

УДК 614.841.3

ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОСОБУ ЗАПОБІГАННЯ ПОШИРЕННЮ ПОЖЕЖІ ПІД ЧАС АВАРІЙНОЇ РОЗГЕРМЕТИЗАЦІЇ МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2024.2.90-100>

Іллюченко П. О., ORCID iD 0000-0001-6687-6388

*E-mail: illuchenko@ukr.net

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

01.08.2024

Пройшла рецензування:

12.09.2024

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

трансформаторна підстанція,
трансформаторне масло,
температура спалаху,
маслоприймач, гравійна
засипка, теплообмінник

АНОТАЦІЯ

Наведено статистичні дані виникнення пожеж у разі застосування електричного устаткування з наповненням електроізоляційним маслом на підприємствах паливно-енергетичного комплексу, що сталися впродовж 2017–2021 років в Україні. Встановлено основні причини виникнення пожеж на трансформаторних електричних підстанціях. Здійснено аналіз сучасних способів щодо обмеження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях стосовно підходів до конструктивного виконання маслоприймачів із засипкою з гірських порід визначених параметрів, які застосовуються в Україні та за кордоном. Виявлено головний недолік використання гравійної засипки як методу зниження аварійної температури трансформаторного масла в маслоприймачах трансформаторів до пожежобезпечного рівня – необхідність проведення ресурсомісткого комплексу робіт з її очищення від пилу, піску тощо. Виконано аналітичний огляд останніх публікацій та досліджень щодо удосконалення рівня пожежної безпеки трансформаторних електричних підстанцій, оцінювання режимів горіння трансформаторного масла, проблем, пов'язаних із гасінням горючих рідин, удосконалення конструктивних особливостей маслоприймача електричного трансформатора. Внаслідок проведених досліджень проаналізовано властивості металів, що можуть виконувати функцію накопичення тепла. Визначено економічну недоцільність застосування алюмінієвого теплоприймального елемента для зниження температури аварійного розливу трансформаторного масла з 250°C до 150°C у маслоприймачі електричного трансформатора замість гравійної засипки. Визначено напрями подальших досліджень щодо розроблення системи для зниження температури аварійного розливу трансформаторного масла з 250°C до 150°C у маслоприймачах трансформаторів з урахуванням досвіду конструювання теплообмінних апаратів. Визначено актуальність подальших наукових досліджень, сформульовано їх мету, об'єкт та предмет, поставлено задачі досліджень.

Постановка проблеми. Протягом 2017–2021 років, за даними Міністерства енергетики України [1], у господарствах паливно-енергетичного комплексу (далі – ПЕК) сталося 100 пожеж, що завдало збитків у розмірі близько 158 млн грн. Розподіл кількості пожеж, що трапилися в ці роки, залежно від напряму господарювання ПЕК наведено на рис. 1.

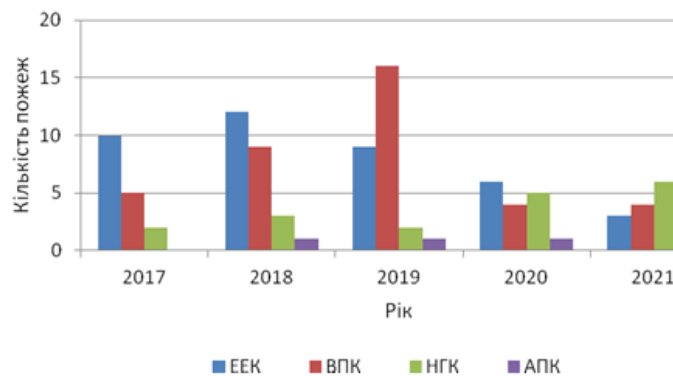
Значна кількість пожеж, як відображено на діаграмі, відбулася в електроенергетичному комплексі (40 пожеж). Близько 50% пожеж у комплексі пов'язано з аварійними режимами роботи розподільних пристроїв та електростанцій, зокрема й у разі використання трансформаторів та

вимикачів з наповненням трансформаторним маслом.

Ще три пожежі подібного типу зафіксовані у вугільному та атомно-промисловому комплексах (АПК). Так, у цьому комплексі пожежа трапилася наприкінці 2021 року на території ВП «Південноукраїнська атомна електрична станція» ДП НАЕК «Енергоатом» унаслідок аварійного режиму (короткого замикання) трансформатора струму

вимикача В-132 фази відкритої розподільної установки 330 кВ з його розгерметизацією і подальшим займанням трансформаторного масла та руйнуванням корпусу самого трансформатора [2].

Пожежа відбулася без постраждалих, на роботу атомної електростанції вона не вплинула. Прямих збитків унаслідок пожежі немає, а побічні становлять 58 тис. гривень.



ЕЕК - електроенергетичний комплекс; ВПК - вугільно-промисловий комплекс; НГК - нафтогазовий комплекс; АПК - атомно-промисловий комплекс.

Рисунок 1 – Розподіл кількості пожеж, які сталися у паливно-енергетичному комплексі залежно від напряму підприємництва протягом 2017–2021 рр.

Згідно з аналізом даних [1–2] встановлено, що основними причинами виникнення пожеж стали коротке замикання в колах електроустаткування (переважно трансформаторне обладнання) та недотримання технологічних процесів унаслідок надмірного навантаження електричної мережі. А гіркий досвід воєнних років засвідчив значну кількість пожеж (на сьогодні – засекречену) обладнання трансформаторних підстанцій внаслідок ударів російського агресора по цивільним об'єктам та об'єктам критичної інфраструктури України. Наприклад, згідно з Аналітичною довідкою [3] тільки унаслідок бойових дій зафіксовано 6067 пожеж без урахування даних з тимчасово окупованих територій.

Винятково масштабними можуть бути пожежі на енергетичних підприємствах з використанням маслonaповнених трансформаторів, за рахунок того, що кількість масла в деяких

із них, зокрема тих, що входять до складу відкритих розподільних установок, може сягати понад 60 тис. л. Трансформаторне масло – це ізоляційна рідина для електричних трансформаторів та аналогічного електричного обладнання (наприклад, розподільних пристроїв, перемикачів), отримана з нафтопродуктів та/або інших вуглеводнів [4]. Призначення масла - електрична ізоляція частин і вузлів зазначених електротехнічних виробів, що перебувають під напругою, охолодження, а також захист ізоляційних матеріалів від впливу вологи [5].

Трансформаторні мінеральні масла за стандартом міжнародної електротехнічної комісії ІЕС 60596-1-40 [6] – це електроізоляційні рідини класу О1, тобто рідини з температурою займання масла > 300°C і нижчою теплотою згоряння 42 °МДж/кг та більше. Розлив у навколишнє середовище розігрітого вище температури спалаху трансформаторного

масла може статися внаслідок розгерметизації корпусу електроустановки за його аварійного режиму роботи, водночас масло внаслідок контакту з повітрям може загорітися та сприяти поширенню вогню та розвитку пожежі. Вважається, що пожежі у разі викиду горючих рідин класу О1 [6] завдають найбільших матеріальних втрат.

Загалом для обмеження розвитку та поширення пожежі маслоспожарного електроустановки регламентують відстані між елементами та спорудами енергетичних об'єктів, застосовують перегородки з негорючих матеріалів та улаштовують системи пожежогасіння тощо.

Важлива роль в цьому напрямі (з урахуванням також вимог екології) згідно з Правилами улаштування електроустановок [5; 7] та закордонних стандартів і настанов [8–11] тощо відводиться застосуванню в зоні встановлення трансформатора маслоприймачів – пристроїв для збирання й утримання витоку розігрітого (палаючого) масла з електрообладнання, яке здатне сприяти поширенню пожежі та завдавати шкоду навколишньому середовищу. З метою зменшення наслідків аварійного вилиття розігрітого масла в маслоприймачах трансформаторів застосовують засипку з гірських порід (щебінь, гравій, галька тощо) певних параметрів, яка здатна охолодити масло та обмежити його контакт із повітрям. Водночас засмічення гравійної засипки піском, брудом тощо внаслідок впливу руху мас повітря на відкритому просторі значно зменшує її ефективність як засобу для охолодження розігрітого масла. Отже, утримання гравійної засипки передбачає регулярне виконання комплексу ресурсних заходів щодо підтримки її чистоти. Це вказує на актуальність постановки досліджень, орієнтованих на визначення оптимальних характеристик засобу, здатного до ефективного зниження пожежонебезпечної температури масла (температура спалаху), під час його аварійного витоку як підґрунтя до заміни

гравійної засипки в маслоприймачах трансформаторів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розв'язання важливих задач із забезпечення пожежної безпеки, гасіння пожеж на енергетичних об'єктах, обмеження поширення пожеж між будівлями, вивчення параметрів горіння ізоляційних рідин здійснювали українські вчені та вчені інших країн: П. Заїка, В. Ніжник, Сан Руїбанг, Р. Климась та інші.

Так, у роботі П. Заїки [12] визначено фактори, що сприяють виникненню пожеж у разі використання трансформаторів з електроізоляційним маслом. У праці В. Ніжника [13] розглянуто проблемні питання оцінювання небезпеки поширення вогню на сусідні об'єкти. У праці Д. Зозулі [14] запропоновано діагностичні методи контролю терміну служби трансформаторного обладнання. Чуанпінг Ву [15] дослідив ефективність гасіння розливів трансформаторного масла за допомогою ручних та лафетних стволів, а напрацювання вчених Лянг Лі [16], Сан Руїбанг [17–18] та Зао Джінлонг [19] були спрямовані на дослідження параметрів горіння електроізоляційних рідин за умов вертикального проливу, горизонтального розливу та струменевого витоку.

На особливу увагу заслуговують дослідження Р. Климася [20], в яких обґрунтовано перелік ключових параметрів, що впливають на припинення горіння й охолодження трансформаторного масла під час його проходження через гравійну засипку трансформаторних маслоприймачів.

Також проблематичні питання щодо припинення горіння рідких вуглеводнів опрацьовані в роботі [21], в працях [22–23] наведені розрахунки процесів газообміну під час горіння рідин в ємностях, покритих металевими сітками, внаслідок чого припиняється горіння та зниження тепловиділення.

Водночас у цих дослідженнях не опрацьоване питання стосовно удосконалення системи запобігання поширенню пожежі в частині можливості

реалізації ефективного засобу, здатного функціонально замінити шар гравію в маслоприймачах трансформаторів.

Формулювання цілей дослідження. Аналіз досліджень і вимоги вітчизняної нормативної бази та світового досвіду стосовно обмеження поширення пожежі на маслоприймачах трансформаторних підстанцій щодо застосування шару гравійної засипки, яка потребує проведення ресурсозатратного періодичного очищення, показав відсутність альтернативного ефективного засобу для зниження пожежонебезпечної температури масла (температури спалаху) під час аварійного виливу.

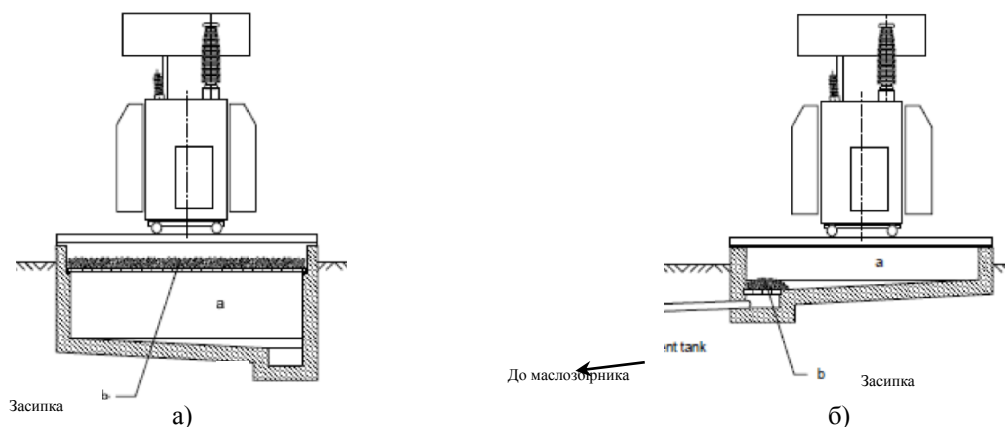
Мета дослідження полягає в оцінюванні теплофізичних властивостей речовин, матеріалів та виробів, здатних змінити гравійну засипку в маслоприймачах трансформаторів, і формуванні мети та задач подальших досліджень.

Методи дослідження. У роботі для досягнення поставленої мети використано метод теоретичних досліджень, де застосовано такі операції, як аналіз, синтез, аналогія, узагальнення, систематизація тощо.

Виклад основного матеріалу.

В Україні відповідно до правил [5; 24–25] як засипки для обох типів маслоприймачів за ДСТУ EN 61936-1 [26] (рис. 2) використовують шар гірської породи товщиною не менше ніж 25 см, що може складатися з гравію, гранітного щебеню, непористого щебеню іншої породи з розміром часток від $50 \text{ мм} \pm 20 \text{ мм}$.

Маслоприймачі без відведення масла в маслозбірник застосовують для трансформаторів потужністю до 10 МВА. Маслоприймачі з відведенням масла в маслозбірник мають застосовуватися для трансформаторів з масою масла понад 1000 кг в одиниці (в 1-му баку). Об'єм масла в таких трансформаторах може сягати понад 60000 л, а також з урахуванням того, що дно таких маслоприймачів дозволено не покривати на всій площі шаром засипки з гірських порід, на системах відведення масла від трансформаторів слід передбачати встановлення вогнезагороджувачів. Пожежі на таких трансформаторах можуть мати масштаби та характеризуватися складністю гасіння. Поширенню пожежі може сприяти витік палаючого масла через несправний вогнезагороджувач в загальний маслозбірник суміжних трансформаторів.



а) - маслоприймач без відведення масла, із засипкою на металевій решітці на всій площі маслоприймача;

б) – маслоприймач із функцією відведення масла, із засипкою над прямком для збору масла

Рисунок 2 - Схематичні зображення конструктивного виконання маслоприймачів для трансформаторів

Загалом трансформаторне масло, на прикладі масла Nytro 11GX [27], є горючою рідиною і за характеристиками має відповідати стандарту міжнародної електротехнічної комісії ІЕС 60269 [4]. В експериментальних дослідженнях Р. Климася [28] визначено температуру спалаху (150 °С) та температуру самозаймання (250 °С) такого масла.

Для реалізації заміни гравійної засипки для теплообмінника, здатного швидко здійснити охолодження розігрітого трансформаторного масла (250 °С) нижче температури спалаху (150 °С), у разі його витоку з трансформатора є необхідність у виборі твердих речовин або матеріалів. Такі речовини та матеріали, мають відповідати певним вимогам, як-то стійкість до атмосферних умов навколишнього середовища, стійкість до руйнації за впливу високих температур (вогню) та широке застосування в промисловості, що дасть змогу збільшити рентабельність застосування в конструкції теплообмінника таких речовин / матеріалів. Окрім цього, ці речовини / матеріали мають мати прийнятний рівень теплопровідності та теплоємності, для ефективного відбору тепла від теплоносія (розігрітого трансформаторного масла). Для виконання таких вимог найбільш прийнятними є застосування металів.

Відповідно до [29] теплопровідність (один із видів теплообміну) – це самовільний переніс температури від найбільш нагрітої точки тіла до найменш нагрітої точки цього тіла, яке здійснюється на молекулярному рівні без перенесення маси речовини. Цей процес у чистому вигляді має місце в твердих тілах, а також у тонких шарах газів і рідини. Для оцінювання теплопровідності, тобто здатності речовин / матеріалів визначено таке поняття як коефіцієнт теплопровідності (λ , Вт/(м·К), або Вт/(м·°С)), що є теплофізичною властивістю речовини / матеріалу та дорівнює щільності теплового потоку,

якщо градієнт температури дорівнює одиниці, формула 1 [30].

$$\lambda = |q| / |l| \cdot |\text{grad } t|, \quad (1)$$

Для різних речовин / матеріалів коефіцієнт теплопровідності залежить від густини, структури, вологості, тиску і температури. Для речовин / матеріалів з більшою густиною, цей коефіцієнт має вищі значення. Для більшості матеріалів залежність λ від температури має лінійний характер:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + b t), \quad (2)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності за температури t_0 , Вт/(м·К); b – постійна, визначена дослідним шляхом, 1/К.

Так, наприклад, для газів коефіцієнт теплопровідності перебуває в межах 0,005–0,5 Вт/(м·К), і з підвищенням температури він зростає. Для краплинних рідин коефіцієнт теплопровідності перебуває в межах 0,08–0,7 Вт/(м·К), і з підвищенням температури він зменшується, за винятком води та гліцерину. Теплоізоляційні та будівельні матеріали мають коефіцієнт теплопровідності від 0,02 Вт/(м·К) до 3,0 Вт/(м·К). З підвищенням температури λ зростає. Теплоізоляційні матеріали зазвичай мають λ менше 0,2 Вт/(м·К). Коефіцієнт теплопровідності металів (λ від 20 Вт/(м·К) до 400 Вт/(м·К) з підвищенням температури зменшується.

Відповідно до [30–31] найбільший коефіцієнт теплопровідності мають метали срібло (Ag), мідь (Cu), золото (Au), алюміній (Al).

Значення коефіцієнтів теплопровідності (λ) залежно від температури в діапазоні від 1267 °С до 327 °С для зазначених металів [32] узагальнено в табл. 1. Значення коефіцієнтів теплопровідності таких температур вибрано з урахуванням діапазону температур, куди входять температура спалаху (150 °С) та температура самозаймання (250 °С) мінерального трансформаторного масла.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів теплопровідності (λ) залежно від температури деяких металів

Температура, °C	Ag	Cu	Au	Al
	Коефіцієнт теплопровідності, λ , Вт/(м·К)			
127	420	392	312	240
227	413	383	309	237
327	405	383	304	232

З огляду на наведені в таблиці дані можна зробити висновок, що найбільше значення коефіцієнта теплопровідності (λ) належить металу золоту, найменше – металу алюмінію.

Окрім теплопровідності, для зменшення температури трансформаторного масла від аварійного значення ($T_{\text{самозаймання}} \approx 250^\circ\text{C}$) нижче за $T_{\text{спалаху}}$ (150°C), потребує розгляду здатність зазначених вище металів накопичувати тепло. Ця здатність безпосередньо пов'язана з поняттям теплоємності, що використовується в

термодинаміці для охарактеризування теплових властивостей тіл. Відповідно до [32] теплоємність тіла C - це кількість теплоти, яка необхідна для зміни його температури (нагрів, охолодження) на 1 К:

$$C = \delta Q / dT \quad (3)$$

Зазвичай теплоємності для речовин визначають експериментально, але також можна застосовувати розрахункові методи статичної фізики [29].

Значення теплоємності для металів Ag, Cu, Au та Al [31–32] зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Значення теплоємності деяких металів від температури

Температура °C	Ag	Cu	Au	Al
	Теплоємність, c_p , Дж/(кг·К)			
127	244	408,0	133,1	991,8
227	249	416,9	135,3	1036,7
327	252	425,1	137,5	1090,2

З огляду на аналіз даних таблиці є очевидна перевага алюмінію порівняно з іншими металами, а саме - теплоємність алюмінію значно перевищує теплоємності інших трьох металів на різних рівнях однакових температур, а крива значно інтенсивніше зростає.

Таким чином, для реалізації теплообмінної системи, здатної швидко здійснити охолодження розігрітого трансформаторного масла від аварійного значення ($T_{\text{самозаймання}} \approx 250^\circ\text{C}$) нижче за $T_{\text{спалаху}}$ (150°C) у разі його витoku з трансформатора, найбільш вдалим до застосування є такі метали:

- мідь (Cu) – має більші значення коефіцієнта теплопровідності, ніж у золота та алюмінію, і поступається лише сріблу;

- алюміній (Al) – має найбільші значення теплоємності серед вказаних

металів. Значення його теплоємності більше ніж удвічі перевищує значення теплоємності міді (металу Cu).

Не менш важливу роль відіграє економічна складова у реалізації теплообмінної системи. Не беручи до уваги розглянуті дорогоцінні метали (Ag та Au), за даними Міністерства економіки України [33], вартість первинного алюмінію майже втричі нижча за вартість міді.

Водночас алюміній має суттєвий недолік в частині порівняно низької температури плавлення – близько 660°C [34]. Зважаючи на значні температури, які виникають під час горіння трансформаторного масла під час аварій, є ризик руйнації алюмінієвих конструкцій.

З урахуванням значних показників теплоємності алюмінію, первинні

розрахунки дали змогу приблизно оцінити масу металу алюмінію, необхідного як теплоприймач теплообмінної системи для охолодження розігрітого трансформаторного масла від аварійного значення 250 °С до 150 °С.

Основою розрахунків були рівняння теплового балансу та визначення кількості теплоти (теплового навантаження).

$$Q = cm|(T_2 - T_1)| = cm|(t_2 - t_1)| \quad (4)$$

де, c – питома теплоємність, m – маса речовини, що нагрівається (охолоджується, кг);

(T_2, T_1, t_2, t_1) – різниця кінцевої і початкової температур речовини, °С.

У розрахунках були застосовані такі дані:

- 1000 Дж/(кг·К) теплоємність C_p алюмінію за температури 150 °С [31];
- 50 000 кг - маса масла, що може міститися в найбільших трансформаторах та реакторах;
- 250 °С початкова температура масла;
- 150 °С кінцева температура масла;
- 20 °С початкова температура алюмінію;
- 150 °С кінцева температура алюмінію;
- 3050 Дж/(кг·К) теплоємність C_p масла за температури 250 °С [35].

За результатами перерахунку визначено, що приблизна маса алюмінію, яка може зменшити температуру масла від 250 °С до 150 °С, отримавши від нього 15,25 МДж теплової енергії, має становити приблизно 120 тонн. Розрахунки приблизні, без урахування втрат теплоти в навколишнє середовище та способів інтенсифікації теплообміну тощо. Для порівняння: для утилізації такої кількості теплоти необхідний теплоприймальний елемент, що виготовлений з приблизно 280 тонн міді.

Таким чином, з урахуванням вартості первинного алюмінію (2386,29 USD/т), за даними Міністерства економіки України [33], заміна гравійної засипки на теплообмінну систему з алюмінієвим

теплоприймальним елементом є надмірно економічно затратним варіантом.

Отже, з метою отримання більш дешевої охолоджувальної системи доцільно розглянути застосування інших способів утилізації теплоти від розігрітого масла, що може стати наступним етапом досліджень.

Наприклад, для реалізації теплообмінних процесів у технологіях енергетики, хімічної, металургійної, нафтогазової, харчової та інших галузей промисловості широко застосовуються теплообмінні апарати (далі – ТОА), в яких проходять процеси обміну теплотою між теплоносіями [36–37]. За призначенням ТОА є теплообмінниками, холодильними апаратами, випробувачами, нагрівачами. За типом конструктивного виконання ТОА можуть бути зрошувальними, погрузними змієвиками, апаратами повітряного охолодження, типу труба в трубі, кожухотрубними тощо. Окрім цього, для реалізації ефективної системи утилізації тепла від розігрітого трансформаторного масла заслуговують на розгляд двофазні теплотранспортні системи [38] – теплові труби (далі – ТТ), дія яких полягає в тому, що передавання теплової енергії в них здійснюється внаслідок випаровування та конденсації (тобто зміни фазового стану) рідкої речовини. Принцип такий – у замкнутій ємності з теплопровідного металу є теплоносій, наприклад вода, у разі нагрівання однієї частини ємності вода стає парою, яка надходить на охолоджену поверхню, де здійснюється процес її конденсації у рідкий стан, теплоносій повертається знову на місце нагріву. Водночас значна частина теплоти віддається через стінки трубки в зовнішнє середовище.

Як холодоагент, здатний охолодити розігріте трансформаторне масло від 250 °С до 150 °С, слід звернути увагу на застосування найбільш поширеної в природі рідини – води. Її теплофізичні характеристики такі [39]: теплоємність 4,216 кДЖ/(кг·К), питома теплота пароутворення (теплота випаровування

води) 2258 кДж/кг (за нормального атмосферного тиску).

Надалі актуальним є дослідження щодо обґрунтування конструкції та параметрів теплообмінної системи, здатної забезпечити зниження температури аварійного розливу трансформаторного масла з 250 °С до 150 °С в маслоприймачі трансформатора.

Об'єктом дослідження мають бути процеси тепломасообміну у потоках трансформаторного масла у теплообмінній системі трансформаторної підстанції під час його аварійного зливання.

Предмет дослідження – умови охолодження у теплообмінній системі трансформаторного масла під час його аварійного витікання з корпусу трансформатора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати конструктивні особливості ТООА, їх параметри, ефективність тощо з метою розроблення теплообмінної системи, здатної забезпечити зниження температури аварійного розливу трансформаторного масла з 250 °С до 150 °С в маслоприймачі трансформатора;

- на основі аналізу визначити найбільш оптимальні матеріали з огляду на їхні теплофізичні характеристики для створення експериментальної

теплообмінної системи, здатної забезпечити зниження температури трансформаторного масла з 250 °С до 150 °С.

- визначити порядок проведення експериментальних досліджень впливу параметрів теплообмінної системи на зміну температури трансформаторного масла та розробити програму й методику експериментальних досліджень.

Висновки та напрями подальших досліджень. Внаслідок проведених досліджень проаналізовані властивості металів, що можуть виконувати функцію накопичення тепла. Встановлено економічну недоцільність застосування алюмінієвого теплопримального елемента для зниження температури аварійного розливу трансформаторного масла з 250 °С до 150 °С в маслоприймачі трансформатора замість гравійної засипки. Визначено напрями подальших досліджень в частині розроблення системи для зниження температури аварійного розливу трансформаторного масла з 250 °С до 150 °С у маслоприймачах-трансформаторах з урахуванням досвіду конструювання теплообмінних апаратів. Показано актуальність нових наукових досліджень, сформульовано їх мету, об'єкт та предмет, поставлено задачі досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформація стосовно пожеж та надзвичайних ситуацій, які сталися на підприємствах паливно-енергетичного комплексу упродовж 2017–2021 років. URL : <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95?page=5> (дата звернення : 10.08.2022).
2. Інформація стосовно пожеж та надзвичайних ситуацій, які сталися на підприємствах паливно-енергетичного комплексу станом на 01.12.2021. URL : <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95/document> (дата звернення : 10.08.2022).
3. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2023 року. URL : <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analitchna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf> (дата звернення : 10.10.2024).
4. Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment. IEC 60296:2020. 82 p.
5. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
6. Fire hazard testing. Part 1-40. Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids: IEC 60695-1-40:2013. International Electrotechnical Commission. 2013. 64 p.
7. Правила устройства электроустановок. Астана : Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, 2015. 391 с.
8. Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC. Part 1. AC : EN IEC 61936-1:2021. European Electrotechnical Committee for Standardization. 2021. 118 p.
9. Guide for Substation Fire Protection: IEEE 979. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012. 99 p.
10. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations : NFPA 850 Quincy, MA, USA. National fire protection association. 2020. 82 p.
11. Guide for Transformer Fire Safety Practices, Working Group A2.33, Paris, France. 2013. 139 p., URL : https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_Practices.pdf (date of access : 11.04.2023).

12. Заїка П., Заїка Н., Лукашів Т. Особливості пожежної безпеки трансформаторів. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій : матеріали XII Міжнародної наук.-практ. конф., м. Черкаси. 2021: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, Черкаси, 2021. С. 176–178.
13. Ніжник В. В., Поздєєв С. В., Жартовський С. В., Фещук Ю. Л. Оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти за критерієм теплового потоку. *Інтернаука*. Київ, 2019. № 11 (73). С. 47–51.
14. Зозуля Д. В. Разработка и научное обоснование технических предложений по повышению надёжности, энергетической эффективности и продлению ресурса трансформаторов ТНЦ-1250000/330 на блоках АЭС Украины : Збірник : Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Чорнобиль, , 2013. Вип. 20С. 57–67.
15. Wu Chuanping ; Zhou Tiannian ; Chen, Baohui ; Liu, Yu ; Liang, Ping. Experimental Study on Burning Characteristics of the Large-Scale Transformer Oil Pool Fire with Different Extinguishing Methods . *Fire technology*. Norwell. Vol. 57, Ed. 1, (Jan. 2021). P. 461–481.
16. Li Liyang, Xu Zhai, Juncal Wang, Peng Chen, Congling Shi. Experimental study on vertical spill fire characteristics of transformer oil under continuous spill condition. *Process Safety and Environmental Protection* (IF6.158), Pub Date : 2021-10-28.
17. Ruibang Sun, Jyncai Wang, Xing Yang, Peng Chen. Experimental Research on the Combustion Characteristics of Transformer Oil Jet Fires in Oil-Filled Equipment under Heat. *ACS Omega*, 16 Nov 2021, 6 (47).
18. Ruibang Sun, Juncal Wang, Xing Yang, Peng Chen, Liusuo Wu. Experimental study on geometric characteristics of transformer oil jet fire under external heat source. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* (IF3.447), 13 Oct 2021.
19. Jinlong Zhao, Shansheng Wang, Jianping Zhang, Rui Zhou, Rui Yang. Experimental Study on the Burning Characteristics of Transformer Oil Pool Fires. *Energy Fuels* 2020, 34, 4, 16 March 2020. P. 4967–4976.
20. Klymas R., Nizhnyk V., Nekora O., Nekora V., Stylyk I. Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation. *The Scientific heritage*. 2021. Budapest, Hungary. Vol. 3. № 79(79). P. 36–44.
21. Провести пошукові дослідження умов самозгасання полум'я рідких вуглеводнів, покритих дрібновічковими сітками : звіт про наукову дослідну роботу. № державної реєстрації 0196U009041. Український науково-дослідний інститут пожежної безпеки Міністерства внутрішніх справ України. Київ, 1997.
22. Мельник О. В., Кутеко С. В., Басєєв А. М. Розрахунок процесу газообміну під час горіння рідин, що містяться в ємностях, покритих дрібновічковими сітками. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. 2009. № 2(20). С. 57–61.
23. Шаршанов А. Я., Бабенко, О. В., Луценко, Ю. В. (2001) Аналіз умов самозгасання полум'я рідких вуглеводнів у напівзамкнених об'ємах АПБУ. Проблеми пожежної безпеки. 2001. С. 109–112. URL : <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4050> (дата звернення : 14.11.2023).
24. Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 26.09.2018 № 491. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text> (дата звернення : 11.04.2023).
25. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-88:2013. Правила будови електроустановок. Пожежна безпека електроустановок. Інструкція (НАПБ В.01.056-2013/111) : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.10.2013 № 756. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0756732-13#Text> (дата звернення : 11.04.2023).
26. Силові установки понад 1 кВ змінного струму. Ч. 1. Загальні правила : ДСТУ EN 61936-1:2022 (EN 61936-1:2010, IDT; IEC 61936-1:2010, MOD) [чинний з 01.01.2024 Київ. ДП УкрНДНЦ. 2022. 104 р.
- 27 URL: http://www.energynet.com.ua/transformatornye_masla_nynas/nytro_11gx.html (дата звернення : 10.10.2024)
- 28 29. Климась 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». Tallinn, Estonia: Üingu Teadus Juhatus, 2021. P. 574–578.
29. Миронов О. С., Брижа М. Р., Бойко В. Б., Золотоська О. В. Теплообмін. Основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання тепла в сільському господарстві : навчальний посібник. Дніпропетровськ : ЕНЕМ, 2011. 424 с.
30. Powell R. W., Ho C. Y., Liley P. E. Thermal Conductivity of Selected Materials. Report. (Washington, 1996).
31. Лариков Л. Н., Юрченко Ю. Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов : справочник. Киев : Наукова думка, 1985. 440 с.
32. CRC Handbook of Chemistry and Physics – Now in the 954th Edition, the CRC Handbook covers data from most branches of chemistry and physics. The annual revisions permit regular updating of the information. Also available on the web [hbcprnetbase.com]. (W. M. Haynes, David R. Lide, Thomas J. Bruno ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2014)
33. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&isSpecial=True&id=8a389298-2d23-40e7-b7b1-1a8f2fda9be8&title=SerednoarifmetichniZnachenniaTsinULipni2024-Roku-RozrakhovaniZgidnoZPoradkomRozrakhunku-ZatverdzenimPostanovojuKabinetuMinistrivUkrainiVid13-10-2023-1113-deiakiPitanniaViznachenniaTsinTovariv-NaYakiZakonomVstanovlenoViviZneMito-SchoNarakhovutsiaZaAdvalornimiStavkami> (дата звернення 10.10.2024)
34. Smithells metals reference Book, 7 edition, American society for metals, metal park (Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, 1992)
35. Zbigniew Nadolny. Evaluation of Thermal Properties of Various Insulating Liquids Used in Power Transformers. *Energies*, MDPI. Vol. 17(12). 2024. P. 1–13, June.
36. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах / Л. Л. Товажнянський, С. І. Бухкало, П. О. Капустенко, О. П. Арсеньєва, С. І. Орлова. Київ : Центр навчальної літератури, 2011. 832 с.
37. Масакбаєва С. Р., Елубай М. А. Теплообменные аппараты : учебное пособие. Павлодар : Кереку, 2018. 108 с.
38. David Reay, Ryan McGlen, Peter Kew Heat pipes:theory : design and applications (fifth edition) Elsevier, 2006, 2006, 384 p.
39. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Ramesh K. Shah and Dušan P. Sekulic/ New York. 2003.

REFERENCES

1. Informatsiia stosovno pozhezh ta nadzvychainykh sytuatsii, yaki stalsia na pidpriemstvakh palyvno-enerhetychnoho kompleksu uprodovzh 2017-2021 rokiv. (2022). [Information on fires and emergency situations that occurred at enterprises of the fuel and energy complex during 2017-2021] Retrieved from <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95?page=5>.
2. Informatsiia stosovno pozhezh ta nadzvychainykh sytuatsii, yaki stalsia na pidpriemstvakh palyvno-enerhetychnoho kompleksu stanom na 01.12.2021. (2022). [Information on fires and emergency situations that occurred at the enterprises of the fuel and energy complex as of 01.12.2021]. Retrieved from <https://www.mev.gov.ua/taxonomy/term/95/document>.
3. Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 12 months of 2023. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/1/8/2/6/2/analychna-dovidka-pro-pojeji-122023.pdf> (access date 10.10.2024)
4. Fluids for electrotechnical applications. Mineral insulating oils for electrical equipment. IEC 60296:2020 [in English].
5. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok [Rules for Arrangement of Electrical Installations] (2017). Kyiv: Minenergoguvillya of Ukraine [in Ukrainian].
6. Fire hazard testing. Part 1-40. Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids. (2013) IEC 60695-1-40:2013: International Electrotechnical Commission. 2013 [in English].
7. Pravila ustrojstva jelektroustanovok. [Rules for Arrangement of Electrical Installations] (2015). Astana: Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan [in Russian].
8. Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC. Part 1. AC. (2021) EN IEC 61936-1:2021. European Electrotechnical Committee for Standardization. 2021 [in English].
9. Guide for Substation Fire Protection (2012). IEEE 979. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012 [in English].
10. NFPA 850 Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. Quincy, MA, USA. National fire protection association. 2020 [in English].
11. Guide for Transformer Fire Safety Practices, Working Group A2.33, Paris, France. 2013. 139 p. Retrieved from https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_Practices.pdf [in English].
12. Zaika P., Zaika N., Lukashiv T. (2021) Osoblyvosti pozhezhnoi nebezpeky transformatoriv. [Fire hazard features of transformers], *Teoriia i praktyka hasinnia pozhezh ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii [Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations]*, Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference. Cherkasy: CHIPB named after Heroes of Chernobyl National University of Civil Defense of Ukraine [in Ukrainian].
13. Nizhnyk, V.V., Pozdieiev, S.V., Zhartovsky, S.V., & Feshchuk, Yu.L. (2019). Otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezh na sumizhni budivelni obiekty za kryteriem teplovoho potoku. Mizhnarodnyi naukovi zhurnal: Internauka. [Assessment of the risk of fire spreading to adjacent construction sites according to the criterion of heat flow. *International scientific journal: Internauka*] Kyiv: 11 (73), 47-51. doi: 10.25313/2520-2057-2019-11-5113 [in Ukrainian].
14. Zozulja D.V. (2013) Razrabotka i nauchnoe obosnovanie tehnikeskikh predlozhenij po povysheniju nadjozhnosti, jenergeticheskoi jeffektivnosti i prodleniju resursa transformatorov TNC-1250000/330 na blokah AJeS Ukrainy [Development and scientific substantiation of technical proposals for improving the reliability, energy efficiency and extending the service life of TNTs-1250000/330 transformers at NPP units of Ukraine]. Collection: *Safety problems of nuclear power plants and Chernobyl*. Chernobyl [in Russian].
15. Wu Chuanping ; Zhou Tiannian ; Chen, Baohui ; Liu, Yu ; Liang, Ping (2021) Experimental Study on Burning Characteristics of the Large-Scale Transformer Oil Pool Fire with Different Extinguishing Methods. *Fire technology*; Norwell Volume 57, Ed. 1, 461-481. doi: 10.1007/s10694-020-01012-x [in English].
16. Li Liyang, Xu Zhai, Juncal Wang, Peng Chen, Congling Shi (2021) Experimental study on vertical spill fire characteristics of transformer oil under continuous spill condition. *Process Safety and Environmental Protection* (IF6.158), 521-530. doi: 10.1016/j.psep.2021.10.044 [in English].
17. Ruibang Sun , Jyncai Wang, Xing Yang, Peng Chen (2021). Experimental Research on the Combustion Characteristics of Transformer Oil Jet Fires in Oil-Filled Equipment under Heat. *ACS Omega*, 16. 6 (47). 31843-31853. doi: 10.1021/acsomega.1c04551 [in English].
18. Ruibang Sun, Juncal Wang, Xing Yang, Peng Chen, Liusuo Wu (2021) Experimental study on geometric characteristics of transformer oil jet fire under external heat source. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* (IF3.447), doi: 10.1080/15567036.2021.1991053/ [in English].
19. Jinlong Zhao, Shansheng Wang, Jianping Zhang, Rui Zhou, Rui Yang (2020) Experimental Study on the Burning Characteristics of Transformer Oil Pool Fires. *Energy Fuels*, 34, 4, 4967-4976. doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c00175 [in English].
20. R. Klymas, V. Nizhnyk, O. Nekora, V. Nekora, I. Stylyk (2021). Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation. *The Scientific heritage*. Budapest, Hungary. Vol. 3. № 79 (79). 36-44 [in English].
21. Provesty poshukovi doslidzhennia umov samozghasannia polumia ridkykh vuhlevodniv, pokrytykh dribnovichkovyymi sitkami: Zvit pro Naukovu doslidnu robotu [To conduct exploratory studies of the self-extinguishing conditions of the flame of liquid hydrocarbons covered with fine-mesh nets: Report on Scientific research work; State registration number 0196U009041. Ukrainian Research Institute of Fire Safety of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine]. Kyiv, 1997 [in Ukrainian].
22. Melnyk, O. V.; Kuteko, S. V.; Basaev, A. M. (2009) Rozrakhunok protsesu hazoobminu pid chas horinnia ridyn, shcho mistiatsia v yemnostiakh, pokrytykh dribnovichkovyymi sitkami. Naukovi visnyk [Calculation of the gas exchange process during combustion of liquids contained in containers covered with fine-mesh nets. *Scientific Bulletin of UkrNDIPB*], No. 2 (20), 57-61 [in Ukrainian].
23. Sharshanov, A.Ia., Babenko, O.V., Lutsenko, Yu.V. (2001) Analiz umov samozghasannia polumia ridkykh vuhlevodniv u napivzamknenykh obiemakh APBU [Analysis of the self-extinguishing conditions of the flame of liquid hydrocarbons in semi-closed volumes APBU/Problems of fire safety] Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4050> [in Ukrainian].
24. Pravyla pozhezhnoi bezpeky v kompaniiakh, na pidpriemstvakh ta v orhanizatsiiakh enerhetychnoi haluzi Ukrainy. Nakaz Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy 26.09.2018 № 491 [Rules of fire safety in companies, enterprises and organizations of the energy industry of Ukraine. Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine 26.09.2018 No. 491] Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text> [in Ukrainian].
25. SOU-N EE 40.1-21677681-88:2013. Pravyla budovy elektroustanovok. Pozhezhna bezpeka elektroustanovok. Instruktisiia (NAPB V.01.056-2013/111) Nakaz Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy 21.10.2013 № 756 [SOU-N EE

- 40.1-21677681-88:2013. Rules for the construction of electrical installations. Fire safety of electrical installations. Instruction (NAPB V.01.056-2013/111) Order of the Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine dated October 21, 2013 No. 756] [in Ukrainian].
26. Sylovi ustanovky ponad 1 kV zminnoho strumu. Chastyna 1. Zahalni pravyla [Power installations exceeding 1 kV a.c. - Part 1: Common rules] DSTU EN 61936-1:2022 (EN 61936-1:2010, IDT; IEC 61936-1:2010, MOD) from 1st January 2024. Kyiv: SE UkrNDNC [in English].
27. Retrieved from http://www.energynet.com.ua/transformatornye_masla_nynas/nytro_11gx.html [in English].
28. Klymas R.V. (2021) Vyznachennia bezpechnoi velychyny temperatury transformatornoho masla [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». Tallinn, Estonia: Üningu Teadus Juhatus [in Ukrainian].
29. O.S. Mironov, M.R. Bryzha, V.B. Boyko, O.V. Zolotovskaya. Heat engineering. Fundamentals of thermodynamics, theory of heat transfer, use of heat in agriculture. Textbook. – Dnipropetrovsk: LLC “ENEM”, 2011. 424 p. [in Ukrainian].
30. R. W. Powell, C. Y. Ho, P. E. Liley. Thermal Conductivity of Selected Materials. Report. (Washington, 1996).
31. Larykov L.N., Yurchenko Yu.F. Thermal properties of metals and alloys. Directory. - Kyiv: Naukova Dumka, 1985. 440 p. [in Ukrainian].
32. CRC Handbook of Chemistry and Physics – Now in the 954th Edition, the CRC Handbook covers data from most branches of chemistry and physics. The annual revisions permit regular updating of the information. Also available on the web [hbcnpnetbase.com]. (W. M. Haynes, David R. Lide, Thomas J. Bruno ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2014)
33. URL: [https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&isSpecial=True&id=8a389298-2d23-40e7-b7b1-1a8f2fda9be8&title=Seredno arifmetichniZnachenniaTsinULipni2024-Roku-RozrakhovaniZgidnoZPoriadkom Rozrakhunku-ZatverdzenimPostanovoiuKabinetuMinistrivUkrainiVid13-10-2023-1113-deiakiPitanniaVznachenniaTsinTovariv-NaYakiZakonomVstanovlenoVivi zneMito-SchoNarakhovutsiaZaAdvalornimiStavkami](https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&isSpecial=True&id=8a389298-2d23-40e7-b7b1-1a8f2fda9be8&title=Seredno%20arifmetichni%20znachennia%20tsin%20lipni%202024-Roku-Rozrakhovani%20Zgidno%20poriadkom%20rozrakhunku-Zatverdzenim%20Postanovoi%20Kabinetu%20Ministriv%20Ukraini%20Vid%2013-10-2023-1113-deiaki%20pitannia%20vznachennia%20tsin%20tovariv-NaYakiZakonomVstanovlenoVivi%20zneMito-SchoNarakhovutsiaZaAdvalornimiStavkami) (дата звернення 10.10.2024)
34. Smithells metals reference Book, 7 edition, American society for metals, metal park (Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi, 1992)
35. Zbigniew Nadolny, 2024. "Evaluation of Thermal Properties of Various Insulating Liquids Used in Power Transformers," *Energies*, MDPI, vol. 17(12), pages 1-13, June.
36. Tovazhnyanskyi L.L. General technology of the food industry in examples and problems / L.L. Tovazhnyanskyi, S.I. Bukhkalov, P.O. Kapustenko, O.P. Arsenyeva, S.I. Orlova – Kyiv: Center for Educational Literature, 2011. – 832 p.
37. Masakbaeva S.R., Elubai M.A. Heat exchange devices. Educational manual. – Pavlodar: Ke-reku, 2018. – 108 p. [in Kazakhstan]
38. David Reay, Ryan McGlen, Peter Kew Heat pipes: theory: design and applications. (fifth edition) Elsevier, 2006, 2006, 384 p.
39. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Ramesh K. Shah and Dušan P. Sekulic/ New York. 2003.

REGARDING THE IMPROVEMENT OF THE METHOD FOR PREVENTING FIRE SPREAD DURING EMERGENCY DEPRESSURIZATION OF OIL-FILLED TRANSFORMERS

P. Iliuchenko

Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine

KEYWORDS:

transformer
substation,
transformer oil,
flash point, oil
receiver, gravel
backfilling, heat
exchanger

ANNOTATION

Statistical data on the occurrence of fires involving electrical equipment filled with insulating oil at enterprises of the fuel and energy complex that occurred during 2017-2021 in Ukraine are presented. The main causes of fires at transformer substations are identified. An analysis of existing methods for limiting the spread of fire at oil-filled transformer substations is carried out in terms of approaches to the design of oil receivers with backfilling from rocks of certain parameters, which are used in Ukraine and abroad. The main drawback of using gravel backfilling as a method of reducing the emergency temperature of transformer oil in transformer oil receivers to a fire-safe level is identified - the need to carry out a resource-intensive complex of works to clean it from dust, sand, etc. An analytical review of the latest publications and research on improving the level of fire safety of transformer electrical substations, assessing the burning modes of transformer oil, problems associated with extinguishing flammable liquids, and improving the design features of the oil receiver of an electric transformer was performed. As a result of the research, the properties of metals that can perform the function of heat accumulation were analyzed. The economic inexpediency of using an aluminum heat-receiving element to reduce the temperature of an emergency spill of transformer oil from 250°C to 150°C in the oil receiver of an electric transformer instead of gravel backfill was determined. Directions for further research were determined in terms of developing a system for reducing the temperature of an emergency spill of transformer oil from 250°C to 150°C in oil receivers of transformers, taking into account the experience of designing heat exchangers. The relevance of further scientific research has been determined, its goal, object, and subject have been formulated, and research objectives have been set.