



Львівський державний
університет безпеки
життєдіяльності



Навчально-науковий
інститут цивільного захисту

КОЛЕКТИВНА
МОНОГРАФІЯ

ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ В УМОВАХ ВІЙНИ

Львів 2025

**Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності**

**ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ В УМОВАХ
ВІЙНИ**

CIVIL PROTECTION IN TIMES OF WAR

Львів 2025

УДК 614.8:355.58:351.78(477)
Ц58

Рецензенти: **Шевченко Роман Іванович** – доктор технічних наук, професор, заступник начальника центру – начальник відділу організації науково-дослідної діяльності науково-інноваційного центру Національного університету цивільного захисту України.
Авраменко Олександр Васильович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри логістики Повітряних Сил інституту авіації та протиповітряної оборони Національного університету оборони України.
Рогуля Андрій Олексійович – кандидат наук з державного управління, начальник навчально-методичного центру цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Львівської області.
Зачко Олег Богданович – доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, професор кафедри права та менеджменту у сфері цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Технічний редактор:

Яковчук Роман Святославович – доктор технічних наук, доцент, начальник навчально-наукового інституту цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Рекомендовано до друку Вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
(протокол №1 від 27.08.2025 р.)

Цивільний захист в умовах війни: колективна монографія. Львів: ЛДУБЖД, 2025. 524 с.

Колективна монографія «**Цивільний захист в умовах війни**» присвячена аналізу сучасних викликів та пошуку ефективних рішень у сфері безпеки населення під час збройної агресії проти України. У ній досліджуються питання адаптації захисних споруд для осіб з інвалідністю та маломобільних груп, удосконалення системи евакуації та оповіщення, реагування на радіаційні, хімічні та техногенні загрози. Значна увага приділена командно-штабним навчанням, міжнародному досвіду та інноваційним підходам у сфері цивільного захисту. Автори систематизують проблеми координації органів влади та ДСНС, виявляють недоліки нормативної бази й організаційних процедур, пропонують моделі управління та алгоритми дій у кризових ситуаціях. Теоретична цінність праці полягає в розвитку наукових засад безпеки, зокрема у контексті воєнних загроз, а практична – у створенні конкретних рекомендацій для органів влади, рятувальних служб, військових та місцевих громад. Монографія поєднує наукові підходи, результати моделювання та аналіз реальних кейсів, що забезпечує її прикладне значення. Запропоновані рішення спрямовані на формування безбар'єрного середовища, стійкої системи реагування та ефективного управління надзвичайними ситуаціями. Видання має як наукову, так і практичну цінність для фахівців цивільного захисту, представників державних і місцевих органів влади, освітніх закладів та міжнародних партнерів.

Представлені у монографії матеріали учасників подані в авторській редакції та відображають власну наукову позицію авторів. Автори несуть повну відповідальність за точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, наукової термінології, імен власних, джерел посилання.

© ЛДУБЖД, 2025

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ У МИРНИЙ ЧАС ТА ОСОБЛИВИЙ ПЕРІОД

Сергій БІЛОУС, Олександр СИЧОВ, Мар'ян ЛАВРІВСЬКИЙ, Олександр ЛЮБОВЕЦЬКИЙ, Володимир РИХВА. РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ ТА ДОСВІД ПРОВЕДЕННЯ АВАРІЙНО-РЯТУВАЛЬНИХ РОБІТ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ..... 179

Михайло ШИЧКІН, Василь ЛОЇК, Олександр СИНЕЛЬНІКОВ. РЕАГУВАННЯ НА НАДЗВИЧАЙНІ СИТУАЦІЇ В УМОВАХ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ..... 200

Володимир-Петро ПАРХОМЕНКО, Роман КОНАНЕЦЬ, Роман СУКАЧ. ЛІКВІДАЦІЯ ПОЖЕЖ НА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННИХ ДІЙ..... 225

Євген ШУМСЬКИЙ, Максим ВОЙЧЕНКО, Василь КАРАБИН, Василь ЛОЇК. УПРАВЛІННЯ НАДЗВИЧАЙНИМИ СИТУАЦІЯМИ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ В УМОВАХ ВІЙНИ: ДОСВІД ЛІКВІДАЦІЇ КАТАСТРОФИ НА КАХОВСЬКІЙ ГЕС..... 248

Василь КОВАЛИШИН, Володимир МАРИЧ. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ В КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ..... 267

Василь МАТУХНО, Віталій ЦІОЛКОВСЬКИЙ, Володимир БУДЯЦЬКИЙ, Дмитро ПОЛЩУК, Дмитро БАЗАЛІЄВ. ВПЛИВ ВІЙНИ НА РОЗВИТОК ПРОТИМІННОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В УКРАЇНІ..... 295

Мирослав КОВАЛЬ, Роман РАТУШНИЙ, Олег ПАЗЕН, Дмитро АНДРУХІВ. РОЛЬ МЕХАНІЗМУ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ У ЛІКВІДАЦІЇ МАСШТАБНИХ ПРИРОДНИХ ТА ТЕХНОГЕННИХ КАТАСТРОФ..... 307

Роман ВЕСЕЛІВСЬКИЙ, Андрій ГАВРИСЬ, Тарас БОЙКО, Андрій ТАРНАВСЬКИЙ, Роман ЯКОВЧУК. ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕКРИТТІВ МАШИННИХ ЗАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ..... 317

РОЗДІЛ 3. ЗАХИСТ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА ГІБРИДНИХ ЗАГРОЗ

Олександр СУХОДОЛЯ. РОЗВИТОК СИСТЕМИ ЗАХИСТУ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ: ВИВЧЕННЯ УРОКІВ ВІЙНИ..... 333

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ВОГНЕЗАХИСТУ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕКРИТТІВ МАШИННИХ ЗАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

Роман ВЕСЕЛІВСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент, докторант докторантури-ад'юнктури Львівського державного університету безпеки життєдіяльності,
roman_veselivskuy@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-3266-578X

Андрій ГАВРИСЬ

кандидат технічних наук, доцент, заступник начальника кафедри цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності,
havrys.and@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2527-7906

Тарас БОЙКО

кандидат технічних наук, проректор з організації служби та підготовки Львівського державного університету безпеки життєдіяльності,
tarasboyko78@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0882-2637

Андрій ТАРНАВСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності,
andry090880@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4625-2022

Роман ЯКОВЧУК

доктор технічних наук, доцент, начальник навчально-наукового інституту цивільного захисту Львівського державного університету безпеки життєдіяльності,
r.yakovchuk@ldubgd.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5523-5569

Мета дослідження: моделювання процесу газового середовища для визначення залежності тривалості горіння водню і висоти факела полум'я від геометричного розміру отвору витікання водню при його викиді із корпусу турбогенератора та впливу температури на сталеві конструкції перекриттів машинних залів електричних станцій.

Методи дослідження: аналіз причин виникнення аварій та пожеж під час експлуатації водневого устаткування турбогенераторів електростанцій, аналіз дії небезпечних факторів можливих пожеж на несучі конструкції машинних залів електричних станцій та моделювання процесів викиду водню із корпусу турбогенератора з утворенням горючих воднево-повітряних сумішей та факельного горіння на прикладі машинного залу електростанції.

Результати: при оцінюванні параметрів можливого горіння водню у вигляді факела полум'я встановлено, що його довжина буде становити 12-23 м. При цьому сталеві несучі конструкції машинного залу, що віддалені від вогнища пожежі на відстані до 23 м (конструкції крокв, покриття машинного залу або колони залу) протягом до 22 с можуть перебувати у середовищі з температурою близько 2000 °С, яка дорівнює температурі горіння водню у відкритому повітрі. Виконаний розрахунок свідчить про необхідність вогнезахисту несучих сталевих конструкцій машинного залу вогнезахисними матеріалами, які забезпечують межу вогнестійкості не менше 45 хвилин за вуглеводневою кривою

Теоретична цінність дослідження: робота узагальнює розуміння теплової дії пожежі на сталеві будівельні конструкції внаслідок виникнення горіння водню з утворенням факела полум'я або утворенням вибухонебезпечної суміші, яка згодом може вибухнути.

Практична цінність дослідження: отримані дані можуть бути використані для розробки рекомендацій та технічних параметрів вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій машинних залів електричних станцій при їх проектуванні.

Оригінальність: дослідження підтверджують, що горіння водню у вигляді факела полум'я внаслідок пошкодження турбогенератора буде залежати від геометричних розмірів отвору витікання водню, а його висота може становити 12-23 м. На основі отриманих результатів обґрунтовано необхідність вогнезахисту сталевих будівельних конструкцій машинних залів електричних станцій, оскільки вони будуть нагріватися за вуглеводневою кривою, що призведе до значних руйнувань в короткі проміжки часу.

Ключові слова: вогнезахист, сталева конструкція, водень, вуглеводнева крива, турбогенератор, машинний зал, турбінне масло, вибух, пожежа, факел полум'я.

JUSTIFICATION OF THE NEED FOR FIRE PROTECTION OF STEEL STRUCTURES OF THE FLOORS OF ELECTRICAL MACHINE ROOMS

Roman VESELIVSKYI

Ph.D., Associate Professor, Doctorate in full-time doctoral studies, Lviv State University of Life Safety,
roman_veselivskuy@yahoo.com, ORCID: 0000-0003-3266-578X

Andrii HAVRYS

Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of the Department of Civil Protection,
Lviv State University of Life Safety,
havrys.and@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2527-7906

Taras BOIKO

Ph.D., Vice-Rector for Service Organization and Training, Lviv State University of Life Safety,
tarasboyko78@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0882-2637

Andrii TARNAVSKYI

Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Civil Protection, Lviv State University of Life Safety,
andry090880@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4625-2022

Roman YAKOVCHUK

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Educational and Scientific Institute of Civil Protection, Lviv State University of Life Safety,
r.yakovchuk@ldubgd.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5523-5569

Purpose: modeling of the gas environment process to determine the dependence of the hydrogen combustion duration and flame height on the geometric size of the hydrogen outlet hole when it is released from the turbine generator housing and the temperature effect on the steel structures of the floors of the machine rooms of power plants.

Methods: analysis of the causes of accidents and fires in the operation of hydrogen equipment of turbine generators of power plants, analysis of the impact of hazardous factors of possible fires on the load-bearing structures of power plant engine rooms and modeling of hydrogen emission processes from the turbine generator housing with the formation of combustible hydrogen-air mixtures and flare combustion on the example of a power plant engine room.

Results: when assessing the parameters of possible hydrogen combustion in the form of a flame plume, it was found that its length will be 12-23 m. At the same time, the steel bearing structures of the engine room, which are located at a distance of up to 23 m from the fire (rafter structures, the roof of the engine room or columns of the room), can be exposed to an environment with a temperature of about 2000 °C, which is equal to the temperature of combustion of hydrogen in the open air for up to 22 seconds. The calculation shows that it is necessary to fireproof the load-bearing steel structures of

the machine room with fireproof materials that provide a fire resistance limit of at least 45 minutes according to the hydrocarbon curve.

Theoretical Value: the work summarizes the understanding of the thermal effect of fire on steel building structures due to the occurrence of hydrogen combustion with the formation of a flame plume or the formation of an explosive mixture that can subsequently explode.

Practical Value: The data obtained can be used to develop recommendations and technical parameters for fire protection of steel building structures of power plant engine rooms when designing them.

Originality: studies confirm that hydrogen combustion in the form of a flame plume due to damage to the turbine generator will depend on the geometric dimensions of the hydrogen leakage hole and its height can be 12-23 m. On the basis of the obtained results, the necessity of fire protection of steel building structures of power plant engine rooms is substantiated, since they will be heated according to the hydrocarbon curve, which will lead to significant destruction in a short period of time.

Keywords: fire protection, steel structure, hydrogen, hydrocarbon curve, turbine generator, engine room, turbine oil, explosion, fire, flame plume.

Вступ. Розвиток науково-технічного процесу, а особливо в галузі енергетики супроводжується постійним вдосконаленням технологій отримання електроенергії та підвищенням продуктивності атомних та теплових електростанцій. При збільшенні потужності та коефіцієнта корисної дії електричних генераторів виникає необхідність вдосконалення системи їх охолодження [1-3].

Відомо, що експлуатація турбогенераторів атомних та теплових електростанцій супроводжується виділенням тепла, яке сприяє нагріванню складових частин генератора та може призвести до аварійної ситуації. Оскільки турбогенератори експлуатуються впродовж тривалого часу, то процес безперервного охолодження обладнання генератора у цьому випадку відіграє важливу роль, оскільки його перегрівання може призвести до аварійних ланцюгових реакцій, пожеж, вибухів тощо. Температурний вплив та тепловий потік спричинений пожежею внаслідок аварійної ситуації може призвести до руйнування сталевих несучих конструкцій в короткі проміжки часу.

Сьогодні в якості охолоджувача генераторів використовують: повітря, водень, дистильовану воду, масло [4, 5], які циркулюють по охолоджувальних каналах та відводять тепло від нагрітих елементів.

В сучасних турбогенераторах застосовують газоподібний водень в якості охолоджувача, що зумовлене його високою теплопровідністю і теплоємністю. Охолодження турбогенераторів воднем є більш ефективним, порівняно з повітряним, оскільки коефіцієнт теплопередачі водню, порівняно з повітрям, є у 1,5 раза більшим, а теплопровідність – у 7 разів вища. Застосування водню в системі охолодження обмоток турбогенератора, порівняно з повітрям, не призводить до окислення ізоляції електричних проводів [6].

Попри переваги при охолодженні слід звернути увагу на недоліки застосування водню. Так, зважаючи на дослідження [7-10], при контакті водню з металевими елементами турбогенератора (підшипники, деталі ротора) він може сприяти корозії та подальшому руйнуванню металу, чим погіршує експлуатаційні властивості цих елементів. Можливість проникнення газоподібного водню через пористі ущільнюючі матеріали і найменші нещільності у корпусі турбогенератора та трубопроводах зумовлена його фізико-хімічними властивостями [11], а витікання водню з корпусу турбогенератора достатньо важко виявити вже на відстані 0,25-0,3 м від місця його витоку. Тому у турбогенераторів з водневим охолодженням необхідно забезпечити високу газошільність обмоток статора і ротора, газоохолоджувачів, люків і знімних торцевих щитів [12, 13].

Також одним із основних недоліків водневого охолодження турбогенераторів та використання водню у технологічних процесах електричних станцій є його здатність утворювати з повітрям та парами масла вибухонебезпечні суміші [14-16]. Можливі витіки водню у процесі експлуатації технічних агрегатів можуть призвести до утворення горючої

воднево-повітряної суміші у повітрі та спричинити вибух, пожежу та руйнування несучих сталевих конструкцій перекриттів машинних залів електричних станцій.

Враховуючи вищезазначене, актуальним є завдання запобігання виникненню аварій і пожеж під час експлуатації водневого устаткування турбогенераторів атомних та теплових електростанцій та прогнозування процесів викиду вибухо- та пожежонебезпечних воднево-повітряних сумішей для визначення їх впливу на будівельні конструкції машинного залу електричної станції.

Постановка проблеми. Під час експлуатації турбогенераторів з водневим охолодженням зафіксовано значну кількість вибухів водню з наступним виникненням пожежі у машинних залах електричних станцій (рисунок 1). Наслідки пожежі досить часто призводять до обвалення покрівлі машинного залу та зупинки цілого енергоблоку через втрату вогнестійкості несучих сталевих конструкцій.



Наслідки загоряння турбінного масла турбогенератора з наступним вибухом водню



Наслідки руйнування покрівлі машинного залу після вибуху водню у корпусі турбогенератора на ТЕЦ-1



Пожежа на покрівлі машинного залу внаслідок загоряння турбінного масла у турбогенераторі Бурштинської ТЕС



Наслідки пожежі після вибуху водню у турбогенераторі машинного залу № 2 Чорнобильської АЕС

Рисунок 1 – Наслідки вибухів водню і пожеж у машинних залах електричних станцій при порушенні норм експлуатації турбогенераторів з водневим охолодженням

Ще одним яскравим прикладом небезпеки водню є його вибухи під час аварії на АЕС [17,18] у префектурі Фукусіма внаслідок землетрусу в Японії у 2011 році (рисунок 2).

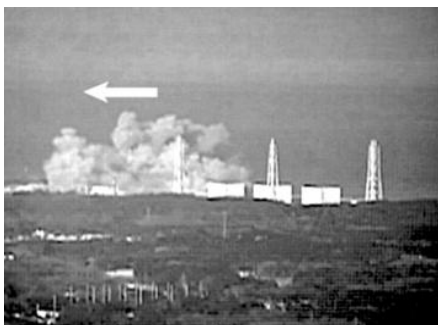


Рисунок 2 – Вибух (детонація) водню на першому, третьому та четвертому енергоблоках після вентиляційних операцій на АЕС “Фукусіма-1”

На рисунку 3 показано наслідки витоку водню через картери підшипників турбогенератора з подальшим його вибухом та руйнуванням обладнання.



Рисунок 3 – Наслідки вибуху водню при витоку через картери підшипників турбогенератора

У суміші з повітрям водень може накопичуватися під обшивкою турбогенератора, в результаті чого можуть виникати локальні вибухи горючої воднево-повітряної суміші з наступним пошкодженням чи руйнуванням обшивки. Саме локальний вибух воднево-повітряної суміші під обшивкою турбогенератора призвів до масштабної пожежі на енергоблоці ДРЕС-2 (с. Іллінське, Сахалін) (рисунок 4).



Рисунок 4 – Пожежа на покрівлі машинного залу внаслідок вибуху водню у корпусі турбогенератора енергоблоку

На рисунку 5 показано наслідки руйнувань після вибуху воднево-оливної суміші в турбогенераторному залі Каширської ТЕС у 2002 році, де найбільш вірогідною причиною виникнення аварії було руйнування і виліт невеликого фрагмента бандажного кільця ротора генератора. Детонація була такої сили, що корпус машинного залу склався, розсипалось перекриття і обвалилася покрівля [19].



Рисунок 5 – Руйнування внаслідок вибуху воднево-оливної суміші в турбогенераторному залі ТЕС

Аналіз статистичних даних про виникнення аварійних ситуацій (пожеж), які пов'язані з витоками водню із технологічного устаткування свідчить про недостатню кваліфікацію оперативного експлуатаційного персоналу, низьку якість ремонту обладнання, помилки

ремонтного персоналу і порушення ними технічних вимог ремонту устаткування та їх систем, дефекти конструкції обладнання і систем, що забезпечують його роботу.

Норми щодо запобігання виникненню аварій і пожеж під час експлуатації водневого устаткування турбогенераторів. Згідно з пунктом 5.2.10 відомчих будівельних норм України [20], для турбогенераторів з водневим охолодженням повинна передбачатися система автоматичного викиду водню з корпусу турбогенератора за межі машинного залу. Пропускна здатність системи і необхідна її швидкодія повинна визначатися розрахунковим способом виходячи із необхідності зниження тиску водню до 1,0 атм. за час 20 с, що визначається допустимою тривалістю теплової дії горючого факела водню на несучі конструкції покриття машинного залу.

Трубопровід для аварійного скидання водню з корпусу турбогенератора виводиться в атмосферу на 2,0 м вище за позначку покрівлі машинного залу [21].

Також для запобігання виникненню аварій та пожеж нормами [22] встановлено ряд заходів, зокрема:

1. Під час експлуатації газо-масляної системи генераторів необхідно запобігати утворенню вибухонебезпечної газової суміші, не допускаючи:

- вмісту кисню у водні у корпусі генератора понад 1,2 %, а у поплавковому затворі, бачку продування та водневовіддільному баці маслоочисного пристрою – понад 2 %;
- вмісту водню у струмопроводах генератора понад 1 %, а у картерах підшипників – понад 2 %.

2. Витискати з генератора водень або повітря необхідно інертним газом, мінімальна концентрація якого після закінчення витиснення визначається на виході із корпусу машини і повинна становити:

- вуглекислого газу – 85 % у разі витиснення повітря і 95 – % у разі витиснення водню;
- азоту – 97 % у разі витиснення повітря і водню.

3. Повноту продування генератора інертним газом у разі витиснення повітря або водню слід підтвердити аналізом газу.

Перед розкриванням корпусів генераторів та апаратів газо-масляної системи водень повинен бути витиснений інертним газом, а інертний газ – повітрям. Відкривати торцеві щити, люки тощо дозволяється тільки після того, як аналіз підтвердить відсутність вуглекислого газу або (у разі витиснення азоту) достатній вміст кисню у повітрі (не менше, ніж 20 % за об'ємом).

4. У разі виведення в ремонт обладнання та трубопроводів газо-масляної системи необхідно від'єднати трубопроводи або встановити заглушки для виключення можливості проникнення водню або інертного газу на ділянки, що ремонтуються, через нещільність засувок.

5. Роботи з відкритим вогнем (електрозварювання, газове зварювання, різання тощо) на відстані менше 10 м від тих частин газо-масляної системи, що містять водень, слід виконувати за нарядом. У цьому разі в рядку "Окремі вказівки" наряду слід записати додаткові заходи, що створюють безпечні умови виконання роботи (встановлення щитів-екранів, перевірка повітря у приміщенні на відсутність водню, наявність засобів пожежогасіння тощо).

6. Забороняється виконувати вогневі роботи безпосередньо на корпусі генератора, трубопроводах та апаратах газо-масляної системи заповнених воднем.

7. Біля генераторів та пристроїв газо-масляної системи слід вивішувати плакати "Водень. Вогненебезпечно!".

8. Ремонтні роботи у газо-масляній системі зупиненого і переведеного на повітря генератора можуть виконуватись за розпорядженням.

Також особливу увагу необхідно приділяти використанню систем автоматичного контролю небезпечних концентрацій водню у повітрі машинного залу та системам раннього виявлення надзвичайних ситуацій на об'єктах електричної станції з наявністю горючих речовин і матеріалів [23-25].

Підсумовуючи вимоги нормативних документів слід зазначити, що приклади аварій та пожеж наведених вище у роботі є наслідками порушень саме норм експлуатації (проведення ремонтних робіт) турбогенераторного обладнання електростанцій.

Причини виникнення аварій та пожеж під час експлуатації водневого устаткування турбогенераторів електростанцій. Серед причин виникнення аварійних ситуацій з витоком водню, що призводять до зупинки і виходу ладу технологічного устаткування газо-масляної системи турбогенератора, можна виділити такі основні:

- витікання водню через фланцеві з'єднання трубопроводів;
- витікання ущільнюючих матеріалів або гумових прокладочних матеріалів у місцях кришки люка, біля фланців корпусу турбогенератора з наступним можливим займанням водню;
- витікання водню через поплавковий гідрозатвор з наступним займанням або “хлопком” у зливних маслопроводах підшипників;
- витікання і наступне самозаймання водню при різкому відкриванні вентиля на газовому пості;
- витікання водню через гумові прокладочні матеріали системи газового охолодження;
- витікання або прорив водню через картери підшипників турбогенератора з наступним можливим спалахуванням або “хлопком” у картерах підшипника внаслідок дефектів вкладиша ущільнювача;
- витікання водню через зварні з'єднання трубопроводів і комунікацій;
- витікання водню через горизонтальні роз'єми торцевих щитів;
- витікання водню через порушення роботи регуляторів перепаду тиску водню і масла, регуляторів надлишкового тиску масла.

Крім того слід відзначити, що частина зафіксованих випадків витікання водню супроводжувалася займанням або “хлопком” водню.

Наявність в системах водневого охолодження турбогенератора горючого водню у суміші з маслом утворює проблему із забезпечення прийнятної рівня вибухо- і пожежобезпеки у машинному залі електростанції. В основному вибухонебезпечне середовище з водню та парів масла може утворюватися в місцях ущільнення водню маслом, а також у прилеглих вузлах у випадку виникнення аварійних ситуацій із витоків водню.

У корпусі турбогенератора горюче середовище може утворитися за наявності вільного повітряного простору після проведення ремонтних робіт, доступу у систему водневих трубопроводів повітря при порушенні вимог технологічного регламенту або порушенні щільності запірної чи регулюючої арматури.

При нормальних умовах роботи турбогенератора та його допоміжних систем речовини можуть мати температуру, яка перевищує їх температуру спалаху або температуру самозаймання. Проте при дотриманні вимог технологічного регламенту та правил експлуатації устаткування горюче середовище в апаратах утворюватися не буде через відсутність вільного простору в апаратах і трубопроводах, а також відсутність окисника.

Однією з основних причин аварійних зупинок та руйнувань вузлів турбогенераторів з водневим охолодженням також є інтенсивне забруднення водню вологою з домішками кисню, оксидів вуглецю або азоту, турбінного масла [26]. При підвищенні вказаних забруднюючих речовин у водні пожежовибухонебезпека займання і вибуху водню у генераторі суттєво зростає. Основними забруднюючими домішками, що можуть потрапити під корпус турбогенератора, є вода (максимальна концентрація 25-30 г/м³), турбінне масло (5,0 г/м³), кисень (0,2 г/м³), воднево-масляний аерозоль (0,15 г/м³).

“Хлопки” воднево-повітряної суміші можливі під час неповного витиснення водню вуглекислим газом з турбогенератора при проведенні планово-профілактичного ремонту і наступним заповненням корпусу апарата повітрям. Вони виникають під час проведення ремонтних зварювальних робіт на трубопроводах системи охолодження.

Також можливе виникнення пожежі при розгерметизації корпусу турбогенератора. У даному випадку при витоків водню з турбогенератора і контакті з киснем повітря може виникнути горіння з утворенням факела полум'я або утворенням вибухонебезпечної суміші, яка згодом може вибухнути. У процесі горіння або вибуху водню виділяється велика кількість тепла для запалювання турбінного масла, яке може витікати з системи змащування і ущільнення вала турбогенератора [27].

Слід зауважити, що при горінні турбінного масла може виникати пожежа в межах площі його розливу як на ділянці обслуговування турбіни і турбогенератора, так і нульовій позначці ($\pm 0,00$ м – у підвальних приміщеннях). Крім того, утворене вогнище пожежі на ділянці обслуговування турбіни і турбогенератора становитиме небезпеку як для сталевих кроквяних ферм перекриття покрівлі, так і для сталевих колон машинного залу. При пошкодженні сталевих кроквяних ферм перекриття покрівлі і колон машинного залу внаслідок впливу пожежі можливе обвалення цілої покрівлі машинного залу.

Аналіз дії небезпечних факторів можливих пожеж на несучі конструкції машинних залів електричних станцій. Тривалий час були відсутні кількісні показники, характеристики динаміки пожежі в машинних залах електричних станцій та їх впливу на основні будівельні конструкції [28]. Так вимоги до мінімальних меж вогнестійкості сталевих ферм машинних залів послідовно зростали з R15 до R45 (від 15 хвилин до 45 хвилин). Через відсутність вогнезахисних складів, здатних задовольнити всі зростаючі вимоги з вогнестійкості, були розроблені рекомендації про охолодження в повному обсязі ферм і колон машинних залів шляхом зрошення їх технічною водою.

Для вирішення завдання кількісної оцінки впливу пожежі на сталеві конструкції каркасу машинного залу, а також отримання об'єктивної оцінки існуючого стану пожежної безпеки, науково-дослідним інститутом пожежної охорони у 1989 році розроблені методи розрахунку прогріву незахищених сталевих конструкцій машинного залу залежно від їх зведеної товщини (відношення площі елемента конструкції до периметру, що обігривається), орієнтації і віддаленості конструкцій від вогнища пожежі. За динамікою прогріву конструкції до критичної температури (як критична температура, що характеризує втрату вогнестійкості конструкції прийнята температура $500\text{ }^{\circ}\text{C}$) за умовами їх стійкості визначається допустима тривалість і площа пожежі.

У виконаних розрахунках визначальними параметрами, що характеризують вплив пожежі (факела палаючого масла) на сталеві конструкції каркасу машинного залу, прийнято такі:

- для горизонтальних конструкцій – H/\sqrt{F}
- для вертикальних конструкцій – X/\sqrt{F} ,

де: H – висота конструкції над вогнищем пожежі;

X – відстань від вогнища пожежі до конструкції;

F – площа вогнища пожежі.

Розглядаються такі варіанти пожеж:

- факельне горіння водню при його витіканні з корпусу генератора;
- горіння масла на майданчику обслуговування, що розлилося з системи мащення і ущільнення генератора;
- факельне горіння струменя масла, що фонтанує із зруйнованого напірного маслопроводу на позначці обслуговування турбіни;
- горіння масла в межах головного маслобака.

Геометричні розміри вогнища пожежі турбінного масла, що надходить з маслоснаповненого обладнання, визначаються витратою масла, тривалістю витікання й в'язкістю масла. Площа вогнища пожежі визначає тривалість впливу пожежі на конструкції машзалу.

Враховуючи значну кількість аварій (пожеж) та причин їх виникнення при експлуатації водневого устаткування турбогенераторів електростанцій, актуальним є моделювання процесу горіння водню та впливу пожежі на несучі конструкції машинних залів електростанцій. Отримані результати моделювання дадуть змогу встановити необхідність вогнезахисту сталевих конструкцій перекриттів машинних залів електричних станцій.

Метою роботи моделювання процесу газового середовища для визначення залежності тривалості горіння водню і висоти факела полум'я від геометричного розміру отвору витікання водню при його викиді із корпусу турбогенератора та впливу температури на сталеві конструкції перекриттів машинних залів електричних станцій.

Методи досліджень. Аналіз причин виникнення аварій та пожеж при експлуатації водневого устаткування турбогенераторів електростанцій та моделювання процесів викиду

водню із корпусу турбогенератора з утворенням горючих воднево-повітряних сумішей та факельного горіння на прикладі машинного залу електростанції.

Результати досліджень. Для виникнення пожежі необхідні три умови: наявність горючих матеріалів, взаємодія горючих матеріалів з киснем і джерелом запалювання. Виходячи з цього, розглянемо ділянки можливого виникнення пожежі в машинному залі електростанції умовно розділивши його об'єм на чотири зони: 1 зона – об'єм машинного залу над майданчиком обслуговування турбіни, 2 зона – майданчик обслуговування турбіни, 3 зона – об'єм машинного залу від позначки $\pm 0,00$ м до майданчика обслуговування турбіни, 4 зона – об'єм машинного залу нижче за позначку $\pm 0,00$ м.

При розгерметизації корпусу генератора на позначці обслуговування турбіни ймовірно виникнення пожежі, що підтверджується статистикою пожеж. У цьому випадку при контакті водню з киснем повітря може початися горіння і утворитися дифузійний факел полум'я або вибух. В процесі цих явищ виділяється достатньо енергії для запалення турбінного масла, що витікає із системи змащення й ущільнення вала генератора. Це може призвести до виникнення пожежі в межах площі розливу масла як на майданчику обслуговування турбіни, так і на позначці $\pm 0,00$ м. Вогнище пожежі на позначці обслуговування турбоустановки може становити небезпеку як для кроквяних ферм конструкцій перекриття, так і для колон машинного залу.

Таким чином, подальшу оцінку впливу пожежі на несучі конструкції машинного залу електростанції проводимо від впливу факельного горіння водню при його витіканні з корпусу генератора.

Згідно з довідковими даними вибухонебезпечні властивості водневої суміші з повітрям характеризуються такими даними: область займання 4,12-75,4 % об., мінімальна енергія запалювання – 0,02 МДж, температура самозаймання – 783 К, нормальна швидкість поширення полум'я – 2,7 м/с, мінімальний вибухонебезпечний вміст кисню – 5,0 % об. [29].

Геометричні розміри вогнища пожежі при розливі турбінного масла з маслосистеми устаткування розраховуються за формулою (1.1):

$$\frac{R}{\sqrt[3]{Q\tau}} = 0,46 \left(\frac{gQ\tau}{v^2} \right)^{0,06} \cdot \left(\frac{g\tau^2}{\sqrt[3]{Q\tau}} \right)^{0,06}, \quad (1.1)$$

де R – радіус розтікання турбінного масла, м; Q – витрата масла, м³/с; τ – тривалість виділення, с; v – в'язкість турбінного масла; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Витрата турбінного масла при його розливі з маслосистеми і ущільнення вала генератора приймається рівною сумі витрат масла через 2 підшипники і 2 ущільнення генератора і може становити до 25 л/с.

Тривалість виділення масла залежить від часу спрацьовування відсічної арматури на маслопроводах. Для вивчення залежності параметрів газоповітряного середовища від площі пожежі тривалість виділення масла приймаємо від 1 до 5 хвилин. В'язкість турбінного масла $v = 23$ і приймається за технічними умовами. Для головного маслобака приймається варіант безнапірної протоки турбінного масла, при цьому площа пожежі приймається чисельно рівна площі його монтажного майданчика.

Можливі параметри горіння водню при розгерметизації корпусу турбогенератора будуть залежати, в основному, від швидкості витікання водню з місця пошкодження, геометричних розмірів отвору, а також від теплофізичних властивостей самого водню, що горить [30].

Швидкість і тривалість витікання водню з місця пошкодження турбогенератора можна розрахувати за такою формулою (1.2):

$$u = \mu \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_v - P_a)}{\rho}}, \quad \tau = \frac{V}{d_0^2 \cdot u}, \quad (1.2)$$

де $\mu = 1$ – коефіцієнт витрати водню через аварійний отвір умовного діаметра d_0 ; P_v – тиск водню у турбогенераторі, кгс/см²; P_a – атмосферний тиск, кгс/см²; ρ – густина водню за н.у., кг/м³; V – об'єм водню у турбогенераторі, м³.

Згідно з технічними характеристиками об'єм водню у турбогенераторі становить 73 м^3 , а тиск водню – $3,0 \text{ кгс/см}^2$. Отже, швидкість витікання водню через аварійний отвір з умовним діаметром d_0 буде становить менше 330 м/с .

Розміри полум'я залежать, в основному, від швидкості витікання газу через отвір, геометричного розміру отвору, а також від фізичних властивостей газу, що горить. Для водню в області $0 \leq Fr \leq 2 \cdot 10^6$ можна визначити висоту факела полум'я при горінні L_ϕ за формулою (1.3):

$$\frac{L_\phi}{d_0} = c \cdot Fr^m \cdot Pr^n \quad [\text{м}], \quad (1.3)$$

де d_0 – геометричний діаметр отвору, м; c , m і n – постійні коефіцієнти; $Fr = \frac{u^2}{g \cdot d_0}$ – критерій

Фруда; $Pr = \frac{\nu}{D}$ – дифузійний критерій Прандтля; u – швидкість витікання газу, м/с.

Для водню в межах $Fr > 2 \cdot 10^6$ співвідношення $\frac{L_\phi}{d_0}$ буде рівне 220-230.

Під час дослідження режимів витікання водню через сопла різної форми було встановлено, що в області значень $40 \leq Fr \leq 10^5$ $c = 14$, $n = 0$, $m = 0,2$, а в області значень $10^5 \leq Fr \leq 2 \cdot 10^6$ $c = 7$, $n = 1$, $m = 0,1$.

Задаючись значеннями $d_0 < D_{max}$ при швидкості витікання водню 300 м/с за наведеними вище залежностями розраховуємо значення L_ϕ і τ . Одержані розрахункові результати наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Розрахункові параметри горіння водню при витокі через нещільності турбогенераторної установки

№	Геометричний діаметр отвору d_0 , м (мм)	Висота факела полум'я L_ϕ , м	Тривалість горіння τ , с
1	0,005 (5)	1,15	8850 (147 хв 30 с)
2	0,01 (10)	2,3	2212 (36 хв 52 с)
3	0,05 (50)	11,5	89 (1 хв 29 с)
4	0,1 (100)	23,0	22
5	0,2 (200)	46,0	6

Згідно одержаних результатів видно, що найбільша тривалість горіння водню буде відбуватись при його витіканні через отвори з геометричним розміром d_0 в межах $0,05-0,1 \text{ м}$ ($50-100 \text{ мм}$). При більших значеннях геометричного розміру отвору $d_0 > 0,1 \text{ м}$ тривалість горіння водню є незначною, а при значеннях $d_0 < 0,005 \text{ м}$ – довжина факела полум'я L_ϕ не перевищує $1,15 \text{ м}$.

Як розрахунковий варіант приймаються варіанти факельного горіння водню з такими параметрами: висота факела полум'я 23 м , тривалість горіння 20 с ; висота факела полум'я 12 м , тривалість горіння 90 с .

Оцінка параметрів факельного горіння струменя фонтануючого турбінного масла при розриві напірного маслопроводу проводиться для випадку, коли діаметр отвору чисельно дорівнює діаметру маслопроводу.

Швидкість витікання рідини з отвору визначається за формулою (1.4):

$$v = \phi \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (1.4)$$

де ΔP – надмірний тиск в трубопроводі; ϕ – коефіцієнт швидкості, що враховує втрати напору, обумовлені протіканням рідини через отвір, і які характеризуються коефіцієнтом місцевого опору отвору ξ_0 .

Витрата рідини, що витікає з отвору, обчислюється за формулою (1.5):

$$Q = \mu \omega \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1.5)$$

де $\mu = \varphi \varepsilon$ – коефіцієнт витрати отвору.

Усі коефіцієнти витікання залежать від числа Re (Рейнольдса), яке розраховується за формулою (1.6):

$$Re = d \sqrt{2\Delta P / \nu} \quad (1.6)$$

де d – діаметр отвору, м; ν – в'язкість рідини,

Довжина горизонтальної частини струменя, що витікає з вертикального трубопроводу знаходиться за залежністю (1.7):

$$L = \sqrt{\frac{4\varphi\Delta P}{g\rho}} \quad (1.7)$$

Висота вертикального компактного струменя, що витікає з горизонтального трубопроводу може бути оцінена за формулою (1.8):

$$L_k = \alpha \left(\frac{\varphi^2 \Delta P}{g\rho} - 0,000113 \frac{(\varphi^2 \Delta P / g\rho)^2}{\alpha} \right) \quad (1.8)$$

де α – числовий коефіцієнт, що приймається згідно з таблицею 1.2.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта α

$\Delta P/g\rho$	15,2	22,7	30,5	38,1	15,7
α	0,82	0,79	0,73	0,57	0,63

Відомо, що теплова дія пожежі на конструкції обумовлюється передачею тепла випромінюванням і конвекцією. Залежно від характеру процесу горіння, кількості димового аерозолу, що виділяється, об'єму приміщення і умов повітрообміну, прогрівання конструкцій на різних стадіях пожежі може визначатися або тільки випромінюванням (тільки конвекцією) або спільною дією обох чинників.

Турбулентний конвективний струмінь складається з трьох зон: зони горіння, перехідної зони і зони продуктів горіння:

1 зона – зона горіння, є турбулентною дифузійною частиною полум'я з найбільш високою температурою і радіацією. У цій зоні найбільший вплив на тривалість прогрівання конструкцій робить випромінювання полум'я і міру чорноти тіла, що нагрівається.

2 зона – перехідна область, в якій температури продовжують залишатися високими, але вплив радіації зменшується. Умови нагрівання в цій зоні змінюються по висоті і залежать від температури і випромінювання полум'я, яке помітно ослабляється у міру видалення від області, прилеглої до полум'я. Висота перехідної області може бути прийнята рівною висоті полум'я, а температура на верхній межі зони, прилеглої до конвективної частини струменя, – в два рази меншою, за температуру полум'я.

3 зона – конвективна частина струменя, випромінювання в ній практично не впливає на умови прогрівання, які в основному залежать від зміщення тіла, що нагрівається, відносно осі конвективних струменів і швидкості газоповітряного потоку, що омиває конструкцію.

При оцінюванні параметрів можливого горіння водню у вигляді факела полум'я його довжина буде становити, в основному, 12-23 м. При цьому сталеві несучі конструкції машинного залу, що віддалені від вогнища пожежі на відстані до 23 м (конструкції крокв, покриття машинного залу або колони залу) протягом до 22 с можуть перебувати у середовищі з температурою біля 2000 °С, яка дорівнює температурі горіння водню у відкритому повітрі.

Проведений розрахунок свідчить про необхідність вогнезахисту несучих сталевих конструкцій машинного залу вогнезахисними матеріалами, які забезпечують межу вогнестійкості не менше 45 хвилин за вуглеводневою кривою. Для зменшення впливу пожежі

доцільне застосування теплозахисних екранів для розсіювання тепла факелу з метою захисту несучих сталевих конструкцій.

Висновки

У роботі виконано аналіз причин виникнення аварійних ситуацій та пожеж при експлуатації водневого устаткування турбогенераторів електростанцій. Встановлено, що діючі норми та профілактичні заходи спрямовані на підвищення рівня пожежної безпеки турбогенераторів при експлуатації машинних залів електростанцій.

Обґрунтовано пожежну небезпеку при експлуатації технологічного обладнання турбінних установок з врахуванням можливості вибухів воднево-повітряних сумішей. Аналіз аварій показав, що здатність водню утворювати з повітрям та парами масла вибухонебезпечні суміші може повністю вивести енергоблок з промислової експлуатації і призвести до значних матеріальних втрат та травмування обслуговуючого персоналу. Утворене вогнище пожежі на ділянці обслуговування турбіни і турбогенератора становитиме небезпеку як для сталевих кроквяних ферм перекриття покрівлі, так і для сталевих колон машинного залу. При пошкодженні сталевих кроквяних ферм перекриття покрівлі і колон машинного залу внаслідок впливу пожежі можливе обвалення цілої покрівлі машинного залу.

У роботі виконано моделювання процесу горіння водню при його викиді із корпуса турбогенератора на прикладі машинного залу електростанції. Проведені дослідження показали, що найбільша тривалість горіння водню буде відбуватись при його витіканні через отвори з геометричним розміром d_0 в межах 0,05-0,1 м (50-100 мм). При більших значеннях геометричного розміру отвору $d_0 > 0,1$ м тривалість горіння водню є незначною, а при значеннях $d_0 < 0,005$ м – довжина факела полум'я L_f не перевищує 1,15 м.

Результати проведених досліджень підтверджують, що внаслідок пошкодження турбогенератора можливе горіння водню у вигляді факела полум'я. При цьому його довжина буде залежати від геометричних розмірів отвору витікання водню і може становити 12-23 м. Будівельні конструкції машинного залу, що потрапляють у зону дії факела полум'я, можуть нагріватися до температури 2000 °С та руйнуватися протягом невеликого проміжку часу.

Виконаний розрахунок свідчить про необхідність вогнезахисту несучих сталевих конструкцій машинного залу для забезпечення межі вогнестійкості не менше 45 хвилин за вуглеводневою кривою.

Список використаних джерел

1. Gakal, P., Ovsiannykova, O., Przybysz, J., Tretiak, O. (2017). Metoda wyznaczenia rozkładu temperatur w uzwojeniu wirnika chłodzonego bezpośrednio wodorem. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2, 43-47. DOI: 10.15199/48.2017.02.11.
2. Kobzar, K., Tretiak, O., Ovsiannykova, O., Poliienko, V., Gakal P. (2018). Designing of high power turbogenerators. *Vestnik KazNRTU*, 4 (128), 164-169.
3. Tretiak, O., Kovryga, A., Repetenko, M., & Nurmetov, R. (2019). Исследование теплового состояния гидрогенератора зонтичного типа методами САЕ. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, (3), 42–46. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.06>.
4. Бардик Є. І., Лукаш М. П. Електрична частина станцій та підстанцій. Синхронні генератори: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2008. 88 с.
5. Narine, Ganesh, "Causes and Prevention of Electric Power Industry Accidents: A Delphi Study" (2019). *Walden Dissertations and Doctoral Studies*. 7495. <https://scholarworks.waldenu.edu/dissertations/7495>.
6. Tarnavskiy, A., Veselivskyy, R., Panasiuk, A. (2024). Prognozowanie procesu emisji wodoru z obudowy turbogeneratora z powstawaniem palnych mieszanin wodorowo-powietrznych i spalaniem pochodni. *Ochrona ludności i dziedzictwa kulturowego*, 2024, 109-129. doi: <https://doi.org/10.4467/29563763.OLDK.23.016.19139>.

7. Peter Rhys Lewis, Chapter 5 (2016) Small Containers, In Woodhead Publishing in Materials, Forensic Polymer Engineering (Second Edition). Woodhead Publishing, 147-190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101055-6.00005-7>.

8. Коррозия полых медных проводников в системах непосредственного водяного охлаждения обмоток турбогенераторов / Иванов А.С. [и др.]. *Universum: Технические науки: электрон. научн. журн.* 2016. № 11(32). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/3943>.

9. Maughan, C., Svoboda, M. (2016) Water-cooled stator windings copper oxide issues. *Electrical Insulation Conference (EIC), Montreal, Qc, Canada.* 145-150.

10. Wenyao Li, Ruohan Cao, Lining Xu, Lijie Qiao. (2021) The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels - a review. *Elsevier*, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.10.005>.

11. Zuettel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Mater Today.* 24-33.

12. Грубой О. П., Кобзар К. О., Черемісов І. Я., Хаймович Л. Л., Богданов О. А., Гладкий В. В. Створення нових типів та шляхи модернізації діючих турбогенераторів для теплових електричних станцій: в кн. Теплової енергетика – нові виклики часу / за загал. ред.: П. Омеляновського, Й. Мисака. Львів : *НВФ Українські технології*, 2009. С. 209-225.

13. Особливості конструкцій турбогенераторів. URL : <http://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/osobennosti-konstrukciy-turbogeneratorov.html> (дата звернення: 05.04.2025).

14. Hanane D., Roberto S., Chiara B., Ahmed O. (2018). Hydrogen Infrastructure for Energy Applications. *Academic Press*, 153-156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812036-1.09995-9>.

15. Kempell, I.D., et al. (2001). Hydrogen Explosions – an Example of Hazard Avoidance and Control. *ICHEME, Symp. Series*, 148. 523-539.

16. Ольховик Ю.О., Антонов А.В., Денисенко І.Ю., Веселівський Р.Б. (2021) Деякі особливості захоронення солебітумного компаунду рівненської АЕС. *Екологія і виробництво*, 3(36), 69-72. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.11>.

17. Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy (2022), *Elsevier*, 650 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90394-3.09990-2>.

18. S. Abe. (2015) The response of the plant owner/operator (TEPCO) to the Fukushima nuclear power plant accident, The 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Accident. *Woodhead Publishing*, 119-134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100118-9.00004-8>.

19. Балицький О.І., Семерак М.М., Билицька В.О., Субота А.В., Еліаш Я., Вус О.Б. (2012) Аналіз пожежно-водневої безпеки турбогенераторних залів на енергоблоках електростанцій. *Пожежна безпека*, 21, 13-18.

20. Протипожежні норми проектування атомних електростанцій з водо-водяними енергетичними реакторами : ВБН В.1.1-034-2003 (НАПБ 03.005-2002, ГНД 34.03.307-2004, ВБН В.1.1-034-03.307-2003) [Чинний від 25.12.2013]. Київ: Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Енергопроект», 2002. 84 с.

21. Про затвердження Правил пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України: наказ Міненерговугілля України від 26 вересня 2018 р. № 491. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/371146__710398 (дата звернення: 12.05.2025).

22. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок: наказ Держнаглядохоронпраці від 06 жовтня 1997 р. № 257. URL: https://zakononline.com.ua/documents/show/180319__520016 (дата звернення: 15.05.2025).

23. Xuefeng Lyu, Zeyun Xun, Ke Ji, Xiaobo Lee, Shengfei Wang, Yu Yu, Long Chen (2018). Analysis on hydrogen control system in AP1000 NPP. *Annals of Nuclear Energy*, 113. 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.031>.

24. Xuefeng Lyu, Shuai Liu, Ke Ji, Yang Feng, Shengfei Wang, Zhichao Huang (2020). Research on hydrogen risk and hydrogen control system in marine nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107373>.

25. Жук М.В., Ільчишин Я.В. Системи раннього виявлення надзвичайних ситуацій на об'єктах підвищеної небезпеки. Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих

вчених: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів і студентів (Черкаси, 13 травня 2021р.). *Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ*, 2021. С. 278–279.

26. Семерак М.М., Субота А.В., Желяк В.І. Моделювання термогазодинамічних параметрів струменяводню у разі розгерметизації корпусу турбогенератора електричної станції. *Вісник ЛДУБЖД*. 2013. № 7. С. 225–229.

27. Семичаєвський С.В., Свірський В.В., Алімов Б.О., Стилик І.Г. Щодо пожежної небезпеки машинних залів енергетичних підприємств. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 6. С. 1455–150. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/24>.

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

29. Семерак М.М., Ковалишин В.В., Домінік А.М., Кирилів Я.Б. Термостійкість конструкцій машинних залів АЕС. *Пожезна безпека*. 2011. № 7. С. 7–12.

30. Jacobsen, R.T., Leachman, J.W., Penoncello, S.G. *et al.* Current Status of Thermodynamic Properties of Hydrogen. *Int J Thermophys* 28, 758–772 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0226-7>.

References

1. Gakal, P., Ovsiannykova, O., Przybysz, J., Tretiak, O. (2017). Metoda wyznaczenia rozkładu temperatur w uzwojeniu wirnika chłodzonego bezpośrednio wodorem. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2, 43-47. DOI: 10.15199/48.2017.02.11.

2. Kobzar, K., Tretiak, O., Ovsiannykova, O., Poliienko, V., Gakal P. (2018). Designing of high power turbogenerators. *Vestnik KazNRTU*, 4 (128), 164-169.

3. O. Tretiak, A. Kovryga, M. Repetenko, R. Nurmetov (2019) Yssledovanye teplovoho sostoiannya hydroheneratora zontychnoho typu metodamy SAE [The research of the thermal state of the umbrella type hydrogenerator by cae methods]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. *Seriia: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia*, (3), 42–46. [in Russian]. <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2019.03.06>.

4. Bardyk Ye. I., Lukash M. P. (2008) Elektrychna chastyna stantsii ta pidstantsii. Synkhronni heneratory [Electrical part of stations and substations. Synchronous generators]. Kyiv: NTUU «KPI».

5. Narine, Ganesh, "Causes and Prevention of Electric Power Industry Accidents: A Delphi Study" (2019). *Walden Dissertations and Doctoral Studies*. 7495. <https://scholarworks.waldenu.edu/dissertations/7495>.

6. Tarnavskyyi, A., Veselivskyy, R., Panasiuk, A. (2024). Prognozowanie procesu emisji wodoru z obudowy turbogeneratora z powstawaniem palnych mieszanin wodorowo-powietrznych i spalaniem pochodni. *Ochrona ludności i dziedzictwa kulturowego*, 2024, 109-129. doi: <https://doi.org/10.4467/29563763.OLDK.23.016.19139>.

7. Peter Rhys Lewis, Chapter 5 (2016) Small Containers, In Woodhead Publishing in Materials, Forensic Polymer Engineering (Second Edition). *Woodhead Publishing*, 147-190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101055-6.00005-7>.

8. Korrozia polykh mednykh provodnykov v systemakh neposredstvennoho vodianoho okhlazhdeniya obmotok turbogeneratorov [Corrosion of hollow copper conductors in systems of direct water cooling of turbogenerator windings]. Yvanov A.S. [y dr.]. *Tekhnicheskyye nauky: elektron. nauchn. zhurn.* 2016. № 11(32).

9. Maughan, C., Svoboda, M. (2016) Water-cooled stator windings copper oxide issues. *Electrical Insulation Conference (EIC), Montreal, Qc, Canada*. 145-150.

10. Wenyao Li, Ruohan Cao, Lining Xu, Lijie Qiao. (2021) The role of hydrogen in the corrosion and cracking of steels - a review. *Elsevier*, 23-32. <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.10.005>.

11. Zuettel, A. (2003). Materials for hydrogen storage. *Mater Today*. 24-33.

12. Gruboy, O., Kobzar, K., Cheremisov, I., Khaymovich, L., Bogdanov, O., Gladky, V. (2009). Stvorennia novykh typiv ta shliakhy modernizatsii diiuchykh turbogeneratoriv dlia teplovykh

elektrychnykh stantsii [Development of new types and ways to modernize existing turbine generators for thermal power plants]: v kn. *Teplova enerhetyka – novi vyklyky chasu. Lviv : NVF Ukrainski tekhnologii*. [in Ukrainian].

13. Osoblyvosti konstruksii turbogeneratoriv. URL : <http://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/osobnosti-konstrukciy-turbogeneratorov.html> (accessed on March 2025).

14. Hanane D., Roberto S., Chiara B., Ahmed O. (2018). Hydrogen Infrastructure for Energy Applications. *Academic Press*, 153-156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812036-1.09995-9>.

15. Kempell, I.D., et al. (2001). Hydrogen Explosions – an Example of Hazard Avoidance and Control. *ICHEME, Symp. Series*, 148. 523-539.

16. Olkhovyk, Yu.O., Antonov, A., Denysenko, I., Veselivskyi, R. (2021). Deiaki osoblyvosti zakhoronennia solebitumnoho kompaundu rivnenskoj AES [Some features of the landfill of the solebitumen compound of the Rivne NPP.], *Ekolohiia i vyrobnytstvo*. 3(36). 69-72. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.3-36.11> [in Ukrainian].

17. Machinery and Energy Systems for the Hydrogen Economy (2022), *Elsevier*, 650 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90394-3.09990-2>.

18. S. Abe. (2015) The response of the plant owner/operator (TEPCO) to the Fukushima nuclear power plant accident, *The 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Accident. Woodhead Publishing*, 119-134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100118-9.00004-8>.

19. Balitskii, A., Semerak, M., Balitska, V., Subota, A., Elias, J., Vus O. (2012). Analiz pozhezhno-vodnoyi bezpeky turbogeneratornykh zaliv na enerhoblokakh elektrostantsii [Analysis of fire-hydrogen safety of turbogenerators halls on FPP and NPP power units]. *Pozhezhna bezpeka*, 21, 13-18. [in Ukrainian].

20. *Protypozhezhni normy proektuvannia atomnykh elektrostantsii z vodo-vodianymy enerhetychnymy reaktoramy* [Fire protection standards for the design of nuclear power plants with water-water power reactors]. (2002). VBN V.1.1-034-2003 (NAPB 03.005-2002, HND 34.03.307-2004, VBN V.1.1-034-03.307-2003), from 25st December 2003. Kyiv: Kyiv Research and Design Institute “Energoprojekt”. [in Ukrainian].

21. Nakaz Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy Pro zatverdzhennia Pravyl pozhezhnoi bezpeky v kompaniiakh, na pidpriemstvakh ta v orhanizatsiiakh enerhetychnoi haluzi Ukrainy vid 26 veresnia 2018 roku № 491 [On Approval of Fire Safety Rules in Companies, Enterprises and Organizations of the Energy Sector of Ukraine]. Retrieved from: https://zakononline.com.ua/documents/show/371146__710398 [in Ukrainian].

22. Nakaz Derzhavnoho komitetu Ukrainy z nahliadu za okhoronoiu pratsi Pro zatverdzhennia Pravyl bezpechnoi ekspluatatsii elektroustanovok vid 06 zhovtnia 1997 roku № 257 [On Approval of the Rules for the Safe Operation of Electrical Installations]. Retrieved from: https://zakononline.com.ua/documents/show/180319__520016 [in Ukrainian].

23. Xuefeng Lyu, Zeyun Xun, Ke Ji, Xiaobo Lee, Shengfei Wang, Yu Yu, Long Chen (2018). Analysis on hydrogen control system in AP1000 NPP. *Annals of Nuclear Energy*, 113. 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.11.031>.

24. Xuefeng Lyu, Shuai Liu, Ke Ji, Yang Feng, Shengfei Wang, Zhichao Huang (2020). Research on hydrogen risk and hydrogen control system in marine nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107373>.

25. Zhuk M.V., Ilchyshyn Ya.V. (2021) Systemy rannoho vyavleniia nadzvychainykh sytuatsii na ob'ektakh pidvyshchenoi nebezpeky [Systems for early detection of emergencies at high-risk facilities]. *Nauka pro tsyvilnyi zakhyst yak shliakh stanovlennia molodykh vchenykh: Materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii kursantiv i studentiv [Civil Defense Science as a Way of Formation of Young Scientists: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Cadets and Students]*, *Cherkasy: CHIPB NUTsZU*, S. 278–279. [in Ukrainian].

26. Semerak M.M., Subota A.V., Zhelyak V.I. (2013) Modeliuvannia termohazodynamichnykh parametriv strumeniavodniu u razi rozghermetyzatsii korpusa turbogeneratora elektrychnoi stantsii [Design of thermo-gasodynamics parameters of hydrogen stream in case of depressurization of the power station turbogenerator's body]. *Visnyk LDUBZhD*, 7, 225–229 [in Ukrainian].

27. Semichaevsky S.V., Svirsky V.V., Alimov B.O., Stylyk I.G. (2021) Shchodo pozhezhnoi nebezpeky mashynnykh zaliv enerhetychnykh pidpriumstv [On fire danger of turbine rooms of energy enterprises]. *Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho, Seria: Tekhnichni nauky*, 32 (71). № 6. С. 1455–150. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/24> [in Ukrainian].

28. Tekhnicheskye predlozheniya po povysheniyu pozharnoi bezopasnosti mashzalov AES y ustoichyvosti ykh stroytelnykh konstruktsiy pry pozhare [Technical proposals to improve fire safety of NPP halls and stability of their building structures in case of fire] (1993). KYEP – TPPB – K.

29. Semerak, M.M., Kovalyshyn, V.V., Dominik, A.M., Kyryliw, Ya.B. (2011) Termostiikist konstruktsii mashynnykh zaliv AES [Thermal resistance of structures of NPP machine rooms]. *Pozhezhna bezpeka*, 7, 7–12 [in Ukrainian].

30. Jacobsen, R.T., Leachman, J.W., Penoncello, S.G. *et al.* Current Status of Thermodynamic Properties of Hydrogen. *Int J Thermophys* 28, 758–772 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0226-7>.