



*В. М. Баланюк<sup>1</sup>, В. С. Мирошкін<sup>1</sup>, Н. І. Гузар<sup>1</sup>,  
О. І. Гарасим'юк<sup>2</sup>, Ю. О. Копистинський<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

<sup>2</sup>Головне управління ДСНС України в м. Києві, м. Київ, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0853-4229> – В. М. Баланюк

<https://orcid.org/0000-0003-3907-6945> – В. С. Мирошкін

<https://orcid.org/0009-0003-7189-6545> – Н. І. Гузар

<https://orcid.org/0000-0001-9708-9862> – О. І. Гарасим'юк

<https://orcid.org/0000-0002-4182-7106> – Ю. О. Копистинський



[balr33@ukr.net](mailto:balr33@ukr.net)

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ВІДКРИТИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВОГНЕГАСНИХ АЕРОЗОЛІВ

**Постановка проблеми.** Пожежі в електричних підстанціях можуть призводити до припинення електропостачання населених пунктів, виробництв та об'єктів критичної інфраструктури. Такі пожежі супроводжуються значними матеріальними збитками. Завдають шкоди навколишньому середовищу. Процес їх гасіння є складним та небезпечним для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів та працівників енергетичних підприємств.

До загальної проблематики додаються ракетні удари ворога по об'єктах електроенергетики України. У період з лютого 2022 р. по лютий 2023 р. їх було 225. Під час гасіння пожеж, спричинених обстрілами, пожежно-рятувальні підрозділи не можуть ефективно діяти через ризик повторних обстрілів. Час очікування до моменту початку ліквідації пожежі може бути тривалим. За цей час пожежа розвивається та завдає значної шкоди.

Згідно із статистичними даними найбільше пожеж в електричних підстанціях виникає у електричних трансформаторах. У деяких випадках наявні системи пожежогасіння трансформаторів не можуть забезпечити успішне гасіння, що призводить до розповсюдження вогню на більшу площу та збільшує негативні наслідки від пожежі.

Наведена проблематика зумовлює необхідність підвищення захисту електрообладнання підстанцій від пожеж, обладнання цих об'єктів ефективнішими системами пожежогасіння, які здатні мінімізувати негативні наслідки.

**Мета роботи.** Теоретично обґрунтувати підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів.

**Задачі.** Провести огляд та аналіз систем протипожежного захисту електричних підстанцій та виявити їх недоліки. Визначити необхідні критерії ефективності, яким повинні відповідати такі системи. Систематизувати та узагальнити передовий досвід гасіння пожеж на відкритих електропідстанціях.

**Методи.** У роботі використано метод аналізу, порівняння і узагальнення науково-технічних досягнень з питань застосування різних вогнегасних речовин та способів гасіння пожеж на електропідстанціях.

**Результати дослідження.** Встановлено, що висока ефективність гасіння трансформатора аерозолем буде забезпечуватись такими процесами. В момент випаровування трансформаторної оливи аерозоль буде забезпечувати флегматизування горючого середовища. При горінні трансформаторної оливи буде відбуватись інгібування хімічних реакцій в полум'ї свіжоутвореними дрібнодисперсними твердими частинками аерозолу ( $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ ,  $KOH$ ,  $KCl$ , та ін.) і продуктами їх розпаду ( $K_2O$ ,  $KO$  та ін.). Також при горінні трансформаторної оливи буде забезпечуватись захист дзеркала горючої рідини від теплової радіації полум'я, завдяки поглинанню частинками аерозолу теплових променів, що йдуть від зони горіння. Зниження температури зони горіння завдяки поглинання тепла при нагріванні, плавленні, випаровуванні і розкладанні твердих частинок аерозолу. Припинення горіння шляхом перемішування горючої рідини (при підшаровому гасінні). Тривалим часом захисної дії завислих частинок вогнегасного аерозолу в умовно герметичному об'ємі є близько 25 хв, що цілком достатньо для унеможливлення подальшого продовження горіння через охолодження нагрітих огорожувальних конструкцій.

**Висновки.** Таким чином, для ефективного гасіння пожеж електричних трансформаторів та підстанцій теоретично найбільше в якості вогнегасного засобу підходить вогнегасний аерозоль, який володіє таким характеристиками: швидка активація системи (низька інерційність спрацювання), висока вогнегасна та флегматизувальна ефективність, простота конструкції та надійність, вибухозахищеність (вибухостійкість), висока інтенсивність подачі вогнегасної речовини, достатня тривалість подачі вогнегасних речовин, ефективність застосування на відкритому просторі,

скрануюча здатність, а також можливість гасіння пожежі ззовні та флегматизація газового середовища всередині трансформатора одночасно.

**Ключові слова:** електричний трансформатор, вогнегасні аерозолі, гасіння пожеж, трансформаторні підстанції, електропідстанція, об'єкти критичної інфраструктури, системи пожежогасіння трансформатора.

*V. M. Balanyuk<sup>1</sup>, V. S. Myroshkin<sup>1</sup>, N. I. Huzar<sup>1</sup>,  
O. I. Garasimiyuk<sup>2</sup>, Yu. O. Kopystynskiy<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine*

*<sup>2</sup>The main department of the State Emergency  
Service of Ukraine in Kyiv, Kyiv, Ukraine*

## INCREASING THE EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING AT OPEN ELECTRICAL SUBSTATIONS BY USING FIRE EXTINGUISHING AEROSOLS

**Formulation of the problem.** Fires in electrical substations can lead to the termination of electricity supply to settlements, industries and critical infrastructure facilities. Such fires are accompanied by significant material losses. Harm the environment. The process of extinguishing them is difficult and dangerous for the personnel of fire-rescue units and employees of energy enterprises.

The enemy's missile strikes on Ukraine's electric power facilities are added to the general problem. In the period from February 2022 to February 2023, there were 225 of them. When extinguishing fires caused by shelling, fire and rescue units cannot act effectively due to the risk of repeated shelling. The waiting time before the start of fire suppression can be long. During this time, the fire develops and causes significant damage.

According to statistical data, most fires in electrical substations occur in electrical transformers. In some cases, the existing fire extinguishing systems of transformers cannot achieve successful extinguishing, which leads to the spread of the fire over a larger area and increases the negative consequences of the fire.

The above problems make it necessary to increase the protection of electrical equipment of substations against fires. Equipping these facilities with effective fire extinguishing systems capable of minimising negative consequences.

**The purpose of the work:** To theoretically substantiate the increase in the efficiency of extinguishing fires at open electrical substations due to the use of fire-extinguishing aerosols.

**Tasks.** Conduct a review and analysis of the existing fire protection systems of electric substations and identify their shortcomings. Determine the necessary efficiency criteria that such systems must meet. To systematize and generalise the best experience of extinguishing fires at open power substations.

**Methods.** The work uses the method of analysis, comparison and generalization of scientific and technical achievements on the use of various fire-extinguishing substances and methods of extinguishing fires at electrical substations.

**Research results.** It was established that the high efficiency of extinguishing the transformer with an aerosol will be ensured theoretically by such processes. At the moment of evaporation of the transformer oil, the aerosol will provide phlegmatization of the combustible medium. During the burning of transformer oil, chemical reactions in the flame will be inhibited by freshly formed finely dispersed aerosol particles ( $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ ,  $KOH$ ,  $KCl$ , etc.) and their decomposition products ( $K_2O$ ,  $KO$ , etc.). Also, during the burning of transformer oil, the mirror of the combustible liquid will be protected from the thermal radiation of the flame, due to the absorption of the rays coming from the combustion zone by the particles. Lowering the temperature of the combustion zone due to heat absorption during heating, melting, evaporation and decomposition of aerosol solid particles. Stopping burning due to mixing of the combustible liquid (with sub-layer extinguishing). The long-term protective action of suspended particles of fire-extinguishing aerosol in a conditionally sealed volume is about 25 minutes, which is quite enough to prevent the further continuation of burning due to the cooling of heated enclosing structures.

**Conclusions.** Thus, for the effective extinguishing of fires in electrical transformers and substations, the fire-extinguishing aerosol is most suitable as a fire-extinguishing agent, which has the following characteristics: quick activation of the system (low activation inertia), high fire-extinguishing and phlegmatizing efficiency, simplicity of construction and reliability, explosion protection (explosion resistance), high intensity of fire-extinguishing agent supply, sufficient duration of fire-extinguishing agent supply, the effectiveness of application in open space, shielding ability, as well as the possibility of extinguishing fire from the outside and phlegmatization of the gas environment inside the transformer at the same time.

**Keywords:** electrical transformer, preservation of energy infrastructure, fire extinguishing, transformer substations, electrical substation, critical infrastructure objects, transformer fire extinguishing systems.

### Постановка проблеми.

Передача електроенергії здійснюється через перетворювальні електричні підстанції які часто розташовуються на відкритій місцевості та складаються з електричних трансформаторів, розподільних пристроїв, кабельних тунелів тощо. Пожежі в електричних підстанціях порушують

штатний режим їх функціонування, що може призводити до аварійних відключень електропостачання населених пунктів, виробництв та об'єктів критичної інфраструктури. Призводять до значних матеріальних збитків. Завдають шкоди навколишньому середовищу. Процес їх гасіння є складним та небезпечним через підвищені ризики

ураження електричним струмом та руйнуванням металевих несучих конструкцій для особового складу пожежно-рятувальних підрозділів та працівників енергетичних підприємств.

За статистику, наведеною в таблиці 1,

протягом п'яти років в Україні на електричних підстанціях виникло 950 пожеж [1, 5]. При цьому збільшення загальної кількості пожеж за цей період становить 70% без врахування пожеж, спричинених збройною агресією.

**Таблиця 1**

Статистика пожеж в електричних підстанціях, які виникли в Україні протягом 2018-2022 рр.

Показник	2022	2021	2020	2019	2018
Кількість пожеж, од.	329	197	163	149	112
Загинуло внаслідок пожеж, людей	1	0	0		0
Травмовано на пожежах, людей	4	0	0		0
Збитки прямі (тис. грн)	436214	7067	2412	5492	1775
Збитки побічні (тис. грн)	573586	23624	13432	14719	7001
Знищено та пошкоджено будівель, споруд, од.	130	41	46	46	26

Розвиток технологій зумовлює збільшення споживання електроенергії, що виробляється АЕС, ТЕС, ГЕС, вітровими та сонячними електростанціями, тому кількість електричних підстанцій з часом зростатиме, а отже зростатиме і кількість пожеж на них [2].

До загальної проблематики додалися удари ворога по об'єктах електроенергетики України. У період з лютого 2022 р. по лютий 2023 р. їх було 225 [3]. За даними звіту ПРООН [4], опублікованому у квітні місяці 2023 року збитки від обстрілів об'єктів енергетики за 2022 рік становили понад 10 мільярдів доларів США.

Під час гасіння пожеж спричинених обстрілами, пожежно-рятувальні підрозділи не можуть ефективно діяти через ймовірність повторних обстрілів. Час очікування до моменту початку ліквідації пожежі може бути тривалим. За цей час пожежа розвивається та завдає значної шкоди.

Наведена проблематика зумовлює необхідність підвищення захисту електрообладнання підстанцій від пожеж та обладнання цих об'єктів ефективними системами пожежогасіння, які здатні мінімізувати негативні наслідки. Цього можна досягти завдяки створенню нових способів гасіння та підвищення ефективності існуючих способів захисту.

**Мета роботи.** Теоретично обґрунтувати підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях шляхом використання вогнегасних аерозолів.

**Задачі.** Провести огляд та аналіз наявних систем протипожежного захисту електричних підстанцій та виявити їх недоліки. Визначити необхідні критерії ефективності, яким повинні відповідати такі системи. Систематизувати та узагальнити передовий досвід гасіння пожеж на відкритих електропідстанціях.

## Виклад основного матеріалу

### Огляд досліджень та публікацій.

Якщо конкретизувати на яких об'єктах критичної інфраструктури України виникали пожежі, то найбільше їх було на відкритих електропідстанціях, а саме: електричних трансформаторах [1].

Світова статистика показує схожі тенденції. За даними аналізу проведеного авторами [5], приблизно в 15 трансформаторах напругою 35-750 кВ з кожної 1000, які перебувають в експлуатації, виникають значні пошкодження, які потребують тривалого ремонту, при цьому один випадок з загорянням. За різними оцінками ризик виникнення пожежі в оливаноповненому трансформаторі коливається в межах 0,4-2,5% [6].

Стрибки напруги, можуть спричинити виникнення в трансформаторі електричної дуги з великим струмом в межах рівних струмові короткого замикання системи [7]. При цьому завжди існує додатковий ризик вибуху трансформатора. Особливо це стосується трансформаторів, які використовують мінеральну оливу як ізолятор і теплоносії.

Під дією дуги на трансформаторну оливу виділяється великий об'єм газів, а саме: водень  $H_2$  – 60 %, ацетилен  $C_2H_2$  — 30 %, метан  $CH_4$  — 5%, етилен  $C_2H_4$  – 5%, що призводить до різкого збільшення тиску [7]. Авторами [7] експериментально встановлено, що температура біля дуги в момент контакту з оливою становить близько 4000 К, а середня температура усього об'єму газу – близько 2000 К. При цьому швидкість газотворення може досягати 50000 л/с. Такі фізико-хімічні процеси часто призводять до вибуху з подальшим горінням оливи.

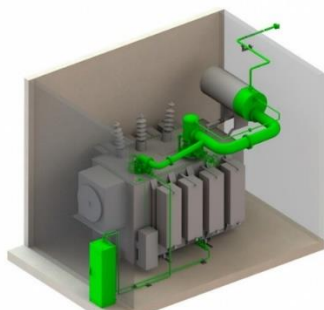
Питанням пожежної безпеки в трансформаторах присвячена значна кількість досліджень науковців в усьому світі.

Проводяться дослідження щодо зменшення горючості трансформаторної оливи [8] обмеження її розтікання внаслідок аварії [1]. Вивчаються параметри факела полум'я при різних сценаріях пожеж та вибухів в трансформаторах [9]. Розробляються нові способи раннього моніторингу технічного стану трансформатора, визначення ступеня старіння та інших параметрів, які можуть призвести до аварійної ситуації [10]. Ведеться робота зі створення сучасних систем протипожежного захисту, а саме: водяних та пінних [11, 12], газових [13], аерозольних [14] та противибухових захисних систем трансформаторів [7].

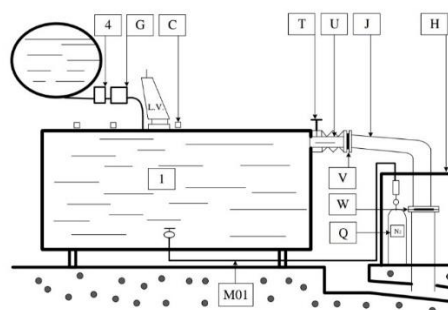
Працюючи над проблемою вибухів у трансформаторах, значних успіхів досягла французька компанія Sergi [7]. Було встановлено, що у випадку важкого ушкодження трансфо-

рматора, стандартні захисні пристрої, такі як диференціал, реле Бухгольца, запобіжний клапан, реле швидкого тиску, вимикач, труба зниження тиску, розширювальний бак не здатні знизити тиск, щоб запобігти вибуху. Загальний час, за який у трансформаторі відбуваються процеси, що спричиняють вибух, становить від 200 до 400 мілісекунд. За цей час стандартний захист просто не встигає спрацювати [7].

Для покращення захисту, компанія розробила систему Sergi Transformer Protector (рис. 1). Система SERGY Transformer Protector [7] довела свою ефективність на практиці як система запобігання вибуху. Національна асоціація протипожежного захисту США (NFPA) внесла розробку компанії до стандартів забезпечення протипожежного захисту оливнонаповнених трансформаторів [15].



а)



б)

**Рисунок 1** – Схема системи пожежогасіння SERGY Transformer Protector [12]:

4 – Реле Бухгольца; G – затвор Sergy; C – датчик пожежі; Т – клапан для обслуговування; U – Абсорбер; J – труба зниження тиску; H – шафа; V – розривний диск бака трансформатора; W – повітряноізолюючий клапан; Q – азотний циліндр \*рис. з сайту <https://sergi-tp.com/fr/>

Система нагнітання азоту здійснює флегматизування газового середовища всередині трансформатора, що запобігає виникненню загоряння. Одночасно працює система стравлювання, яка відводить назвні гази, які утворилися. Така система захисту здатна запобігти вибуху та ліквідувати горіння на ранній стадії, коли гази ще перебувають всередині трансформатора. Проте, як показує дослідження авторів [16], у випадку вибуху з подальшим розповсюдженням вогню за межі трансформатора, така система не буде ефективною.

Автори [16] створили випробувальний майданчик, де проводили випробування з порівняння різних способів гасіння трансформатора. Випробування проводилися на трансформаторі 110 кВ при стандартному температурному випробуванні. Системи протипожежного захисту у кожному випадку були спроектовані відповідно до вимог нормативних документів та наведені у самому дослідженні [16]. Результати цих випробувань наведені у таблиці 2. (таблиця 6).

**Таблиця 2**

Порівняння способів гасіння пожеж оливнонаповнених трансформаторів [17]

№	Спосіб гасіння	Вогнегасна речовина	Час гасіння пожежі	Гасіння (контроль пожежі)
1.	Дисперсні краплі	Чиста вода	232 с – верхній і бічний вогонь гасне 393 с – інші 2 піддони з оливи не можна загасити	Загасити неможливо
2.	Дисперсні краплі	Олійно-емульгований водний вогнегасний агент	42 с – повне припинення горіння	Висока ефективність гасіння

№	Спосіб гасіння	Вогнегасна речовина	Час гасіння пожежі	Гасіння (контроль пожежі)
3.	Дисперсні краплі зі зняттям 18% форсунок імітація вибуху	Олійно-емульгований водний вогнегасний агент	40 с – повне припинення горіння	Висока ефективність гасіння
4.	Водяний туман	Чиста вода	300 с – не вдалося загасити пожежу	Загасити неможливо
5.	Водяний туман	Пінний вогнегасний агент	144 с – повне припинення горіння	Висока ефективність гасіння
6.	Пінна система пожежогасіння мережевого типу	Вогнегасна піна	78 с – повне припинення горіння	Висока ефективність пожежогасіння
7.	Пінна система пожежогасіння колонного типу	Вогнегасна піна	32 с - повне припинення горіння	Висока ефективність пожежогасіння
8.	Система зливу оливи і впорскування азоту	Азот	90 с – початок зливу масла 260 с – без змін у вогні	Загасити неможливо
9.	Пожежний монітор. Компактний струмінь	Олійно-емульгований водний вогнегасний агент	13 с – повне припинення горіння	Дуже висока ефективність гасіння

Як видно з таблиці 2, за результатами випробувань [16], найкращі результати гасіння були показані пожежним монітором з подаванням компактного струменя води з додаванням вогнегасної емульсії. Система зливу оливи та впорскування азоту для гасіння зовнішньої пожежі трансформатора виявилася зовсім неефективною. Також не вдалося загасити вогонь системою водяного пожежогасіння з застосуванням чистої води.

З проведеного огляду видно, що більшість способів гасіння мають високу вогнегасну ефективність, проте варто зазначити, що конструкції стаціонарних систем протипожежного захисту складаються з багатьох технічних елементів: трубопроводів, клапанів, засувок, розпилювачів, насосів, систем водопостачання, живлення, детектування та диспетчеризації.

Через це існує ймовірність відмови спрацювання систем внаслідок різних технічних причин наприклад: відключення електроживлення, виникнення несправності або іншого технічного збою обладнання.

Через ті самі причини ці системи не здатні забезпечити швидку подачу вогнегасних речовин, яка зможе запобігти вибуху, або обмежити розповсюдження вогню у перші секунди чи хвилини після вибуху, що є необхідною умовою для гасіння саме оливнонаповненого трансформатора [7].

Також недоліком цих систем є їх незахищеність від вибухової ударної хвилі, яка може утворитися у трансформаторі внаслідок вибуху оливоповітряної суміші або ураження підстанції ворожим боєприпасом, в результаті чого конструкції трубопроводів, по яких подається вогнегасна

речовина, можуть бути частково або повністю зруйновані. Авторами [17] пропонується проводити захист трубопроводів шляхом нанесення вогнегасних покриттів та збільшення товщини стінок трубопроводів, проте зрозуміло, що враховуючи силу вибуху цей захист є недостатнім. Інших ефективних технічних рішень для підвищення вибухозахисту установок в наукових розробках чи нормативних документах немає.

Щодо вибору альтернативних вогнегасних засобів для гасіння трансформаторів, то можна сказати, що вогнегасні аерозолі є більш ефективними у порівнянні з іншими засобами, при гасінні горючих рідин що розглянуто, описано і обґрунтовано в роботі [18].

За ефективністю гасіння різних класів пожеж в об'ємі вогнегасні аерозолі мають перевагу порівняно з іншими альтернативними засобами гасіння, такими як водяний туман, порошки, гази та хладони [14]. Аерозольним системам пожежогасіння не потрібні спеціальні ємності для піноутворювачів, агрегати для подачі газів чи рідин під надлишковим тиском, насосне обладнання, запірні арматури, генератори піни або розпилювачі, труби розгалужувачі, складні електронні системи управління тощо, що значно спрощує процес подавання вогнегасного аерозолу з відповідним фазовим складом в осередок пожежі. Вогнегасні аерозолі широко використовуються у світі для гасіння пожеж у різних сферах, зокрема і у електроенергетиці [14]. Компанія Wind power Company (Чилі) встановила аерозольні системи в генераторах електричної енергії, європейська деревообробна компанія Akritas – у трансформаторних приміщеннях і підстанціях, компанія

Perenco oil and gas industry – в приміщеннях електропідстанцій, розташованих на газоконденсатних родовищах, торгова та гірничодобувна австралійська компанія Glencore plc – на електричній підстанції та силових трансформаторах на 1,8 км під землею в шахтах Маунт-Іза в Квінсленді [14], що вказує на перспективність застосування аерозолу для гасіння такого типу пожеж.

### Результати дослідження

Вогнегасний аерозоль у разі гасіння ним пожеж класу В діє комплексно, чим забезпечується його висока вогнегасна ефективність, завдяки утворенню дрібнодисперсної конденсованої фази та газів флегматизаторів. Внаслідок цього, аерозоль, при потраплянні в зону горіння, суттєво сповільнює усі ланцюгові фізико-хімічні процеси, необхідні для горіння рідини, забезпечує хорошу охолоджувальну, флегматизувальну, інгібувальну та екранувальну дії.

Висока ефективність гасіння трансформатора аерозолем буде забезпечуватись такими процесами:

- в момент випаровування трансформаторної оливи аерозоль буде забезпечувати флегматизування горючого середовища ;

- під час горіння трансформаторної оливи буде відбуватись інгібування хімічних реакцій в полум'ї свіжоутвореними дрібнодисперсними твердими частинками аерозолу ( $K_2CO_3$ ,  $KHCO_3$ ,  $KOH$ ,  $KCl$  та ін.) і продуктами їх розпаду ( $K_2O$ ,  $KO$  та ін.);

- під час горіння трансформаторної оливи буде забезпечуватись захист дзеркала горючої рідини від теплової радіації полум'я завдяки поглинанню частинками аерозолу теплових променів, що йдуть від зони горіння;

- зниженням температури зони горіння через поглинання тепла при нагріванні, плавленні, випаровуванні і розкладанні твердих частинок аерозолу;

- припиненням горіння завдяки перемішуванню горючої рідини (при підшаровому гасінні);

- тривалим часом захисної дії завислих частинок вогнегасного аерозолу в умовно герметичному об'ємі – близько 25 хв, що цілком достатньо для унеможливлення продовження горіння завдяки охолодженню нагрітих огороджувальних конструкцій.

Усі ці переваги та приклади застосування аерозолів, стосуються гасіння пожеж в закритому об'ємі. Проте результати досліджень авторів [19, 20] показали, що вони можуть також ефективно гасити пожежі на відкритому просторі, але параметри його ефективності на відкритому просторі в достатній мірі не досліджені. Зокрема відсутні розрахунки параметрів ефективної роботи генераторів вогнегасного аерозолу та методи їх застосування на відкритому просторі. Немає даних про необхідну

інтенсивність подавання вогнегасного аерозолу при різних розмірах вогнищ.

Спираючись на результати експериментальних досліджень [14, 18] вогнегасних аерозолів, в сфері об'ємного гасіння пожеж класу «В», можна зробити висновок, що наразі він може бути ефективним, дешевим, експлуатаційно привабливим вогнегасним засобом для стаціонарних систем протипожежного захисту трансформаторних підстанцій. Також його можна застосовувати поряд з існуючими системами азотного гасіння [7,13], причому це призведе до збільшення ефективності гасіння та флегматизування шляхом добавлення газів флегматизаторів, що відповідає висновкам роботи [20].

Вогнегасні речовини, які використовуються в системах пожежогасіння електричних підстанцій, мають високу вогнегасну та флегматизувальну ефективність, проте вони не можуть забезпечити швидкої подачі вогнегасних речовин, що є необхідною умовою для протидії пожежі в електричних трансформаторах. Також існує значний ризик відмови в роботі систем, а їх конструкції слабо захищені від вибуху.

Враховуючи результати вищезазначеного аналізу можна сказати, що для ефективного гасіння електропідстанцій, в тому числі з трансформаторами, необхідно зменшувати час активації установки пожежогасіння, захищати конструкції системи від вибуху, підвищувати надійність систем шляхом спрощення їх конструкції та принципу роботи, створювати нові ефективні вогнегасні речовини для флегматизації горючого середовища та гасіння полум'я, розробляти системи з можливістю гасіння полум'я ззовні та флегматизації газового середовища всередині електричного обладнання одночасно.

**Висновок.** Теоретично обґрунтовано підвищення ефективності гасіння пожеж на відкритих електричних підстанціях завдяки використанню вогнегасних аерозолів. Встановлено, що для ефективного гасіння пожеж електричних підстанцій, в тому числі трансформаторів, теоретично найбільше в якості вогнегасного засобу підходить вогнегасний аерозоль, який володіє відповідними для цього характеристиками: швидка активація системи (низька інерційність спрацювання), висока вогнегасна та флегматизувальна ефективність, простота конструкції та надійність, вибухозахищеність (вибухостійкість), висока інтенсивність подачі вогнегасної речовини, достатня тривалість подачі вогнегасних речовин, ефективність застосування на відкритому просторі, екранувальна здатність, а також можливість гасіння пожежі ззовні та флегматизація газового середовища всередині трансформатора одночасно.

### Список літератури:

1. Климаць Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях: дис. ... д-ра філос. 261. Львів, 2022. 169 с.

2. Боднар Д, Поліщук С., Бранко Б. Методичні рекомендації щодо порядку дій аварійно-рятувальних формувань ДСНС під час гасіння пожеж на сонячних електростанціях. Головне управління ДСНС України у Хмельницькій області. Хмельницький. 2020. 53 с.

3. В ОГП назвали кількість енергооб'єктів, вражених ударами РФ: яка статистика по регіонах.: веб-сайт. URL: delo.ua/energetics/v-ogp-nazvali-kilkist-energoobjektiv-vrazenix-udarami-rf-yaka-statistika-po-regionax-412112/ (дата звернення 08.11.2023)

4. У ПРООН озвучили оцінки збитків для енергетики України від війни у 2022 році.: веб-сайт. URL: delo.ua/energetics/u-proon-ozvucili-ocinki-zbitkiv-dlya-energetiki-ukrayini-vid-viini-u-2022-roci-414396/ (дата звернення 08.11.2023)

5. William H. Bartley P. E. Analysis of Transformer Failures: International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm, 2003. 14 с.

6. Jiaqing, Z., Yubiao, H., Xinjie, Q. et al. A Review on Fire Research of Electric Power Grids of China: State-Of-The-Art and New Insights. Fire Technology. 2022. DOI: 10.1007/s10694-022-01343-x.

7. Transformer protector: веб-сайт. URL: sergi-tp.com/solutions/transformer-protector/

8. Климаць Р.В. Визначення безпечної величини температури трансформаторного масла. Scientific Collection «InterConf», (94): with the Proceedings of V International scientific and practical conference «Science, Education, Innovation: Topical Issues and Modern Aspects» (December 25-26, 2021). Tallinn, Estonia: Üingu Teadus juhatus, 2021. P. 574-578.

9. Ruibang Sun, Juncai Wang, Xing Yang, and Peng Chen\* Experimental Research on the Combustion Characteristics of Transformer Oil Jet Fires in Oil-Filled Equipment under Heat ACS Omega. 2021, 6, 47, 31843–31853. DOI: 10.1021/acsomega.1c04551.

10. Hachimenum N. Amadi, Fabian I. Izuegbunam. Analysis of Transformer Loadings and Failure Rate in Onitsha Electricity Distribution Network. American Journal of Electrical and Electronic Engineering. 2016. Vol. 5, No. 6, P. 157-163 DOI: 10.12691/ajeee-4-6-2.

11. Lu, J., Chen, BH., Liang, P. et al. Experimental Evaluation of Protecting High-Voltage Electrical Transformers Using Water Mist with and without Additives. Fire Technology, 2019, 55, 1671–1690. DOI: 10.1007/s10694-019-00825-9.

12. Посилання на сайт: rotarexfiretec.com/?ppc\_keyword=fire%20extinguishing%20system&gclid=Cj0KCQjw\_r6hBhDdARIsAMIDhV92PBmR3OX

XUcyUawDSVkJXmCuhLu5ClgvtovX6gw-XDlBa9w-Ie30aAk7DEALw\_wcB

13. Engineered fire suppression systems: веб-сайт. URL: www.firetrace.com/engineered-fire-suppression-systems (дата звернення: 08.11.2023)

14. Meenakshi R., Amit S., Yogesh K., Inderpal S, Kumar T., Rajiv N «Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review». Fire Technology. 2022. Vol. 58, P. 327–351 DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4

15. National Fire Protection Association. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. Quincy, 2015.

16. Yu Liu \*, Bo Li, Chuanping Wu, Baohui Chen and Bichen Pan, State Key. Effectiveness Test and Evaluation of Transformer Fire Extinguishing System. Fire Technology. 2022, 58, 3167–3190. DOI: 10.1007/s10694-022-01297-0.

17. W. Li et al., Experimental Study on Effects of Nozzle Explosion Damage on Performance of Water Spray Fire Protection System of Ultra-high Voltage Transformer: 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, 2021, pp. 1200-1206, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437001.

18. Баланюк В. М., Мирошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Гарасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. Пожежна безпека. 2022. №41. С. 12-19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.

19. Баланюк В. М. Визначення ефективності гасіння вогнегасними аерозолями горючих рідин на відкритому просторі. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. ISSN 1729-3774 5/10 (77) 2015 DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399.

20. Баланюк В. М., Грималюк Б. Т., Кіт Ю. В., Левуш С. С. Вплив газової фази на ефективність вогнегасних аерозолів / Вісник НУ “Львівська політехніка”. 2004. №497. С 11-12.

### References:

1. Klymas R. V. Improvement of the method of predicting the cessation and spread of burning by the fire prevention system at oil-filled transformer substations: dys. d-ra f. Lviv, (2022). 169 s.

2. Bodnar , Polishchuk ., Branko . «Methodical recommendations regarding the procedure of emergency and rescue formations of the State Emergency Service during Khasinya fires at solar power plants.» Holovne upravlinnia DSNS Ukrainy u Khmelnytskii oblasti. Khmelnytskyi. (2020) 53 s.

3. V OHP nazvaly kilkist enerhoobjektiv, vrazhenykh udaramy RF: yaka statystyka po rehionakh.: veb-sait. URL: delo.ua/energetics/v-ogp-nazvali-kilkist-energoobjektiv-vrazenix-udarami-rf-



yaka-statistika-po-regionax-412112/  
(data zvernennia 08.11.2023)

4. U PROON ozvuchyly otsinky zbytkiv dlia enerhetyky Ukrainy vid viiny u 2022 rotsi.: veb-sait. URL: delo.ua/energetics/u-proon-ozvucili-ocinki-zbitkiv-dlya-energetiki-ukrayini-vid-viiny-u-2022-roci-414396/ (data zvernennia 08.11.2023)

5. William H. and Bartley P.E. Analysis of Transformer Failures: International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm, (2003). 14 s.

6. Jiaqing, Z., Yubiao, H., and Xinjie, Q. et al. «A Review on Fire Research of Electric Power Grids of China: State-Of-The-Art and New Insights». Fire Technology. 2022. DOI: 10.1007/s10694-022-01343-x.

7. Transformer protector: веб-сайт. URL: sergi-tp.com/solutions/transformer-protector/

8. Klymas R.V. «Determination of the safe temperature value of the transformer oil». Scientific Collection «InterConf», (94): with the Proceedings of V International scientific and practical conference «Science, Education, Innovation: Topical Issues and Modern Aspects» (December 25-26, 2021). Tallinn, Estonia: Üingu Teadus juhatus, 2021. P. 574-578.

9. Ruibang Sun, Juncai Wang, Xing Yang, and Peng Chen\* «Experimental Research on the Combustion Characteristics of Transformer Oil Jet Fires in Oil-Filled Equipment under Heat ACS Omega.» 2021, 6, 47, 31843–31853. DOI: 10.1021/acsomega.1c04551.

10. Hachimenum N. Amadi, and Fabian I. Izuegbunam. «Analysis of transformer loadings and failure rate in Onitsha electricity distribution network. American journal of electrical and electronic Engineering. (2016). Vol. 5, No. 6, P. 157-163 DOI: 10.12691/ajjee-4-6-2.

11. Lu, J., Chen, BH., and Liang, P. et al. «Experimental Evaluation of Protecting High-Voltage Electrical Transformers Using Water Mist with and without Additives». Fire Technology, (2019), 55, 1671–1690. DOI: 10.1007/s10694-019-00825-9.

12. Posylannia na sait rotarexfiretec.com/?ppc\_keyword=fire%20extinguishi

ng%20system&gclid=Cj0KCQjw\_r6hBhDdARIsAMI DhV92PBmR3OXXUcyUawDSVkJXhmCuhLu5Clgv toVX6gw-XDlBa9w-Ie30aAk7DEALw\_wcB

13. Engineered fire suppression systems: web sait. URL: www.firetrace.com/engineered-fire-suppression-systems (data zvernennia 08.11.2023)

14. Meenakshi R., Amit S., Yogesh K., Inderpal S, Kumar T., and Rajiv N, «Condensed Aerosol Based Fire Extinguishing System Covering Versatile Applications: A Review.» Fire Technology. (2022). Vol. 58, P. 327–351 DOI: 10.1007/s10694-021-01148-4

15. National Fire Protection Association. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. Quincy, (2015).

16. Yu Liu \*, Bo Li, Chuanping Wu, Baohui Chen and Bichen Pan, State Key. «Effectiveness Test and Evaluation of Transformer Fire Extinguishing System». Fire Technology. (2022), 58, 3167–3190. DOI: 10.1007/s10694-022-01297-0.

17. W. Li ., «Experimental Study on Effects of Nozzle Explosion Damage on Performance of Water Spray Fire Protection System of Ultra-high Voltage Transformer»: 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), Chongqing, China, (2021), pp. 1200-1206, doi: 10.1109/ACPEE51499.2021.9437001.

18. Balaniuk V, Myroshkin V, Kopystynskyi Y , Hirskyi O, and Harasymyuk O. «Comparison of fire extinguishing agents for extinguishing fires involving flammable and combustible liquids» Pozhezna bezpeka. 2022. №41. S. 12-19. DOI: 10.32447/20786662.41.2022.02.

19. Balaniuk V. M. «Determining the effectiveness of extinguishing flammable liquids with fire-extinguishing aerosols in open space» Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. (2015). ISSN 1729-3774 5/10 ( 77 ) 2015 DOI: 10.15587/1729-4061.2015.51399.

20. Balanyuk V.M., Hrymalyuk B.T., KitYu.V., Levush S.S. «The influence of the gas phase on the effectiveness of fire-extinguishing aerosols» Visnyk NU “L'vivs'kapolitekhnik». 2004. №497. S 11-12.

© В. М. Баланюк, В. С. Мирошкін, Н. І. Гузар, О. І. Гарасим'юк, Ю. О. Копистинський, 2023.

**Оглядова стаття.**

Надійшла до редакції 14.11.2023.

Прийнято до публікації 06.12.2023.