

Ніжник В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Іллюченко П.О.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Михайлов В.М.

Сектор пожежної безпеки та технологій науково-дослідного центру протипожежного захисту

Несенюк Л.П.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛООБМІННИКА ТРАНСФОРМАТОРА ДЛЯ ОХОЛОДЖЕННЯ МАСЛА ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ

Метою даної роботи була розробка та проведення повного факторного експерименту залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінної системи (далі – теплообмінника) (з наповненням холодоагентом водою) для охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху (нижче 150 °C) від об'єму трансформаторного масла, що знаходиться в корпусі трансформатора та діаметра гофрованих трубок з нержавкої сталі теплообмінника. Повний факторний експеримент є ефективним методом вивчення складних взаємозв'язків у процесах розвитку та припинення пожежі. Отримані результати допоможуть розробити рекомендації для проєктування ефективності системи попередження поширення пожежі на маслonaповнених електричних трансформаторах.

Нашими попередніми дослідженнями встановлено наступні значущі чинники: мінімальний і максимальний об'єм трансформаторного масла в трансформаторі; мінімальний і максимальний діаметр трубок з нержавкої сталі теплообмінника; величини стандартного ряду площ теплообмінника.

Визначено, що для побудови математичної моделі температурного режиму пожежі у маслonaповнених трансформаторах необхідно провести повний факторний обчислювальний експеримент. Проведено чотири чисельних експерименти згідно з розробленою в ході досліджень матрицею планування.

За результатами дослідження було отримано математичну модель охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок з нержавкої сталі теплообмінника. Отримано константи рівняння числової регресії для охолодження трансформаторного масла під час проходження охолоджуючим контуром теплообмінника в ході аварійної розгеметизації корпусу трансформатора під час пожежі. Подальшого розвитку дістало застосування обчислювальних експериментів для визначення температурних режимів пожежі при різних умовах.

Ключові слова: повний факторний експеримент, температурний режим, параметри теплообмінника, трансформаторне масло, теплообмінник, температура спалаху, температура займання, пожежа трансформаторів, вогнеперегороджувач, гравійна засипка.

Постановка проблеми. Людство постійно вдосконалює свої моделі використання енергії. У цьому контексті електроенергія широко використовується в усьому світі ефективно джерело енергії.

Силові трансформатори, як електромагнітні пристрої, що призначені для перетворення однієї системи змінної напруги та струму, в іншу систему змінної напруги й струму, за однакової частоти задля передавання електроенергії та

її використання. Трансформаторна підстанція, будучи складним технологічним об'єктом, має бути спроектована та повинна експлуатуватися за певними правилами та нормами, що включають в тому числі і вимоги щодо забезпечення пожежної безпеки.

Так, силові маслonaповнені трансформатори містять від 200 л до 60 000 л мінерального масла, яке використовується для охолодження елементів та ізоляції струмоведучих частин трансформа-

тора. Відповідно до міжнародного стандарту ІЕС 60596-1-40 [1] з показників пожежної небезпеки електроізоляційних рідин трансформаторні мінеральні масла це горючі ізоляційні рідини класу О1, тобто, що температура займання масла становить $\leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а нижча теплота згорання $\geq 42\text{ }^{\circ}\text{МДж/кг}$. Наголошується, що пожежі за участю викиду ізоляційних рідин згаданого класу найбільш матеріально збиткові. Зазвичай температура спалаху трансформаторного масла не нижче $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Причин виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях багато. У різних галузях паливно-енергетичному комплексу деякі трапляються рідко, інші досить часто. Аналіз пожеж засвідчив, що основними причинами їх виникнення стали коротке замикання в електричних колах електрообладнання (переважно трансформаторне обладнання) та порушення технологічних процесів через перевантаження електричної мережі. Пожежі на трансформаторах супроводжуються перегрівом масла до температури вище $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, розгерметизацією корпусу трансформатора, витоком масла і його займанням (рисунк 1).



Рис. 1. Приклад пожежі на маслонаповненому силовому трансформаторі

За даними Міністерства енергетики України [2], за останні п'ять років до повномасштабного вторгнення країни-агресора тільки на підприємствах паливно-енергетичного комплексу сталося більше 100 пожеж (рисунк 2), у результаті яких збитки склали близько 158 млн. грн, при чому близько п'ятидесяти відсотків пожеж в цій галузі припадає на трансформаторне обладнання, і як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його загорянням.

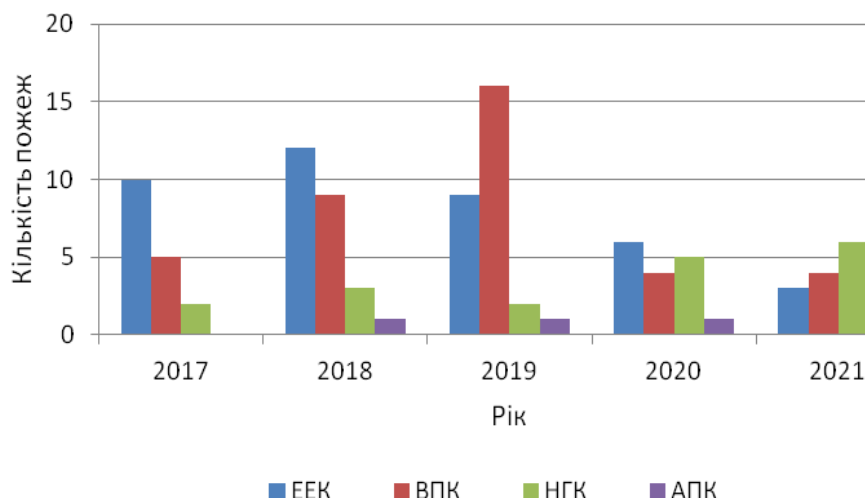
На сьогоднішній день ризик виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях значно підвищився, адже в умовах російської агресії об'єкти енергетики, стали одними із пріоритетних цілей завдання ракетних та дронів ударів з метою зламу опору агресору, тому удосконалення систем попередження поширення пожежі на трансформаторних підстанціях є важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час аварійних режимів роботи трансформатора розлив нагрітого вище температури спалаху трансформаторного масла та його подальше займання може сприяти подальшому розвитку пожежі спричинити поширенню територією підприємства на суміжні об'єкти.

Тому з метою обмеження розвитку та поширення пожежі маслонаповненого електроустаткування регламентуються відстані між елементами та спорудами енергетичних об'єктів, застосовуються перегородки з негорючих матеріалів та улаштовують системи пожежогасіння тощо.

Окрім цього, для припинення горіння трансформаторного масла та його охолодження до безпечної температури застосовують системи попередження поширення пожежі, а саме – під трансформатором улаштовують маслоприймач (з функцією відведення масла в маслозбірник або ні) з засипкою з гірських порід в якості вогнезагороджувача. Закордонна практика в якості засипки з гірських порід використовує морську гальку, щебінь з розмірами часток $3,8\text{ см}$ [3–7], а вітчизняні вимоги нормують застосування шару товщиною $0,25\text{ м}$ чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи з фракцією $50\text{ мм} \pm 20\text{ мм}$ [8, 9]. Однак внаслідок впливу навколишнього середовища засипка з гірських порід підлягає забрудненню, що значно знижує її здатність пропускати та охолоджувати розігріте до критичних температур масло. Зазначене зумовлює обов'язкове періодичне (відповідно до Правил [9] – не рідше ніж 2 рази у рік) проведення ресурсозатратного комплексу заходів з утримання засипки в чистоті, а в деяких випадках її навіть унормовано до заміни. Окрім того, нормованого в [8, 9] об'єму засипки може бути недостатнім для зниження температури трансформаторного масла при аварійній розгерметизації трансформатора до безпечної (нижче температури спалаху) може бути недостатнім.

Питання безпеки електроенергетики завжди привертало увагу вчених. У розв'язанні питань щодо забезпечення пожежної безпеки, гасіння пожежі на електропідстанціях, обмеження поши-



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

Рис. 2. Розподіл кількості пожеж, які сталися у різних галузях паливно-енергетичному комплексу протягом 2017 – 2021 рр.

рення пожежі між будівлями та дослідження властивостей горіння вуглеводнів, особливо трансформаторних масел, взяли участь як вітчизняні так і закордонні науковці.

Так, в роботі Ніжника В. та Поздєєва С. [10] розглянута проблематика оцінювання небезпеки розвитку поширення вогню на суміжні об'єкти. Вчені дійшли висновку, що тепловий потік від вогнища пожежі є суттєво змінним у часі та залежить від зовнішніх погодних умов. При цьому не рекомендують густину теплового потоку використовувати як основний критерій оцінювання небезпеки поширення пожежі між суміжними будівельними об'єктами. Ними обґрунтовано вибір критерію, що характеризує небезпеку поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти.

Актуальним завданням в електроенергетиці є забезпечення працездатності електротехнічного обладнання після нормованого (розрахункового 25–30 років) терміну служби. Аналіз аварійності, оцінка стану та діагностичне обстеження головних генераторних трансформаторів ТНЦ-1250000/330 уможливили визначити незворотність катастрофічних процесів під час тривалої експлуатації, якщо не здійснюється відновлення міцності їх систем. Автори [11] доводять, що повернення систем трансформаторного обладнання до регламентованого стану зберігає високі показники безпеки, надійності та ефективності.

У дослідженні [12] для моделювання пожежі, з метою вивчення характеристик горіння трансформаторного масла з використанням різних методів подачі вогнегасячої суміші, використовувався сталевий резервуар площею 100 м². Результати показали, що температури ближче до краю резервуара, знижувалися зі зростанням його висоти. Швидкість зростання висоти полум'я збільшувалася на етапі, коли початкова температура палива нагрівалася до вищого значення. На ефективність гасіння істотно вплинули концентрація вогнегасних речовин і щільність їх подачі. Хорошим вибором з точки зору безпеки пожежників стало дотримання більшої відстані до резервуара для подачі вогнегасних засобів, а час гасіння має бути коротший. Також зазначено, що для ефективного гасіння пожежі стратегія повинна полягати у використанні двох і більше пожежних машин щоб охопити весь аварійний резервуар.

Полум'я струменя трансформаторного масла становить серйозну загрозу безпеці для обладнання та працівників через його сильне ближнє теплове випромінювання та вплив полум'я на великі відстані. Тому вчені [13] вивчали характеристики горіння струменів трансформаторного масла, щоб забезпечити теоретичну допомогу у запобіганні та гасінні пожеж на підстанціях. У ході проведених експериментів виведено функціональну залежність між висотою полум'я та масовою витратою та функціональну залежність

між температурою полум'я та осьовою висотою. Було створено модель прогнозування променистого теплового потоку струменя трансформаторного масла для маслonaповненого обладнання підстанції.

Температурні режими пожеж на трансформаторах мають суттєве значення для подальшого моделювання, прогнозу їхнього поширення та здійснення заходів щодо запобігання комплексним пошкодженням. В праці [14] дослідниками було розглянуто вплив температурних режимів пожеж на захисні конструкції, призначених для укріплення трансформаторів. В результаті обґрунтовано модифікований температурний режим під час пожежі на трансформаторах, розташованих у захисних спорудах, який складав від 900 °C до 1100 °C. Також встановлено нормований час (до 30 хвилин), протягом якого будівельні конструкції захисних споруд повинні витримувати вплив зміненого температурного режиму.

Актуальні питаннями розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння вуглеводнів висвітлені дисертаційній роботі [15]. Вченим удосконалено вимоги щодо улаштування системи вогнеперешкодження (засипки з гірських порід) на маслоприймачах трансформаторних підстанцій.

Проте у вищезазначених роботах не висвітлюється питання вдосконалення заходів щодо запобігання поширенню пожеж у приймачах трансформаторного масла з метою впровадження ефективної швидкодіючої системи теплообміну, яка могла б знизити температуру трансформаторного масла нижче спалаху, придатної замінити засипку з гірських порід. Це підкреслює актуальність проведення досліджень, спрямованих на визначення оптимальних параметрів засобу, який зможе ефективно знизити пожежонебезпечну температуру трансформаторного масла під час його витоку під час аварійної роботи трансформатора.

Постановка завдання. Метою дослідження є визначення залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінника, що забезпечує при пожежі охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника.

Метод дослідження – проведення багатофакторного експерименту із урахуванням найбільш значущих чинників, що впливають на процес дослідження. Для повного факторного експерименту обиралися змінні, що впливають на зміну температури трансформаторного масла під час

його проходження охолоджуючого контуру теплообмінника.

Виклад основного матеріалу. За результатами досліджень на експериментальній установці [16] встановлено, що трансформаторне масло температурою у 220 °C на вході в теплообмінник в результаті проходження крізь охолоджувальний контур на основі гофрованих труб з нержавкої сталі з заповненням водою охолоджується до температури близько до 110 °C.

Для визначення залежності площі теплообміну від об'єму трансформаторного масла, що необхідно охолодити та діаметру гофрованих трубок охолоджувального контуру, було проведено повний факторний обчислювальний експеримент.

Повний факторний експеримент найчастіше реалізується серед методів активного експерименту. При використанні повного факторного експерименту метою дослідника є отримання лінійної та неповної квадратичної статистичної моделі об'єкту, що досліджується – рівняння регресії [17].

У даній роботі для проведення повного факторного обчислювального експерименту попередньо було визначено такі характеристики: об'єм масла в трансформаторі (V) мінімальний – 200 л, максимальний – 60 000 л; діаметр трубок теплообмінника (d) мінімальний – 50 мм, максимальний – 250 мм; стандартний ряд площ теплообмінника (м²) – 0,5, 1, 5, 10, 25, 50, 100, 150.

Тип регресійної залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінника охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника має вигляд (1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 \quad (1)$$

де: x_1 , x_2 , – показники, що враховують обрані параметри;

b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , – константи рівняння числової регресії.

Повний факторний експеримент передбачає вивчення всіх можливих комбінацій факторів і рівнів. Для визначення констант рівняння числової регресії проведено чотири чисельних експерименти за складеною для цього матрицею планування, наведеною у таблиці 1.

Так, для кожного експерименту розраховано значення площі теплообмінника (м²), залежно від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника для всіх обраних значущих параметрів, що наведено в таблиці 2.

Таблиця 1

**Матриця планування повного
факторного експерименту для побудови
математичної моделі**

№ експерименту	Показники, що враховують обрані параметри		
	x_1	x_2	x_1, x_2
1	+	+	+
2	-	+	-
3	+	-	-
4	-	-	+

Таблиця 2

Розрахункові значення площ теплообмінника

№ експерименту	1	2	3	4
Значення площі теплообмінника, m^2	104	0,99	128	4,06

Для обробки даних використовуємо регресійний аналіз щодо оцінки впливу кожного фактора та їхніх взаємодій.

Використовуючи отримані дані та формули (2), визначено константи рівняння числової регресії, що наведено у таблиці 3.

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S; b_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V \cdot S;$$

$$b_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d \cdot S; b_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d \cdot V \cdot S; \quad (2)$$

де: $N = 4$ – кількість проектних сценаріїв згідно з планом експерименту;

V (об'єм масла), d (діаметр трубок) – значення параметрів згідно з матрицею планування (Табл. 1);

S – значення площі теплообмінника (Табл. 2).

Таблиця 3

Константи рівняння числової регресії

Коефіцієнт	b_0	b_1	b_2	b_3
Значення	59,2	-6,768	56,737	-5,232

Отже, за результатами проведеного повного факторного експерименту з використанням запропонованих математичних моделей вперше вста-

новлено, що залежність площі охолоджуючого контуру теплообмінника, що забезпечує при пожежі охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла та діаметра гофрованих трубок теплообмінника має наступний вигляд (3):

$$S = 736,7V + 0,29d - 1,7Vd - 141,8 \quad (3)$$

Означене положення уможливорює більш точне прогнозування закономірності охолодження трансформаторного масла в умовах його аварійного витoku під час пожежі, що може стати підґрунтям для методичного забезпечення для проектування ефективності системи попередження поширення пожежі на маслonaповнених трансформаторних підстанціях.

Висновки. У результаті проведеного дослідження за попередньо визначених параметрів (діаметр трубок (d), об'єм масла (V), площа теплообміну (S)) було обґрунтовано оптимальні параметри теплообмінника трансформатора для ефективного охолодження масла під час пожежі.

За результатами основі проведеного повного факторного експерименту запропоновано математичну модель залежності площі охолоджуючого контуру теплообмінника, що забезпечує при пожежі охолодження трансформаторного масла до температури нижче його температури спалаху від об'єму трансформаторного масла (V) та діаметра гофрованих трубок (d) теплообмінника має вигляд:

$$S = 736,7V + 0,29d - 1,7Vd - 141,8$$

Отримана математична модель дозволить здійснювати уточнене прогнозування закономірності охолодження трансформаторного масла в теплообміннику в умовах його аварійного витoku під час пожежі і може бути реалізована для проектування ефективності системи попередження поширення пожежі на маслonaповнених трансформаторних підстанціях, здатних замінити засипку з гірських порід.

Список літератури:

1. IEC 60695-1-40:2013. Fire hazard testing. Part 1-40: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids. 2nd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. 64 p. Мова англійська.
2. Інформаційно-аналітичні матеріали Міністерства енергетики України щодо стану пожежної та техногенної безпеки в паливно-енергетичному комплексі [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.mre.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=245293181. Назва з екрана: Інформаційно-аналітичні матеріали Міністерства енергетики України. Дата звернення: 24.10.2024.3. IEEE 979:2012. Guide for Substation Fire Protection. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. 98 p. Мова англійська.

4. NFPA 850:2020. Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations. Quincy : National Fire Protection Association, 2020. 150 p. Мова англійська.
5. Guide for Transformer Fire Safety Practices [Електронний ресурс]/Working Group A2.33. Paris: CIGRE, 2013. 139 p. Режим доступу: [https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales Guide for Transformer Fire Safety Practices.pdf](https://static.mimaterials.com/midel/documents/sales%20Guide%20for%20Transformer%20Fire%20Safety%20Practices.pdf) (дата звернення: 10.10.2023). Мова англійська.
6. Transformer Fire Protection. Facilities Instructions, Standards, and Techniques [Текст]. Denver, Colorado: Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, 2016. 64 p. Мова англійська.
7. IEC 61936-1:2021. Power installations exceeding 1 kV AC and 1.5 kV DC -- Part 1: AC. 3rd ed. [Текст]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021. 250 p. Мова англійська.
8. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ): затверджено Міністерством енергетики України. 9-те вид. Харків : Техноцентр, 2020. 712 с.
9. 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 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0328-19#Text>. Назва з екрана: Правила пожежної безпеки в енергетичній галузі. Дата звернення: 11.04.2023.
10. 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, № 11 (73), 2019. С. 47–51.
11. 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. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля, вип. 20, 2013. С. 57-67.
12. Wu, C., Zhou, T., Chen, B., Liu, Y., & Liang, P. Experimental study on burning characteristics of the large-scale transformer oil pool fire with different extinguishing methods. Fire Technology, 57(1), 2021. P. 461-481.
13. Sun, R., Wang, J., Yang, X., & Chen, P. Experimental research on the combustion characteristics of transformer oil jet fires in oil-filled equipment under heat. ACS Omega, 6(47), 2021. P. 31843-31853.
14. Palchykov, R., Ballo, Y., Nizhnyk, V., Mykhailov, V., Gavryliuk, A., Loik, V., Synelnikov, O., Synelnikov, S., Stepanenko, V., Nuianzin, O. Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10(132)), 2024. P. 37–45. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317332.
15. Климаєв Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях : дис. канд. техн. наук: 21.06.02 – Пожежна безпека/Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. Львів, 2022. 250 с.
16. Іллюченко П., Ніжник В., Нікулін О., Ратушний О. Щодо розроблення експериментальної установки для зниження температури трансформаторного масла при імітації його аварійного витоку. Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю 'Надзвичайні ситуації: безпека та захист'. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. С. 97-99.
17. Горбунов О. Д. Конспект лекцій з дисципліни «Інженерний експеримент» для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня спеціальності 144 «Теплоенергетика» очної та заочної форм навчання. Кам'янське : ДДТУ, 2016. 42 с.

Nizhnyk V.V., Ilyuchenko P.O., Mykhailov V.M., Nesenjuk L.P. JUSTIFICATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF TRANSFORMER HEAT EXCHANGER FOR OIL COOLING DURING A FIRE

The purpose of this work was to develop and conduct a full factorial experiment of the dependence of the area of the cooling circuit of the heat exchange system (hereinafter referred to as the heat exchanger) (with water coolant filling) for cooling transformer oil to a temperature below its flash point (below 150 °C) on the volume of transformer oil in the transformer housing and the diameter of the corrugated stainless steel tubes of the heat exchanger. A full factorial experiment is an effective method for studying complex relationships in the processes of fire development and suppression. The results obtained will help develop recommendations for designing the effectiveness of a fire prevention system for oil-filled electrical transformers.

Our previous studies have established the following significant factors: the minimum and maximum volume of transformer oil in the transformer; the minimum and maximum diameter of the stainless steel tubes of the heat exchanger; the values of the standard series of heat exchanger areas.

It was determined that to build a mathematical model of the temperature regime of a fire in oil-filled transformers, it is necessary to conduct a full factorial computational experiment. Four numerical experiments were conducted according to the planning matrix developed during the research.

According to the results of the study, a mathematical model of cooling transformer oil to a temperature below its flash point was obtained from the volume of transformer oil and the diameter of the corrugated stainless

steel tubes of the heat exchanger. The constants of the numerical regression equation for cooling transformer oil during passage through the cooling circuit of the heat exchanger during emergency depressurization of the transformer housing during a fire were obtained. The use of computational experiments to determine the temperature regimes of a fire under various conditions was further developed.

Key words: *full factorial experiment, temperature regime, heat exchanger parameters, transformer oil, heat exchanger, flash point, ignition temperature, transformer fire, fire barrier, gravel backfill.*