

УДК 614.841.3

## МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА НИЖЧЕ ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ В МАСЛОПРИЙМАЧІ

<https://doi.org/10.33269/nvcs.2023.1.116-127>

Іллученко П.О.\*, ORCID iD 0000-0001-6687-6388

Ніжник В.В., ORCID iD 0000-0003-3370-9027

Нікулін О.Ф., ORCID iD 0000-0001-9126-0681

\*E-mail: illuchenko@ukr.net

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна*

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

*Надійшла до редакції: 31.04.2022*

*Пройшла рецензування: 15.05.2022*

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

трансформаторна підстанція, маслоприймач, гравійна засипка, теплообмінник.

### АНОТАЦІЯ

Наведено статистику виникнення пожеж із використанням маслонаповненого електроустаткування на підприємствах паливно-енергетичного комплексу, які сталися в Україні впродовж 2017–2021 років. Визначено основні причини виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях. Проаналізовано підходи до обмеження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях щодо способів конструктивного улаштування маслосбірників із гравійною засипкою певних параметрів, які застосовуються в Україні та поза її межами. Визначено основний недолік застосування гравійної засипки як способу зниження аварійної температури трансформаторного масла до безпечних значень – проведення ресурсозатратного періодичного комплексу робіт з утримання її в чистоті. Здійснено аналіз останніх публікацій та досліджень стосовно підвищення пожежної безпеки трансформаторних підстанцій, оцінювання режимів горіння трансформаторного масла та проблематики гасіння горючих рідин. На основі аналітичних досліджень розроблено принципову схему експериментальної установки – теплообмінної системи (теплообмінника), яка має забезпечити зниження температури розігрітого масла від 250 °С до значення, що нижче температури спалаху 150 °С, під час проходження масла через теплообмінник протягом 900 с. Розроблено проект методики експериментальних досліджень та обґрунтування параметрів теплообмінної системи (теплообмінника) для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху у маслоприймачі трансформаторної підстанції з функцією відведення масла до маслосбірника. Методика дає змогу визначити зміни температури трансформаторного масла від 250 °С до значення, що нижче температури спалаху (150 °С), під час проходження масла через теплообмінник протягом 900 с.

**Постановка проблеми.** Відповідно до даних Міністерства енергетики України [1] за останніх п'ять років на підприємствах паливно-енергетичного комплексу сталося 100 пожеж, що завдало збитків у розмірі близько 158 млн грн.

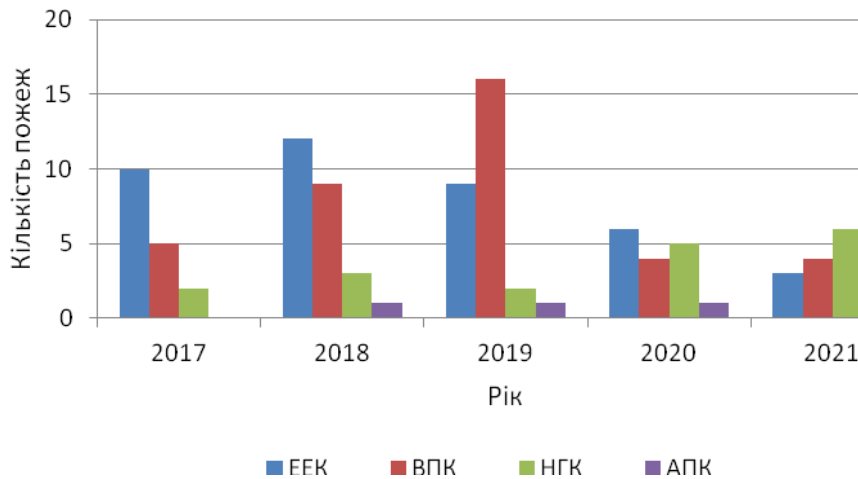
Розподіл кількості пожеж, які сталися у паливно-енергетичному комплексі, залежно від напряму господарювання протягом 2017–2021 рр. наведено на рис. 1.

Як видно з діаграми, значна кількість пожеж сталася на підприємствах електроенергетичного комплексу (40 випадків). Близько 50% пожеж в цьому комплексі пов'язані з аварійними режимами роботи розподільних пристроїв та електричних підстанцій, зокрема з використанням маслонаповнених трансформаторів та масляних вимикачів. Також три пожежі такого типу були

зафіксовані у вугільно-промисловому та атомно-промисловому комплексах, остання з яких трапилася наприкінці листопада позаминулого року на території ВП «Південноукраїнська АЕС» ДП НАЕК «Енергоатом» унаслідок короткого замикання трансформатора струму вимикача В-132 фази ВРУ-330 кВ з його

розгерметизацією і подальшим загорянням трансформаторного масла та руйнуванням самого трансформатора [2].

Під час пожежі постраждалих не було, на роботу АЕС вона не вплинула. Прямих збитків від пожежі немає, а побічні склали 58,0 тис. грн.



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 господарювання протягом 2017–2021 рр.

*Джерело: розроблено авторами*

Відповідно до аналізу причин та обставин виникнення пожеж [1–2] основними причинами цього стали коротке замикання в електричних колах та електроустаткуванні (переважно трансформаторне обладнання) і порушення технологічних процесів через перевантаження електричної мережі. А досвід минулого року свідчить про значну кількість пожеж (на сьогодні – засекречену) трансформаторного обладнання внаслідок підступних ударів країни-агресора – росії по українському житловому фонду та об'єктах критичної інфраструктури.

Особливо масштабними можуть бути пожежі на маслонаповнених трансформаторах, адже кількість масла в деяких із них, зокрема розташованих на відкритому просторі, може сягати понад 50 тонн. Це масло призначене для ізоляції

частин і вузлів трансформаторів, що перебувають під напругою, відводу тепла, а також запобігання ізоляції від зволоження [3]. За ІЕС 60596-1-40 [4] трансформаторні мінеральні масла – це ізоляційні рідини класу О1. Це означає, що температура займання масла становить  $\leq 300$  °С, а нижча теплота згоряння  $\geq 42$  МДж/кг. Під час аварійного режиму роботи маслонаповненого електроустаткування може статися вилив розігрітого вище температури спалаху трансформаторного масла, яке може зайнятися та сприяти розвитку та поширенню пожежі. Вважається, що пожежі з викидом ізоляційних рідин класу О1 [4] завдають найбільших матеріальних збитків.

Загалом для обмеження поширення пожежі маслонаповненого електроустаткування застосовують

вогнестійкі перегородки, автоматичні системи пожежогасіння, унормовують відстані між елементами та спорудами енергетичних об'єктів тощо. Також важливу роль в напрямі забезпечення пожежної безпеки (та з урахуванням екологічної складової) відводять закордонній та вітчизняній практиці застосування маслоприймачів – ефективних пристроїв утилізації та знешкодження результатів дії розігрітого (палаючого) масла, що може витікати з обладнання, сприяючи поширенню пожежі та завдаючи шкоди навколишньому середовищу ПУЕ [3, 5], EN IEC 61936-1 [6], IEEE 979 [7], NFPA 850 [8], Guide for

Transformer Fire Safety Practices [9] тощо. З метою зменшення наслідків аварійної розгерметизації маслонаповнених трансформаторів як засобу для охолодження масла та обмеження до нього доступу повітря в маслоприймачах трансформаторів застосовують для визначених параметрів засипку з гірських порід (щебінь, гравій, галька тощо), що передбачає здійснення періодичного проведення ресурсозатратного комплексу заходів з утримання її в чистоті. В національному стандарті ДСТУ EN 61936-1 [10] наведені приклади поширених типів маслоприймачів (рис. 2).

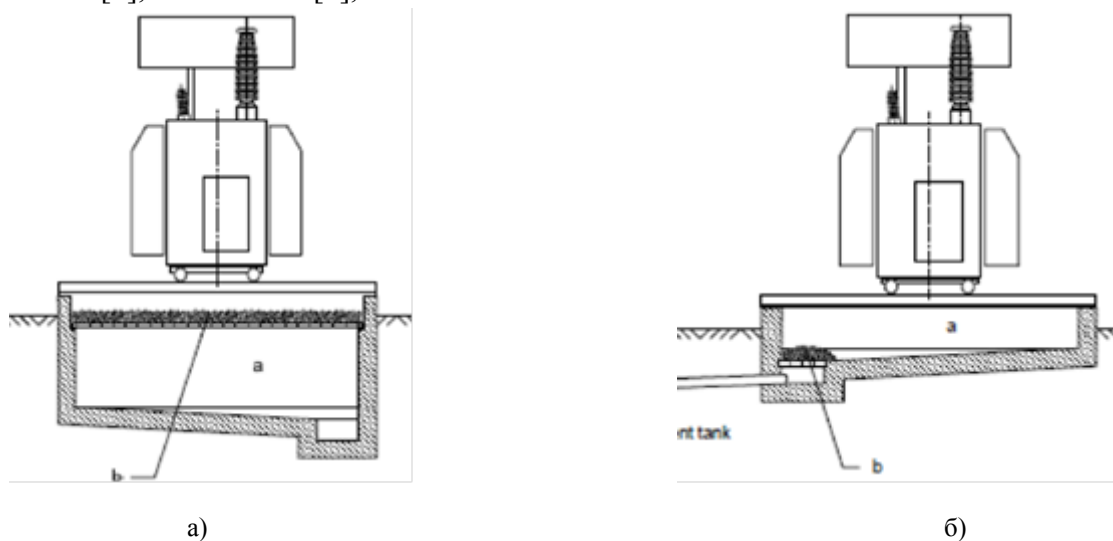


Рисунок 2 – Схематичні зображення конструктивного виконання маслоприймачів для трансформаторів: а) – маслоприймач без відведення масла, із засипкою на металевій решітці на всій площі маслоприймача; б) – маслоприймач із функцією відведення масла, із засипкою над приямком для збору масла

Джерело: [10]

В Україні відповідно до ПУЕ [3] та [11–12] як засипка для обох типів маслоприймачів (рис. 2) має застосовуватися шар товщиною не менше ніж 0,25 м із чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи із частками розміром від 30 мм до 70 мм.

Маслоприймачі без відведення масла в маслосбірник (рис. 2а) застосовують для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВА. Маслоприймачі з відведенням масла в маслосбірник (рис. 2б) мають застосовуватися для трансформаторів із масою масла понад 1 т в одиниці (в 1-му

баку). З огляду на те, що маса масла в таких трансформаторах може сягати більше 50 т, а також з урахуванням того, що дно таких маслоприймачів дозволено не покривати на всій площі засипкою, доцільно у цьому разі на системах відведення масла від трансформаторів передбачати установаження вогнезагороджувачів. Пожежі на таких трансформаторах можуть характеризуватися масштабністю та складністю гасіння. Окрім того, поширенню пожежі електропідстанцією може сприяти витік палаючого масла через несправний вогнезагороджувач у

загальний маслосбірник, до якого під'єднані маслоприймачі сусідніх трансформаторів.

Це зумовлює необхідність проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування оптимальних параметрів ефективного засобу для зниження температури масла нижче температури спалаху – теплообмінної системи (далі – теплообмінника), що дає можливість замінити гравійну засипку у маслоприймачах із функцією відведення масла.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У розв'язанні актуальних питань щодо забезпечення пожежної безпеки, гасіння пожеж на об'єктах електроенергетики, обмеження поширення пожеж між будівлями, вивчення характеристик горіння трансформаторних масел брали участь вітчизняні та вчені інших країн: Д. Зозуля, В. Ніжник, Сан Руїбанг, Р. Климась та інші.

Так, у праці Д. Зозулі [13] запропоновано діагностичні методи контролю терміну служби трансформаторного обладнання за результатами дослідження аварійних режимів трансформаторів на об'єктах атомної енергетики України. В роботі П. Заїки [14] проаналізовано причини, що сприяють виникненню пожеж за участю маслонаповнених трансформаторів. У праці В. Ніжника [15] розглянуто проблематику оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні об'єкти. Дослідження стосовно ефективності гасіння розливів трансформаторного масла за допомогою ручних та лафетних стволів проведено Ву Чуанпінг [16], а роботи таких вчених, як Лянг Лі [17], Сан Руїбанг [18–19] та Зао Джінлонг [20], присвячені вивченню характеристик горіння трансформаторних масел за умов вертикального проливу, струменевого витоку під тиском та за умов горизонтального розливу. Зокрема, уваги заслуговує робота Р. Климася [21], в якій обґрунтовано перелік найбільш значущих параметрів, що впливають на припинення горіння й охолодження трансформаторного

масла під час його проходження через гравійну засипку маслоприймачів трансформаторної підстанції.

Окрім цього, свого часу дослідження питань самозгасання полум'я рідких вуглеводнів проводили фахівці Українського науково-дослідного інституту пожежної безпеки МВС України [22], а в працях [23–24] наведені приклади розрахунків процесів газообміну під час горіння рідин, покритих дрібновічковими сітками, за допомогою яких досягається припинення горіння та зниження інтенсивності тепловиділення.

Однак у згаданих вище роботах не досліджено питання стосовно удосконалення системи попередження поширення пожежі щодо можливості реалізації ефективного (швидкодійного) засобу для зниження температури масла нижче температури спалаху, здатного замінити гравійну засипку в маслоприймачах трансформаторів.

**Формулювання цілей дослідження.** Метою статті є визначення основних положень методики експериментальних досліджень та обґрунтування параметрів теплообмінної системи для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху в маслоприймачі трансформаторної підстанції.

Кінцева мета дослідження полягає у виявленні закономірностей зміни температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик теплообмінної системи, що має виконувати функції вогнезагороджувача й охолодження масла нижче температури спалаху. Для її досягнення необхідно розв'язати такі задачі:

- визначити тип і кількість необхідного обладнання та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- визначити конструкцію дослідного стенду;
- обґрунтувати порядок проведення експериментальних досліджень впливу параметрів теплообмінної системи на зміну температури трансформаторного масла.

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

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сутність методу експериментальних досліджень полягає у виявленні закономірностей зниження

температури трансформаторного масла до значення, що нижче температури спалаху під час заповнення маслом теплообмінної системи, яка імітує вогнезагороджувач маслозбірника з відведенням масла. Проведення експериментальних досліджень має забезпечуватися засобами виміральної техніки, характеристики яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики засобів виміральної техніки

№ з/п	Найменування	Діапазон вимірювання	Клас точності, невизначеність / похибка засобу виміральної техніки	Призначеність ЗВТ
1	Термоанемометр цифровий AR 866	від 0,3 м/с до 50 м/с	$U = 1,44$ м/с; $\Delta = \pm 0,2$ м/с	Вимірювання швидкості вітру
2	Барометр-анероїд М67	від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.	$U = 1,74$ мм рт. ст. $\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.	Вимірювання атмосферного тиску
3	Термогігрометр «Testo» 608-H1	від 0 °C до 50 °C; від 2 % до 98 %	$U = 0,4$ °C; $\Delta = \pm 0,5$ °C $U = 1,5$ %; $\Delta = \pm 3$ %	Вимірювання температури та вологості навколишнього середовища
4	Секундомір СОС пр 2Б-2-010	від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с	2 клас точності; $U = 0,163$ с; $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с; $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$ с	Вимірювання часу
5	ІВС «Термоконт»	від 0 до 1200 °C;	$U = 0,3$ °C; $\Delta = \pm 0,35$ °C	Реєстрація температури
6	Термопара ТХА	від 0 °C до 333 °C;	$U = 0,5$ °C $\Delta = \pm 2,5$ °C	Вимірювання температури
		від 334 °C до 1200 °C	$U = 0,8$ °C $\Delta = \pm 0,0075 \pm T_{\text{вим}}$	
7	Фотоапарат CANON IXUS 185	20 Мп	-	Проведення фото- та відеозйомки

Експеримент має імітувати підвищення температури масла до аварійного значення (температура самозаймання) в трансформаторі, його розгерметизацію та вилив масла в маслоприймач, де воно має охолонути нижче температури спалаху під час проходження через тепловідвідні елементи. Трансформаторне масло марки Nymro 11GX [25], яке буде використане в дослідженнях, є горючою рідиною за [26], за характеристиками має відповідати стандарту ІЕС 60269 [27], де встановлено, що температура спалаху масла має бути не

менше ніж 135 °C. Температура самозаймання такого масла за джерелом [25] має бути більше ніж 270 °C. Але як діапазон зміни значень температури масла для експериментальних досліджень обрано уточнені результати роботи Р. Климася [28], де для масла марки Nymro 11GX експериментально визначено температуру спалаху (150 °C) та температуру самозаймання (250 °C).

Для реалізації поставленої мети спроектовано експериментальну установку, принципову схему якої наведено на рис. 3, що має забезпечити зниження температури



товщиною до 2 мм за умови, що конструкція має витримувати вплив температури масла до 250 °С. У нижній частині всередині резервуара 1 розміщують трубчастий електричний нагрівач – ТЕН (3), що живиться від джерела струму для підігріву масла до температури 250 °С з метою імітації аварійної ситуації у трансформаторі, та термопару типу ТХА (2) для контролю температури масла в резервуарі (1). На дні резервуара (1) улаштовано магістраль подавання розігрітого масла до масляного контуру теплообмінника під дією сили тяжіння. Магістраль виконана за допомоги сталевий труби (6) діаметром 50 мм. Для здійснення контролю витрати масла у разі подавання до теплообмінника в магістраль вбудовано засувку (шаровий кран) (4) та витратомір (5), що забезпечують витрату масла масою близько 50 кг до теплообмінника за час не більше ніж 900 с, тобто 0,055 л/с. В нижній точці магістралі для подавання розігрітого масла розміщений зливний патрубок із засувкою (шаровим краном) (16) для виліву масла після проведення досліджень в зливну ємність. Для охолодження розігрітого масла в теплообміннику до температури 150 °С застосовують дистильовану воду, яка є в резервуарі (8), з об'ємом близько 20 л. Для подавання води під дією сили тяжіння до водяного контуру теплообмінника застосовують магістраль, що виготовлена за допомогою поліпропіленової труби (12) діаметром 25 мм. Для здійснення контролю витрати води під час подавання до теплообмінника в магістраль вбудовано засувку (шаровий кран) (10) та витратомір (11), що забезпечують необхідну витрату води за умов її випаровування в теплообміннику під час процесу теплообміну із розігрітим маслом.

Корпус теплообмінника (7) виготовлено з листової сталі товщиною до 2 мм. З'єднання елементів корпусу теплообмінника має бути герметичним, наприклад зварним.

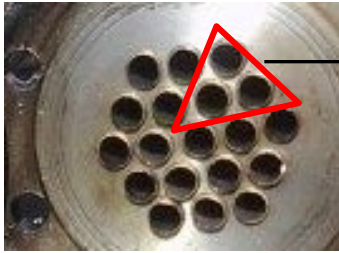
Трубна решітка обладнана патрубком для виходу повітря з простору заповнення

масла (13).

Водяний охолоджувальний контур теплообмінника (7) виконаний з трьох вертикально розташованих гофрованих трубок (далі – гофротрубки) (14) внутрішнім діаметром 32 мм (1 1/4") з низьковуглецевої аустенітної неіржавної сталі марки AISI 304 [29]. Характеристики гофротрубок зазначеного діаметра такі: товщина стінки трубки – 0,3 мм, коефіцієнт теплопровідності – 17 Вт/м\*К, питома теплоємність за температури 100 °С – 504 Дж/(кг\*К), внутрішній об'єм 0,982 дм<sup>3</sup>/ на 1 пог.м, площа зовнішньої поверхні – 0,204 м<sup>2</sup>/на 1 пог.м (для прикладу – гладка трубка діаметром 32 мм має площу зовнішньої поверхні 0,1 м<sup>2</sup>/на 1 пог.м). Гофротрубки є сполученими посудинами, вони герметично припаяні нижніми кінцями до нижньої трубчастій решітці, яка герметично перекриває доступ підведеної води до масляного контуру теплообмінника. Вода підводиться до водяного контуру в нижній частині корпусу теплообмінника за допомогою магістралі для подавання води (12).

Поперечний переріз корпусу теплообмінника (7) являє собою рівносторонній трикутник (рис. 3, вид А–А). Гофротрубки розміщені на вершинах умовного рівнобічного трикутника. Відстань між стінками гофротрубок дорівнює значенню половини діаметра трубок. Таке ж значення має відстань від стінок гофротрубок до стінок корпусу теплообмінника. Трикутне розміщення гофротрубок вибрано з урахуванням досвіду конструювання кожухотрубних теплообмінних апаратів, де одним із стандартизованих способів розміщення застосовується спосіб правильних шестикутників (рис. 4) [30]. Такий спосіб улаштування є найбільш ефективним в частині отримання найбільшої щільності пакування труб, тобто отримання найбільшої поверхні теплообміну в корпусі теплообмінника певного розміру.





Трикутний сегмент труб, розміщених способом правильного шестикутника

Рисунок 4 – Приклад розміщення труб у трубних решітках кожухотрубних теплообмінних апаратів способом правильних шестикутників

Джерело: розроблено авторами

Усередині гофротрубки (14) на внутрішніх стінках обладнані спіральними направляючими – завихрювачами (18) з метою зменшення впливу явища плівкового кипіння води, завдяки якому теплообмін між металевою поверхнею гофротрубки та шаром води значно знижується [31]. Спіралі виготовлені з дроту діаметром 3–4 мм, кут закруту спіралі щодо горизонталі приблизно 40–50 град. Приклад застосування завихрювачів наведено на рис. 5.



Рисунок 5 – Приклад застосування завихрювачів у теплообмінних трубах опалювальних котлів

Джерело: розроблено авторами

Усередині корпусу теплообмінника (7), між гофротрубками, в геометричному центрі рівнобічного трикутника, який вони утворюють, з кроком 400 мм розміщені одна над одною 5 термопар типу ТХА (Т1-Т5) для здійснення контролю температури масла, яке надходить з резервуара 1.

У верхній частині корпусу теплообмінника для забезпечення виходу з масляного контуру охолодженого нижче температури спалаху масла встановлено патрубков (9).

З метою зменшення втрат тепла в навколишнє середовище резервуар (1), магістраль (6) та корпус теплообмінника (7) опоряджені зовні по периметру теплоізоляцією – мінеральною ватою (19) товщиною 50 мм.

Через кришку в повітряний простір резервуара (1) проведена магістраль (21) від балона (20) з вуглекислим газом, що має подаватися під час проведення експериментальних досліджень з метою зниження концентрації кисню в повітрі. Магістраль виконана з гнучкого гумового шланга внутрішнім діаметром 6,3 мм та обладнана засувкою (шаровим краном) і регулювальним редуктором для регулювання витрати вуглекислого газу.

За своїм принципом дії експериментальний теплообмінник є однокерованим із застосуванням прямоотечіної схеми руху теплоносіїв [32].

Висота водяного охолоджувального контуру теплообмінника від нижньої трубної решітки до верхньої трубної решітки (15) має складати не менше ніж 2000 мм. Цей параметр вибрали з огляду на приблизні значення, отримані з таких розрахунків.

Теплове навантаження теплообмінника ( $Q_{\text{тепл}}$ ) становить 13675 кДж, для розрахунку якого було застосовано формулу [30]:

$$Q_{\text{тепл}} = m_{\text{масл}} C_{p_{\text{масл}}} \Delta T_{\text{масл}} \quad (1),$$

де  $m_{\text{масл}}$  – маса охолодженого масла, 50 кг;

$C_{p_{\text{масл}}}$  – питома середня теплоємність масла 2,735 кДж (кг К) [25];

$\Delta T_{\text{масл}}$  – різниця температури гарячого теплоносія (масла) на вході та на виході з теплообмінника (100 К).

Для утилізації 13675 кДж теплової енергії від нагрітого масла в теплообміннику має випаритися приблизно ( $m_{\text{вод}}$ ) 5,945 кг води, що знайдено за формулою:



$$m_{\text{вод}} = Q_{\text{тепл}}/L_{\text{пар}} \quad (2),$$

де  $L_{\text{пар}}$  – питома теплота пароутворення води ( $2,3 \cdot 10^6$  Дж/кг).

Таким чином, щоб вмістити таку масу води, необхідно, аби висота охолоджувального контуру (три гофротрубки) була не менше ніж 2,0 м (внутрішній об'єм трубок складає  $0,982 \text{ дм}^3$ / на 1 пог.м [29]).

Підготовка до проведення експериментальних досліджень включатиме в себе:

- монтування термопар (умовні позначення 2, та T1–T5 на рис. 3), під'єднання їх до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт» та налаштування роботи системи вимірювання температури масла;

- заповнення резервуара (1) маслом у кількості 50 кг;

- заповнення резервуара (8) водою об'ємом 20 л;

- заповнення водяного охолоджувального контуру (гофротрубок) (14) теплообмінника водою за допомогою відкриття шарового крану (10);

- перевірку закритого положення засувок – шарових кранів (4), (16), (17) (рис. 3);

- встановлення обладнання для проведення фото- та відеозйомок;

- вимірювання та реєстрацію умов навколишнього середовища;

- перевірку цілісності захисного огороження, встановлення та попереджувальних знаків;

- підготовку засобів пожежогасіння;

- одягання оператора досліджень у захисний одяг (штани, куртка, чоботи, рукавиці, каска із захистом органів зору);

- нагрівання масла до температури  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  за допомогою ТЕНа (3);

- заповнення повітряного простору резервуара (1) вуглекислим газом, що подається з балона (20) за допомогою магістралі (21) з метою уникнення явища самозаймання розігрітого масла.

Передбачається, що проведення експериментальних досліджень буде здійснюватися в такій послідовності:

1. За допомогою регулювального редуктора (22) та крана (23) встановлюють подавання вуглекислого газу до повітряного простору резервуара (1).

2. Під час досягнення температури масла  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  у резервуарі (1) відкривають шаровий кран (4). За допомогою нього та користуючись витратоміром (5), встановлюють витрату масла таким чином, щоб 50 л масла за час не менше ніж 900 с витекло через масляний контур теплообмінника (7).

3. Фіксують за допомогою інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт»:

- температуру масла в нижній точці (на дні) масляного контуру теплообмінника;

- зміну температури масла на верхніх ділянках масляного контуру теплообмінника завдяки теплообміну з водяним контуром, в якому відбувається нагрівання та кипіння води;

- досягнення температури масла нижче температури спалаху ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на верхніх ділянках масляного контуру.

4. Фіксують приблизну висоту рівня шару масла, охолодженого нижче температури спалаху ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) за допомогою показів термопар.

5. Експериментальні дослідження тривають до моменту повного витікання масла із резервуара (1).

6. Після отримання результатів воду та залишки масла зливають з водяного та масляного контурів теплообмінника (7) в ємності, відкривши шарові крани (16) та (17).

Під час підготовки та проведення експерименту проводять фотофіксацію.

За результат дослідження приймають отриману висоту рівня шару масла, охолодженого нижче температури спалаху ( $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ), значення результатів визначення температури масла та будують залежність зміни температури масла від часу.

**Висновки та напрями подальших досліджень.** Наведена методика експериментальних досліджень обґрунтування параметрів теплообмінної системи для зниження температури

трансформаторного масла нижче температури спалаху у маслоприймачі трансформаторної підстанції дає змогу визначити зміну температури трансформаторного масла у теплообміннику від 250 °С до значення, що нижче температури спалаху (150 °С),

протягом 900 с. Надалі передбачається провести експериментальні дослідження за цією методикою та здійснити оцінювання отриманих результатів, наведених експериментальних досліджень, що буде предметом наступної публікації.

### 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. Правила улаштування електроустановок. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
4. 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.
5. Правила устройства электроустановок. Астана : Министерство энергетики и минеральных ресурсов Республики Казахстан, 2015. 391 с.
6. 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.
7. Guide for Substation Fire Protection: IEEE 979. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012. 99 p.
8. 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.
9. 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](https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_Practices.pdf) (дата звернення : 11.04.2023).
10. Силові установки понад 1 кВ змінного струму. Частина 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 с.
11. Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України : наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 26.09.2018 № 491. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text> (дата звернення : 11.04.2023).
12. 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 21.10.2013 № 756. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0756732-13#Text> (дата звернення : 11.04.2023).
13. 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. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. Чорнобиль, 2013. Вип. 20. С. 57–67.
14. Заїка П., Заїка Н, Лукашів Т. Особливості пожежної небезпеки трансформаторів. *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*: матеріали XII Міжнародної наук.-практ. конф., м. Черкаси, 2021 : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. Черкаси, 2021. С. 176–178.
15. 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. *Міжнародний науковий журнал : Інтернаука*. Київ, 2019. № 11(73). С. 47–51.
16. Experimental Study on Burning Characteristics of the Large-Scale Transformer Oil Pool Fire with Different Extinguishing Methods / Wu Chuanping, Zhou Tiannian, Chen, Baohui, Liu, Yu, Liang, Ping. *Fire technology*. Norwell, Jan 2021. Vol. 57. Ed. 1. P. 461–481.
17. Experimental study on vertical spill fire characteristics of transformer oil under continuous spill condition / Li Liyang, Xu Zhai, Juncai Wang, Peng Chen, Congling Shi. *Process Safety and Environmental Protection*. IF6.158, Pub Date : 2021-10-28.
18. Ruibang Sun, Juncai 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).
19. Ruibang Sun, Juncai 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.
20. Experimental Study on the Burning Characteristics of Transformer Oil Pool Fires / Jinlong Zhao, Shansheng Wang, Jianping Zhang, Rui Zhou, Rui Yang. *Energy Fuels*. 2020, 34, 4, 16 March 2020. P. 4967–4976.
21. Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation / R. Klymas , V. Nizhnyk , O. Nekora, V. Nekora, I. Stylyk. *The Scientific heritage*. Budapest, Hungary, 2021. Vol. 3. № 79(79). P. 36–44.
22. Провести пошукову 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.
23. Розрахунок процесу газообміну під час горіння рідин, що містяться в ємностях, покритих дрібновічковими сітками / О. В. Мельник, С. В. Кутеко, А. М. Басаєв. *Науковий вісник УкрНДНЦ*, 2009. № 2(20). С. 57–61.
24. Аналіз умов самозгасання полум'я рідких вуглеводнів у напівзамкнених об'ємах АПБУ / А. Я. Шаршанов, О. В. Бабенко, Ю. В. Луценко. *Проблеми пожежної безпеки*. 2001. С. 109–112. URL : <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4050> (дата звернення : 14.11.2023).
25. Енергомережа: вебсайт. URL: [http://www.energynet.com.ua/transformatornye\\_masla\\_nynas/nytro\\_11gx.html](http://www.energynet.com.ua/transformatornye_masla_nynas/nytro_11gx.html) (дата звернення : 11.04.2023).

26. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справ. / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук и др. Изд.: в 2 книгах; кн. 1. М. : Химия, 1990. 496 с.
27. Fluids for electrotechnical applications – Mineral insulating oils for electrical equipment. IEC 60296:2020. 82 p.
28. 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». Tallinn, Estonia: Üningu Teadus Juhatus, 2021. P. 574–578.
29. Кофулсо : вебсайт. URL: [http://kofulso.com.ua/dir\\_info.htm](http://kofulso.com.ua/dir_info.htm) (дата звернення : 14.11.2023).
30. Кожухотрубний теплообмінник : методичні вказівки до виконання розрахункової частини курсового проекту з дисципліни «Теплотехнічні процеси та установки» для студентів усіх форм навчання спеціальності «Енергетичний менеджмент» / Т. О. Ринкова, В. П. Баб'як , В. І. Шкляр. Київ : Політехніка, 2005. 50 с.
31. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении. Киев : Наукова думка, 1980. 316 с.
32. Конструювання та розрахунок кожухотрубчастих теплообмінних апаратів / В. В. Іванченко, О. І. Барвін, Ю. М. Штонда. Луганськ : видавництво СНУ ім. В. Даля. 2006. 208 с.

## REFERENCES

1. Informatsiia stosovno pozhezh ta nadzvychainykh sytuatsii, yaki stalysia 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 stalysia 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. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok [Rules for Arrangement of Electrical Installations] (2017). Kyiv: Minenergougillya of Ukraine [in Ukrainian].
4. 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].
5. Pravila ustrojstva jelektroustanovok. [Rules for Arrangement of Electrical Installations] (2015). Astana: Ministry of Energy and Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan [in Russian].
6. 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].
7. Guide for Substation Fire Protection (2012). IEEE 979. New York, USA. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012 [in English].
8. 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].
9. 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](https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/Guide_for_Transformer_Fire_Safety_Practices.pdf) [in English].
10. 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 1<sup>st</sup> January 2024. Kyiv: SE UkrNDNC [in English].
11. Pravyla pozheznoi 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].
12. SOU-N EE 40.1-21677681-88:2013. Pravyla budovy elektroustanovok. Pozhezna bezpeka elektroustanovok. Instruksiiia (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].
13. Zozulja, D.V. (2013) Razrabotka i nauchnoe obosnovanie tehniceskikh predlozhenij po povyseniju nadjozhnosti, jenergeticheskoj 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].
14. Zaika P., Zaika N, Lukashiv T. (2021) Osoblyvosti pozheznoi nebezpeky transformatoriv. [Fire hazard features of transformers], *Teoriia i praktyka hasinnia pozhez 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].
15. Nizhnyk, V.V., Pozdieiev, S.V., Zhartovsky, S.V., & Feshchuk, Yu.L. (2019). Otsiniuvannia nebezpeky poshyrennia pozhezhi na sumizhni budivelni obiekty za kryteriiem teplovoho potoku. Mizhnarodnyi naukovyi 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].
16. 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].
17. Li Liyang, Xu Zhai, Juncai 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].
18. 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].

19. Ruibang Sun, Juncai 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].
20. 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].
21. 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].
22. Provesty poshukovi doslidzhennia umov samozghasannia polumia ridkykh vuhlevodniv, pokrytykh dribnovichkovyvy sitkamy: 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].
23. Melnyk, O. V.; Kuteko, S. V.; Basaev, A. M. (2009) Rozrakhunok protsesu hazoobminu pid chas horinnia ridyn, shcho mistiatsia v yemnostiakh, pokrytykh dribnovichkovyvy sitkamy. *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].
24. Sharshanov, A.Ia., Babenko, O.V., Lutsenko, Yu.V. (2001) Analiz umov samozghasannia polumia ridkykh vuhlevodniv u napivzamknenykh ob'iemakh 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://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4050> [in Ukrainian].
25. Retrieved from [http://www.energynet.com.ua/transformatornye\\_masla\\_nynas/nytro\\_11gx.html](http://www.energynet.com.ua/transformatornye_masla_nynas/nytro_11gx.html) [in English].
26. Baratov, A.N., Korolchenko, A.Ya., Kravchuk, H.N. et al. (1990). *Pozharovzryvopasnost' veshhestv i materialov i sredstva ih tusheniya* [Fire and explosion hazard of substances and materials and means of their extinguishing]: Ref. ed.: in 2 books; book 1. Moscow: Chemistry [in Russian].
27. Fluids for electrotechnical applications. Mineral insulating oils for electrical equipment. IEC 60296:2020 [in English].
28. Klymas R.V. (2021) Vyznachennia bezpechnoi velychyny temperatury transformatornogo 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. Retrieved from [http://kofulso.com.ua/dir\\_info.htm](http://kofulso.com.ua/dir_info.htm).
30. Rynkova T.O., Babiak V. P., Shkliar V. I. (2005) Kozhukhotrubnyi teploobminnyk: Metodychni vkazivky do vykonannia rozrakhunkovoi chastynty kursovoho proektu z dystsypliny «Teplotekhnichni protsesy ta ustanovky» dlia studentiv usikh form navchannia spetsialnosti «Enerhetychni menezhment» [Shell-and-tube heat exchanger: Methodological instructions for the implementation of the calculation part of the course project in the discipline «Heat engineering processes and installations» for students of all forms of education in the specialty «Energy Management»]. Kyiv: IVC «Polytechnic Publishing House» [in Ukrainian].
31. Tolubinsky, V.I. (1980) Teploobmen pri kipenii [Heat exchange during boiling]. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
32. Ivanchenko V.V., Barvin O.I., Shtonda Yu.M. (2006) Konstruiuvannia ta rozrakhunok kozhukhotrubchastykh teploobminnykh aparativ [Design and calculation of shell-and-tube heat exchangers]. Luhansk: SNU publishing house named after V. Dal [in Ukrainian].

## METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES FOR THE JUSTIFICATION OF SYSTEM PARAMETERS FOR REDUCING THE TEMPERATURE OF THE TRANSFORMER OIL BELOW THE FLASH TEMPERATURE IN THE OIL RECEIVER

*P. Illiuchenko, V. Nizhnyk, O. Nikulin*

*Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Ukraine*

**KEYWORDS: ANNOTATION**

transformer  
substation, oil  
receiver, gravel  
backfill, heat  
exchanger.

The statistics of fires involving oil-filled electrical equipment at enterprises of the fuel and energy complex that occurred in Ukraine during 2017–2021 are provided. The main causes of fires at transformer substations have been identified. The existing approaches to limiting the spread of fire at oil-filled transformer substations in terms of methods of structural arrangement of oil collectors with gravel filling of certain parameters, which are used in Ukraine and beyond, are analyzed. The main drawback of using gravel backfill as a way to reduce the emergency temperature of transformer oil to safe values has been identified – the resource-consuming periodic complex of works to keep it clean. An analysis of the latest publications and researches related to the improvement of fire safety of transformer substations, assessment of transformer oil combustion regimes and issues of extinguishing flammable liquids was carried out. On the basis of analytical studies, a schematic diagram of an experimental installation – a heat exchange system (heat exchanger) was developed, which should ensure a decrease in the temperature of heated oil from 250 °C to below the flash point of 150 °C during the passage of oil through the heat exchanger for 900 s. The project of the methodology of experimental research and substantiation of the parameters of the heat exchange system (heat exchanger) was developed to reduce the temperature of the transformer oil below the flash point in the oil receiver of the transformer substation with the function of diverting oil to the oil sump. The method makes it possible to determine changes in the temperature of the transformer oil from 250 °C to below the flash point (150 °C) during the passage of the oil through the heat exchanger for 900 s.