 та інших засобів пожежогашіння. Були постраждалі від отруєння фреоном [6].

Сучасні технології гасіння пожеж на великих водневих об'єктах. Ідея застосування газоподібного азоту для витіснення вибухонебезпечних газів із замкнутих об'ємів може бути реалізована з використанням автоматичного слідкуючого пристрою примусової заміни водневої атмосфери на азотну [6]. При ліквідації пожежі на ракетно-космічному комплексі «Енергія-Буран» додатково було запропоновано застосувати згасифікований рідкий азот, який знаходився в резервуарах на стартовому комплексі.

На стартовий комплекс було доставлено кріогенні заправники з 7 тонами рідкого азоту, змотовано кріогенні трубопроводи довжиною 15 м, які було під'єднано до кабельного каналу. За таких умов на виході з гнучкого шлангу виходив газифікований азот. Після того як було витрачено половину доставленого рідкого азоту, інтенсивність виділення диму з вентиляційних виводів помітно знизилась, а використання решти (близько 4 тон рідкого азоту) призвело до повного витіснення окислювального газового середовища з кабельного каналу та охолодження поверхонь кабелю [6]. Таким чином в кабельному каналі було створено інертне середовище, внаслідок чого пожежа повністю припинилась. Цей спосіб пожежогашіння на великих водневих об'єктах було запатентовано [7] і розвинуто для застосування, в тому числі і на енергоблоках ТЕС та АЕС.

Використання рідкого азоту для гасіння загорань електротехнічних установок в замкнутих об'ємах, виробничих приміщеннях та контейнерах має значні переваги. Кріогенний пожежний комплекс для гасіння електротехнічних установок в замкнутих об'ємах включає в себе стаціонарний резервуар для зберігання рідкого азоту, пересувний кріогенний заправник та кріогенні рука-

ви великої довжини. Як пересувні заправники можна використовувати дирижаблі з криогенною системою зберігання і подачі азоту. Як один з варіантів дистанційної установки для гасіння складних пожеж можна розглядати пристрій зі спеціальним полімерним снарядом з реактивним соплом, який заправляється рідким азотом. Снаряд може бути начинений вогнегасною речовиною, що диспергується на заданій висоті. Активізація реактивного снаряду може здійснюватися таким чином: з центральної криогенної ємності, здійснюється заправка пожежних снарядів. Безпосередньо перед застосуванням пускової установки вибирається кут стрільби і подається сигнал на відкриття клапана на вбудований випарник, снаряд (виконаний з полімерів і зовні обтягнутий металічною сіткою) летить в сторону пожежі завдяки тязі реактивного азотного струменя, а в момент приземлення руйнується не спричиняючи механічного пошкодження об'єкта.

Слід зазначити, що газифікований азот для гасіння пожеж використовувати не можна, у випадку присутності ацетилену, а також у випадку ймовірності перевищення вибухонебезпечної суміші (75% водню і 25% газоподібного азоту) [6].

При витокі газоподібного чи випаровуванні рідкого водню в атмосферу в утворенні вибухонебезпечної суміші бере участь не більше 50 % водню. Найбільш ефективним засобом флегматизації воднево-повітряної суміші є комбінована суміш, яка складається з 85% (мас.) двоокису вуглецю й 15% (мас.) хладону 114В2. Флегматизуюча концентрація цього складу, двоокису вуглецю і азоту відповідно рівні 32; 62 и 76% (об.). Для припинення дифузійного горіння водню, що витікає з трубопроводу зі швидкістю 10 м/с, необхідно його розбавити 10-кратним об'ємом азоту.

Висновки.

- Водень – горючий газ, в воді слабозчинний, проте на енергоблоках ТЕС та АЕС завдяки високій теплопровідності газоподібний водень використовується як охолоджувальне середовище в потужних турбогенераторах. При цьому вживаються підвищені заходи пожежної безпеки.
- Водень при змінах температури впливає на градацію металевих поверхонь деталей турбогенераторів, що може спричинити їх руйнування.
- Впродовж останніх 40 років зафіксовано понад 100 подій, з них понад 30 водневих пожеж, вибухів водню та вибухів з пожежами, кілька з них були з людськими втратами.
- Існує ряд сучасних технологій гасіння пожеж на великих водневих об'єктах, які полягають у застосуванні газифікованого рідкого азоту.

Список літератури:

- 1. Механіка** руйнування і міцність матеріалів: Довідн. посібник / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. І. Балицький, О. В. Махненко, О. О. Балицький, В. А. Грабовський, Д. М. Завербний, Б. Т. Тимофєєв. Під ред. О.І. Балицького. – Київ: ВД “Академперіодика”, 2005. – 534 с.
- 2. Сравнительный** анализ аварийных ситуаций, пожаров и взрывов в машзалах АЭС, электростанциях РАО ЕЭС при нарушениях в работе. – Москва: РАО ЕЭС. – 2001 г. – 25 с.
- 3. Микеев А.К.** Противопожарная защита АЭС.– Москва: Энергоатомиздат. – 1990. – 210 с.
- 4. М.М. Семерак, В.В. Ковалишин, А.М. Домінік, Я.Б. Кирилів** «Термостійкість несучих конструкцій машинних залів АЕС при горінні водню»// Збірник наук. праць “Пожежна безпека” №19, ЛДУБЖД, УкрНДППБ, 2011 р. – с. 7-11.
- 5. О.С. Голоднова.** Уплотнения вала турбогенераторов с водородным охлаждением (устройство, эксплуатация, причины, признаки и предупреждение отказов) /Приложение к журналу «Энергетик», 2004, №1. – С.8 – 15.
- 6. А.Л. Гусев** «Тушение пожара на крупном водородном объекте»// Международный научный журнал "Альтернативная энергия и экология" №9 (29) 2005, Россия. – 67-71 с.
- 7. Патент РФ №2103598.** Криогенный трубопровод. А.Л. Гусев, И.И. Кудрявцев, А.Р. Турундаев. Заявл. 5.12.95., №95120543/06, опубл. В БИ №3, 1998, МКИ F17D5/00, F16L59/06.

*А.И. Балицкий, М.М. Семерак, В.А. Балицкая,
А.В. Субота, Я.Елиаш, О.Б. Вус*

АНАЛИЗ ПОЖАРО-ВОДОРОДНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРНЫХ ЗАЛОВ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ ТЭС И АЭС

Рассмотрены случаи, связанные со взрывами водорода, пожарами, причинами которых стало возгорание водородно-масляных смесей, кабельных коммуникаций, разрушения турбоагрегатов и трубопроводов в машинных залах ТЭС и АЭС за последние десятилетия. Проанализированы характеристики конструкций, связанных с сосудами под давлением водорода, а также возможные пути повышения водородной безопасности на энергоблоках и тушения водородных пожаров.

Ключевые слова: водородный пожар, взрыв водорода, турбоагрегат, сосуд под давлением водорода.

A.I. Balitskii, M.M. Semerak, V.A. Balitska, A.V. Subota, J. Elias, O.B. Vus

ANALYSIS OF FIRE-HYDROGEN SAFETY OF TURBOGENERATORS HALLS ON FPP AND NPP POWER UNITS

The accidents relating to hydrogen explosions, fires caused by burning of hydrogen and oil mixtures, cable communications, destruction of turbo aggregates and pipelines in FPP and NPP machine halls during last decades are considered. The characteristics of constructions, related to use of hydrogen pressure vessels and possible ways of increasing hydrogen safety on power units and extinguishing hydrogen fires have been analyzed.

Key words: hydrogen fire, hydrogen explosion, turboaggregate, hydrogen pressure vessel.

