

Р. В. Пальчиков, аспірант (ORCID 0009-0004-7959-571X)

Інститут наукових досліджень з цивільного захисту

Національного університету цивільного захисту України, Київ, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ В ЗАХИСНИХ СПОРУДАХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Представлено результати дослідження, які демонструють, що за умов російської агресії впровадження сучасних підходів до обмеження поширення пожежі на трансформаторному обладнанні є одним із пріоритетних завдань захисту економіки і національної безпеки країни. Здійснено вибір розрахункового сценарію дослідження температурного режиму під час пожежі на трансформаторі, який розміщено в захисній конструкції, проведено за двома сценаріями виникнення та поширення пожежі. Побудовані розрахункові моделі для проведення дослідження. За результатами теоретичного дослідження продемонстровано зміни температури в захисній конструкції під час горіння трансформатора за даними датчика температури, що встановлено на висотах 1 м, 10 м та 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній конструкції відсутня автоматична система пожежогасіння та у випадку, коли у захисній конструкції наявна автоматична система пожежогасіння. Отримані результати засвідчили, що із наявністю у захисній конструкції автоматичної системи пожежогасіння спостерігається певне зниження температури після двохсотієї секунди дослідження, що пояснюється охолодження водяними потоками будівельних конструкцій захисної споруди, для обґрунтування температурного режиму під час пожежі трансформаторів приймалися умови найбільшого впливу температури на будівельні конструкції. Проведена статистична обробка результатів досліджень. Представлені результати дослідження щодо обґрунтування модифікованого температурного режиму під час пожежі на трансформаторах, що розташовані в середині захисних споруд, який доцільно в подальшому використовувати для оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій таких захисних споруд та встановлено нормований час за якого будівельні конструкції захисних споруд мають витримувати вплив модифікованого температурного режиму. Надані пропозиції щодо подальших досліджень у зазначеному напрямку.

Ключові слова: вогнестійкість, межа вогнестійкості, клас вогнестійкості, температурний режим, трансформатор, критична інфраструктура

1. Вступ

Трансформатори, як статичні електромагнітні пристрої, є важливою ланкою між розподільними мережами та лініями електропередачі. Статистичні дані Державної служби України з надзвичайних ситуацій свідчать, що половина пожеж, що виникають в енергетичній галузі, спричинено загорянням трансформаторного обладнання. Розвиток такої пожежі має типовий сценарій: мастило, яке використовується для охолодження та ізоляції елементів трансформатора, перегрівається понад 250 °С, що призводить до руйнування корпусу трансформатора. В результаті відбувається аварійний викид мастила із подальшим його займанням. Трансформатори, як один із найбільш пожежонебезпечних видів обладнання, містять від 200 л до 60 000 л мінерального мастила, що є горючою речовиною із густиною в діапазоні $(0,80-0,89) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

В умовах можливого ракетного чи дронного ураження трансформаторне обладнання енергетичних підприємств, яке критично важливе для економіки та безпеки країни, потребує розміщення в спеціальних захисних спорудах. Водночас це створює ризик розвитку масштабної пожежі всередині приміщення захисної споруди у разі займання мастила внаслідок аварійного режиму роботи трансформатора. Зазначене зумовлює необхідність унормування вимог щодо вогнестійкості

ті огорожувальних будівельних конструкцій такої захисної споруди.

Таким чином, незважаючи на наявні стандарти відсутні науково обґрунтовані методи визначення параметричного температурного режиму трансформаторів у захисних спорудах, що ускладнює розробку адекватних вимог до вогнестійкості конструкцій і підвищує ризик розвитку масштабних пожеж під час аварійних режимів роботи трансформаторного обладнання, а також необґрунтованих економічних витрат на проектування вогнестійкості будівельних конструкцій таких споруд.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Чинні в Україні нормативно-правові акти і дослідження вчених, що вивчають поведінку залізобетонних конструкцій в умовах термічного впливу вогню, представляють різні методики, які описують роботу цих конструкцій за відповідних умов. Для прогнозування температури пожежі широко використовується інтегральна модель, що базується на апроксимаційних формулах та номограмах. Ця модель, будучи найпростішою, припускає, що теплота горіння рівномірно розподілена по об'єму приміщення та витрачається на нагрів продуктів згоряння. Однак її практичне застосування вимагає попереднього знання температури пожежі у першому наближенні для розрахунку ключових параметрів: густини повітря, об'ємної теплоємності та наведеного ступеня чорноти димових газів, тому поряд із зазначеними відомими результатами доречним було б використати, для дослідження температурних режимів пожежі, польові моделі.

Іншими науковцями запропоновано низку методів розрахунку вогнестійкості будівельних конструкцій. У роботі [1] визначені особливості поведінки композитної сталезалізобетонної плити в умовах пожежі. Розглядалися питання нестационарного температурного поля при нагріванні таких конструкцій. В роботі [2] С. Поздєєв досліджував методи розрахункової оцінки вогнестійкості скляних конструкцій, при цьому також у цих процесах розглядалися виключно стандартизовані температурні режими пожежі. У роботі [3] розглянуті математичні моделі поширення пожежі в триповерховій будівлі за результатами натурних випробувань реагування на пожежу. В цій роботі також поза увагою залишилися питання параметричного температурного режиму пожежі.

У роботі [4] розроблено методику визначення розподілу температури у перерізі залізобетонної плити за стандартним температурним режимом пожежі з подальшою можливістю використання даних теплових показників для проведення оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит з будь-яким перерізом за спрощеним методом, рекомендованим Єврокодом 2. Разом всі ці дослідження у своїй основі базуються на стандартизованих температурних режимах пожеж та залишили поза увагою питання застосовності запропонованих ними методів під час дослідження параметричних температурних режимів, особливо в умовах зменшеної кількості окисника необхідного для процесу горіння.

Обґрунтування температурного режиму під час пожежі є важливим аспектом забезпечення пожежної безпеки людей, експлуатаційної надійності обладнання, в тому числі природніх екосистем. Над вивчення параметричного температурного режиму пожежі в різних сферах проводять дослідження різні вчені. Наприклад, в роботі [5], наведені дослідження параметричних температурних режимів пожежі в природніх екосистемах.

Отже можна констатувати, що використання стандартизованих температурних режимів щодо обґрунтування вимог для трансформаторів, розміщених в за-

хисних конструкціях є не доцільним та може привести до завищених економічних витрат на проектування вогнестійкості будівельних конструкцій таких споруд.

У роботі [6] розглянуті математичні моделі горіння трансформаторного масла, але ці моделі використані з метою обґрунтування мінімальних параметрів гра-війно-щебневої засипки у маслоприймачі трансформатора.

Зазначені вище та інші дослідження не містять даних щодо процесів зміни температури під час пожежі на автотрансформаторах, що розташовані в захисних спорудах. Це зумовлює актуальність проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування температурного режиму під час пожежі в захисних спорудах для автотрансформатора на основі їх реальних параметрів, що впливають на процеси теплопередачі та дасть змогу запобігти необґрунтованим економічним витратам на проектування вогнезахисту будівельних конструкцій таких споруд.

3. Мета і завдання дослідження

Мета роботи полягає в розкритті закономірностей зміни температури під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора, як наукового підґрунтя встановлення температурного режиму пожежі для оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій таких об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан використання стандартизованих температурних режимів під час оцінювання класів вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд;
2. Провести обґрунтування температурного режиму під час пожежі на трансформаторі, що розміщено в захисній споруді.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – зміна температури під час пожежі на трансформаторах, що розташовані в захисних спорудах. Предмет дослідження – вплив кількості трансформаторного мастила та геометричних параметрів захисної споруди (можлива площа пожежі) на закономірність зміни температури під час пожежі на трансформаторах, що розташовані в захисних спорудах. Гіпотеза дослідження полягає у врахуванні реальних параметрів та характеристик захисних споруд для трансформаторів під час встановлення температурного режиму для оцінювання класу вогнестійкості їх будівельних конструкцій.

Методи дослідження: комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо дослідження температурних режимів пожежі; математичне моделювання із використанням програмного комплексу FDS процесів зміни температури під час пожежі на трансформаторах, що розташовані в захисних конструкціях шляхом застосування низки чисельних підходів. Просторову дискретизацію диференціальних рівнянь виконували за допомогою методів кінцевих різниць (з використанням стійкої схеми «предиктор-коректор») та кінцевих об'ємів. Для розв'язання отриманої системи рівнянь Нав'є-Стокса щодо зміни температури в умовах пожежі на трансформаторах, що розташовані в захисних конструкціях, використовувався метод Ейлера, для визначення розміру розрахункової сітки комп'ютерних моделей був застосований метод дихотомії. Методологія обробки отриманих результатів включала статистичний аналіз (критерії Фішера для однорідності дисперсій та Граббса для викидів), та стандартні методи математичної статистики.

5. Сучасний стан використання стандартизованих температурних режимів

Аналіз несучої конструкції з погляду протипожежного захисту слід проводити із застосуванням встановлених для заданих розрахункових ситуацій моделей термічних та механічних впливів, а також параметрів несучої конструкції при підвищених температурах [7]. Взагалі вогнестійкість має підтверджуватись за наявності наступних параметрів: часових, міцнісних та температурних. Порівняння за температурними параметрами є найбільш поширеним методом за якого визначається критична температура для навантаження, що описується за допомогою спрощених розрахункових методів. Як правило, в більшості випадків для проектування будівельних конструкцій застосовують номінальні температурні режими пожежі: стандартний температурний режим; температурний режим зовнішньої пожежі; вуглеводневий температурний режим [8].

Вуглеводневий температурний режим характеризується більш інтенсивним нагрівом у порівнянні зі стандартним режимом пожежі. Його застосування є обов'язковим для визначення меж вогнестійкості будівельних конструкцій на об'єктах нафтогазового комплексу, де температура пожежі досягає значно вищих значень і зростає значно швидше, ніж при горінні звичайних будівельних матеріалів. Графічне представлення динаміки різних температурних режимів пожежі у вигляді кривих «температура-час» наведено на рис. 1.

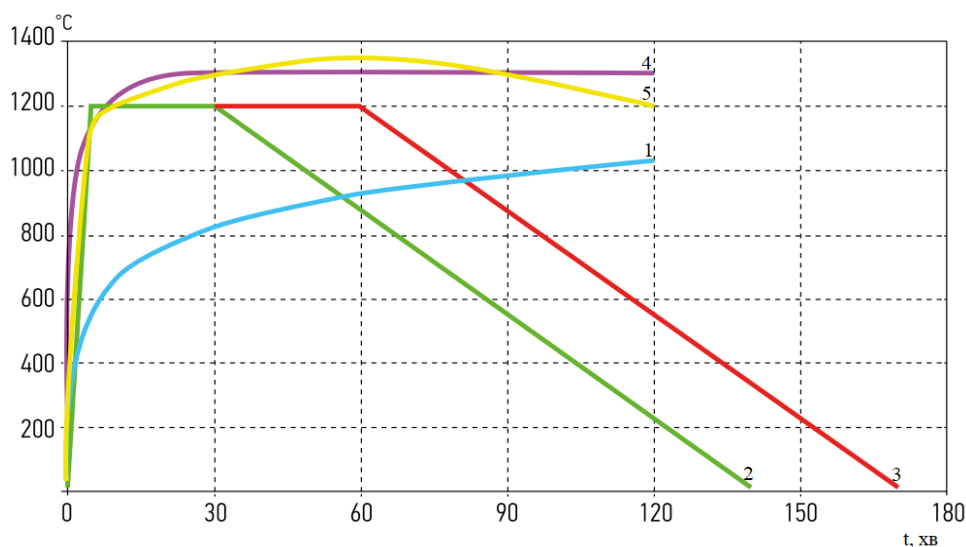


Рис. 1. Температурні режими розвитку пожежі: 1 – стандартний температурний режим пожежі; 2 – температурний режим RABT ZTV для автомобільних тунелів; 3 – температурний режим RABT ZTV для залізничних тунелів; 4 – температурний режим вуглеводневої пожежі; 5 – температурний режим RWS (імітує горіння бензовозу (50 м³) в тунелі)

Слід зазначити, що приміщення захисної конструкції для трансформаторів має особливу характеристику. Одним із завдань огорожувальних конструкцій є підтримка нормального мікроклімату (температури та вологості) всередині приміщення під час експлуатації та захист будівлі від впливу поверхневих і ґрунтових вод. Передбачається каскадна робота вентиляторів систем двома вентиляторами, з продуктивністю кожного – $71\ 650/2=35\ 825\ \text{м}^3/\text{год}$ тощо. План-схему захисної конструкції для розміщення трансформатора зображено на рис. 2 [9].

За умов обрання розрахункового сценарію мають бути враховані: об'ємно-планувальні рішення; теплофізичні характеристики будівельних конструкцій і роз-

міщеного устаткування та обладнання; характеристики, об'єм та розташування горючих речовин і матеріалів; системи пожежогасіння та вентиляції. Розрахунковий сценарій обирають з позиції очікування найгірших можливих наслідків для подальшого розвитку пожежі. При цьому необхідно врахувати: ймовірні місця її виникнення; можливу динаміку розвитку; а також склад та характеристики системи протипожежної захисту. Припускається, що загоряння відбувається у приміщенні з найбільшою пожежною завантаженістю та найменшим об'ємом.

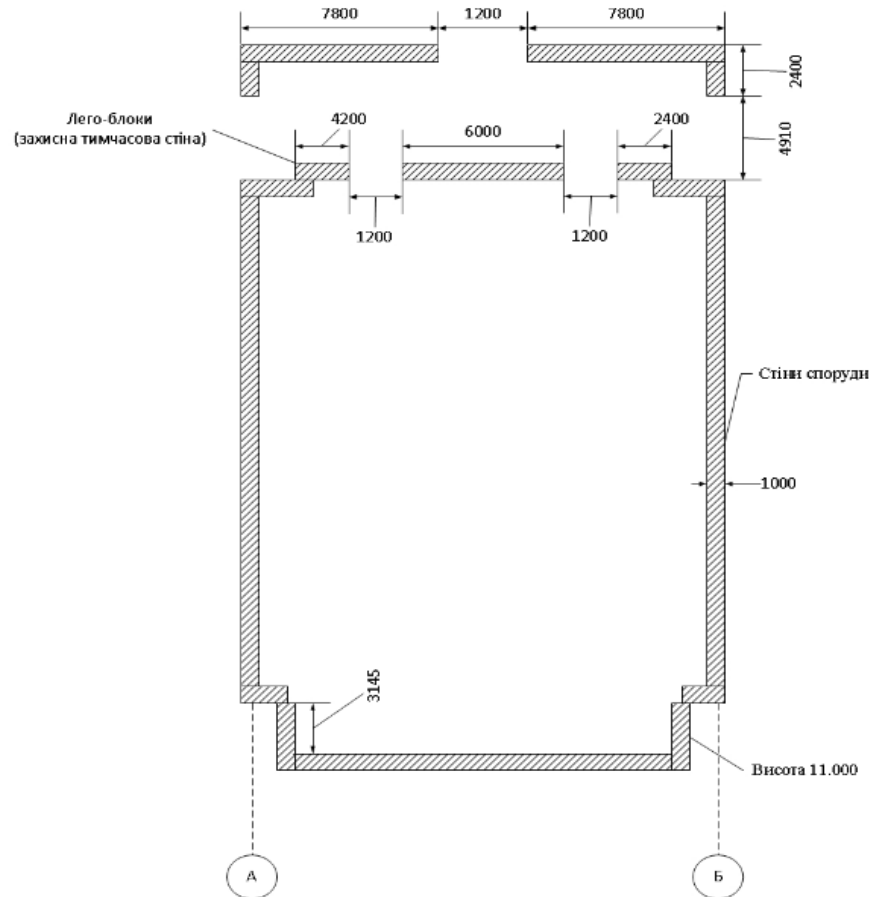


Рис. 2. План-схема захисної конструкції для трансформатора

Виходячи із зазначеного нами розглянуто два сценарії виникнення та поширення пожежі, а саме:

Сценарій 1 – пожежа виникла у приміщенні розміщення обладнання трансформатора класу АТ 330 кВ, трансформаторне мастило виливається на підлогу та вільно розтікається по всій площі приміщення. Автоматична система пожежогасіння відсутня. Розрахункова площа становить 348 м^2 , розрахункова висота становить 18 м. Розвиток пожежі приймаємо як для кругової форми. Вихідні параметри характеристик трансформаторного мастила для розрахунку приймаємо за даними [10].

Сценарій 2 – пожежа виникла у приміщенні розміщення обладнання трансформатора класу АТ 750 кВ, трансформаторне мастило виливається на підлогу та вільно розтікається по всій площі приміщення. Автоматична система пожежогасіння наявна та спрацювала належним чином на 180 с після початку виникнення горіння. Розрахункова площа становить 348 м^2 , розрахункова висота становить 18 м. Розвиток пожежі приймаємо як для кругової форми. Вихідні параметри характеристик трансформаторного мастила для розрахунку приймаємо за даними [10].

6. Обґрунтування температурного режиму на трансформаторі в захисній споруді

Розрахунок температурного режиму під час пожежі трансформатора, який розташований в захисній конструкції, проведено за польовою моделлю використовуючи реакцію простої стехіометрії (трансформаторне мастило може містити тільки атоми вуглецю, водню, кисню та азоту).

Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використано спеціальну програму SmokeView. FDS здатна реалізувати обчислювальну газодинамічну модель (CFD) процесів тепломасообміну під час горіння. Програма чисельно розв'язує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних потоків, параметри яких залежать від температури. Основна увага приділяється моделюванню поширення диму та теплопередачі під час пожежі. У загальному вигляді система рівнянь Нав'є-Стокса [11] включає два основні рівняння — рівняння руху та рівняння нерозривності.

Візуалізована 3D модель захисної конструкції із трансформатором зображена на рис. 3.

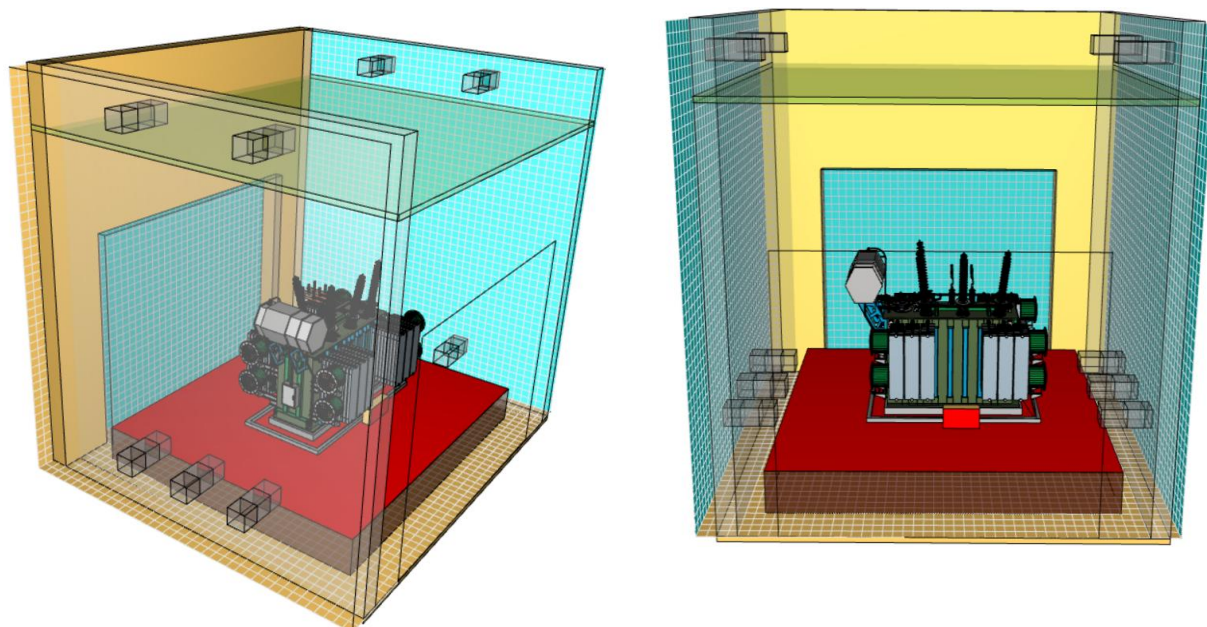


Рис. 3. Візуалізована 3D модель захисної конструкції із трансформатором

Відповідно до обраних сценаріїв пожежі, горіння відбувається в середині приміщення на всій його площі протягом всього часу моделювання. Датчики вимірювання значення температури розміщено безпосередньо по периметру приміщення де розміщується трансформаторне обладнання.

На рис. 4 показано зміни температури в захисній конструкції під час горіння трансформатора за даними датчика температури, що встановлено на висотах 1 м, 10 м, 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній конструкції відсутня автоматична система пожежогасіння.

Як бачимо із графіків, що датчик, який розташовано на висоті 18 м від рівня підлоги захисної конструкції показав найбільші значення температур, тому для подальшого дослідження температурного режиму пожежі достатньо показів температурних датчиків, які розміщені на висоті 18 м від рівня підлоги захисної конструкції.

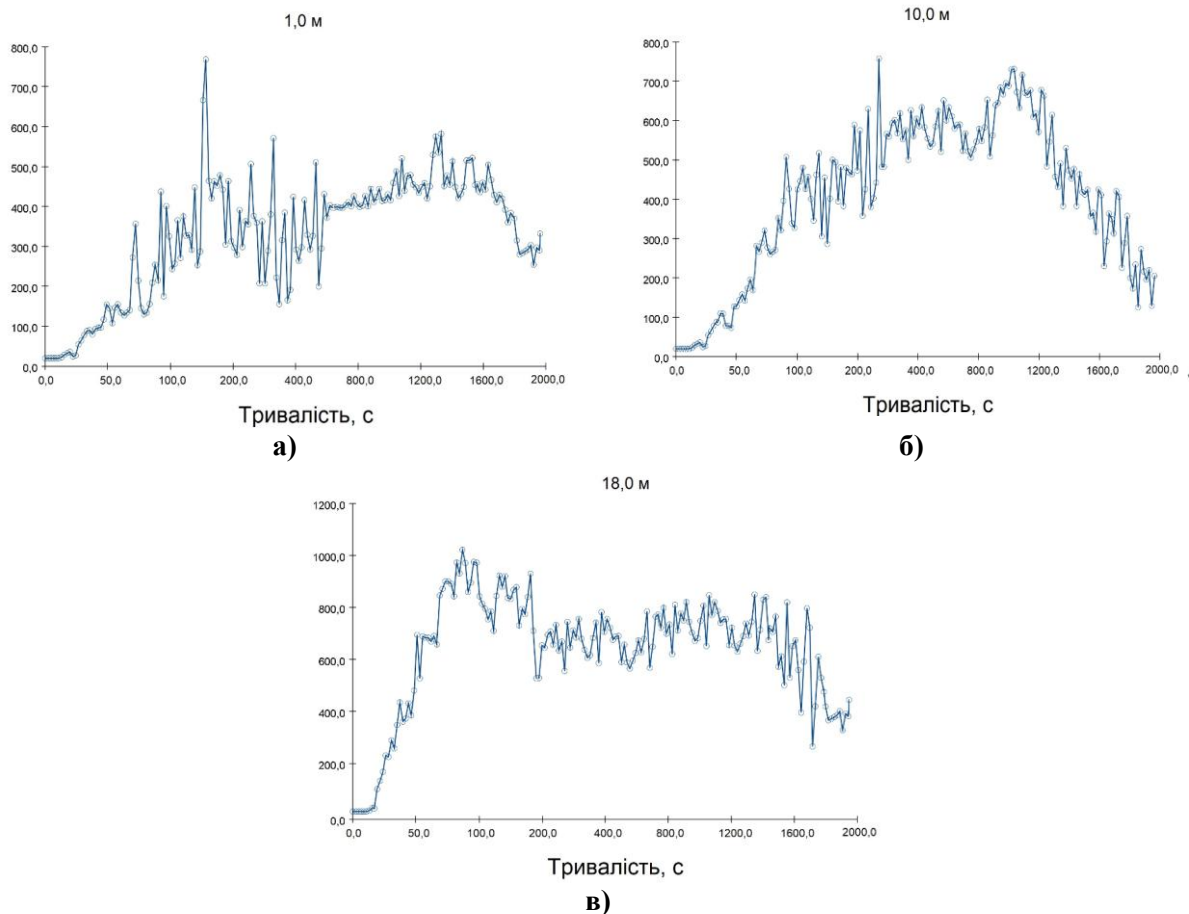


Рис. 4. Зміни температури в захисній конструкції під час горіння трансформатора за даними датчика температури, коли у захисній споруді відсутня автоматична система пожежогасіння, що встановлено на висотах: а – 1 м; б – 10 м; в – 18 м

На рис. 5 показано зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчиків температури, що встановлено на висоті 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді відсутня автоматична система пожежогасіння.

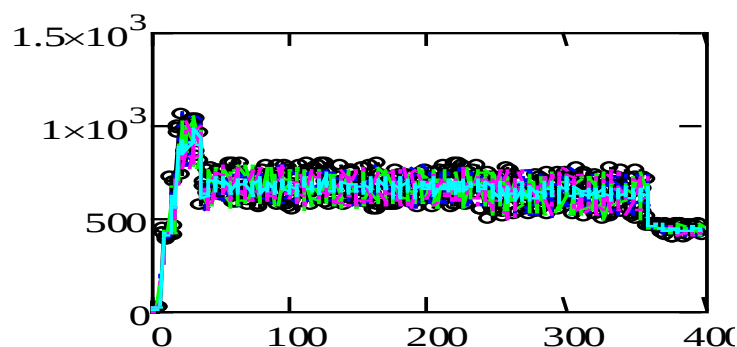


Рис. 5. Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчиків температури, що встановлено на висоті 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді відсутня автоматична система пожежогасіння

Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рис. 6.

Таким чином отримані результати свідчать, що дослідження на початковому етапі мітять викидів та квазівикидів, тому такими результати можна знехтувати під час подальшого їх оброблення.

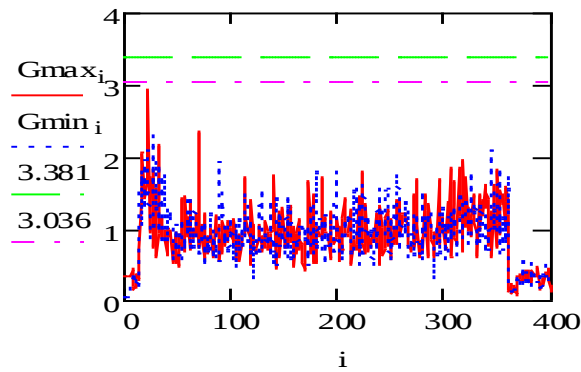


Рис. 6. Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса

На рис. 7. показано зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчика температури, що встановлено на висотах 1 м, 10 м та 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді наявна автоматична система пожежогасіння.

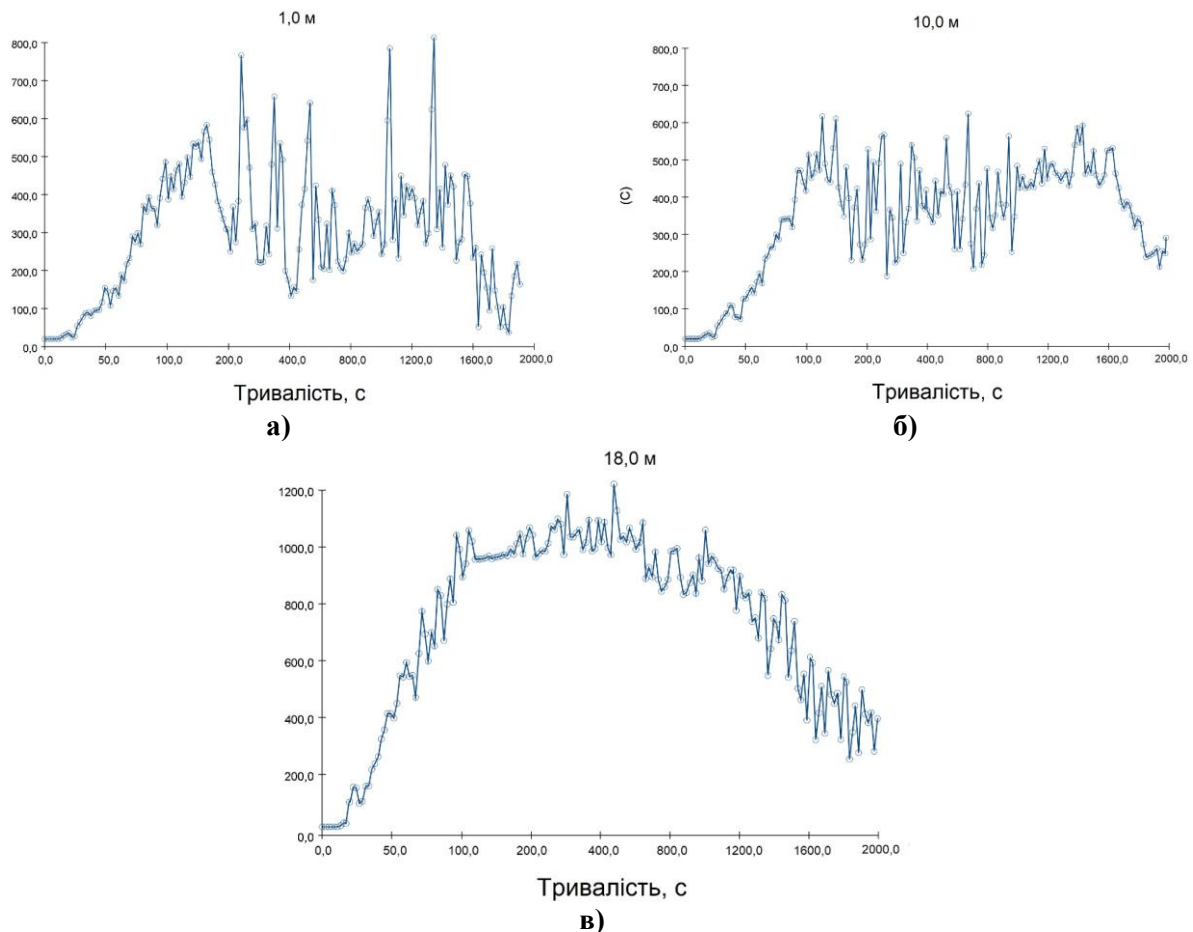


Рис. 7. Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчика температури, коли у захисній споруді наявна автоматична система пожежогасіння, що встановлено на висотах: а – 1 м; б – 10 м; в – 18 м

За даними графіками аналогічна ситуація щодо найбільших значень температур на датчику, який розташований на відмітці 18 м від рівня підлоги захисної споруди. На рис. 8. показано зміни температури в захисній споруді під час горін-

ня автотрансформатору за даними датчиків температури, що встановлено на висоті 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді наявна автоматична система пожежогашіння.

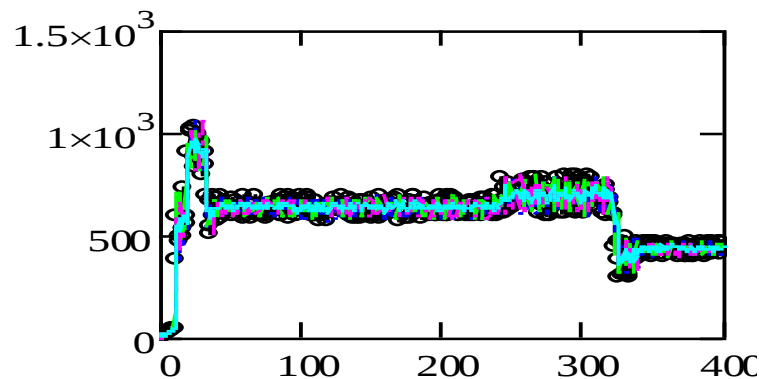


Рис. 8. Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчиків температури, що встановлено на висоті 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді наявна автоматична система пожежогашіння

Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рис. 9.

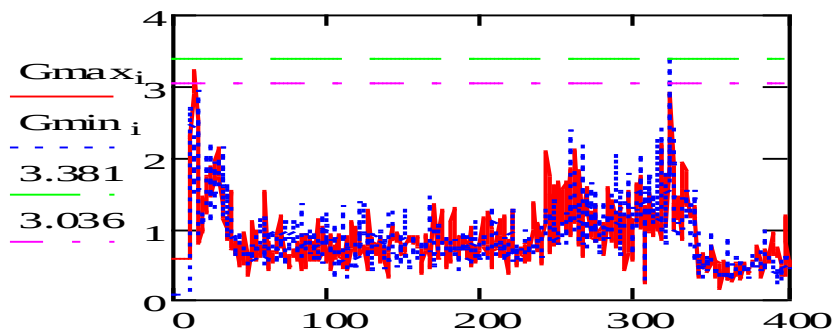


Рис. 9. Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса

У експериментальному дослідженні із наявністю у захисній конструкції автоматичної системи пожежогашіння спостерігається певне зниження температури після 200 секунди дослідження, що пояснюється охолодження водяними потоками будівельних конструкцій захисної конструкції. Тому для подальшого обґрунтування температурного режиму під час пожежі на трансформаторах, які розташовані у захисних конструкції слід прийняти умову найбільш жорсткого впливу температури на будівельні конструкції, а саме коли в приміщенні захисної конструкції відсутня автоматична система пожежогашіння та брати до уваги лише покази датчиків температури, які розташовані на рівні 18 м від рівня підлоги захисної конструкції.

На рис. 10 наведено усереднену температурну криву отриману за результатами проведеного дослідження із показів датчиків термопар, які розташовані на рівні 18 м від рівня підлоги захисної конструкції де влаштовано трансформатор для випадку, коли приміщення захисної конструкції не оснащено автоматичною системою пожежогашіння, а також температурна крива пожежі у вище визначених умовах, яка отримана розрахунковим методом, у порівнянні із стандартизованими температурними кривими для вуглеводневої пожежі та стандартного температурного режиму пожежі.

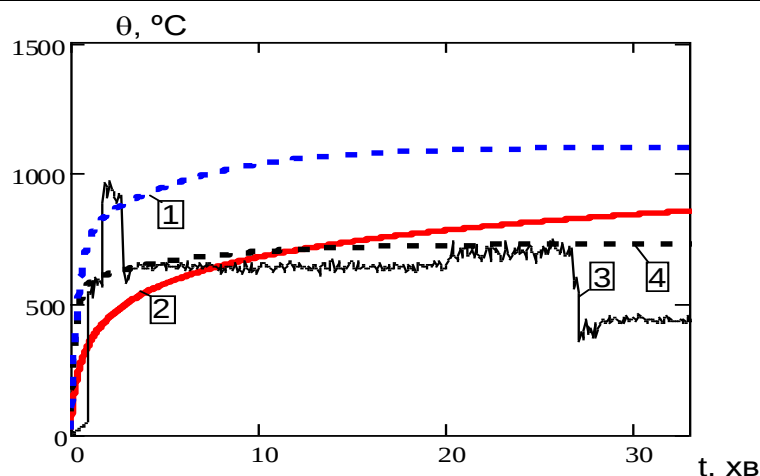


Рис. 10. Температурні криві режимів пожежі: 1 – вуглеводневий температурний режим пожежі; 2 – стандартний температурний режим пожежі; 3 – температурна крива режиму пожежі, отримана розрахунковим методом; 4 – модифікований вуглеводневий температурний режим пожежі

Вуглеводневий температурний режим пожежі:

$$\theta_p(t) = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + \theta_0, \quad (1)$$

де t – час стандартного вогневого випробування, с; θ_0 – початкова температура середовища, °C; $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$; $\theta_p(t)$ – температура у вогневій камері установки для визначення меж.

Стандартний температурний режим пожежі:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t/60 + 1) + \theta_0. \quad (2)$$

Модифікований вуглеводневий температурний режим пожежі під час горіння трансформатора, який розташований у захисній конструкції:

$$\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675e^{-2,5t}) + \theta_0. \quad (3)$$

Температурний режим описується залежністю:

$$\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675e^{-2,5t}) + \theta_0. \quad (4)$$

За результатами усередненої температурної кривої режиму пожежі, що отримана розрахунковим методом можна відмітити зниження температури горіння після 30 хв пожежі, що межу може бути пояснено вигоранням пожежного навантаження та можна використати для обґрунтування нормованого класу вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій захисних конструкцій, в яких встановлено трансформатори та із урахуванням коефіцієнту запасу 1,2 має становити не менше ніж REI 45.

7. Обговорення результатів щодо обґрунтування температурного режиму під час пожежі на трансформаторі

Отримані результати чисельного моделювання температурного режиму під час пожежі трансформатора, розміщеного в захисній споруді, свідчать про суттєвий вплив на теплові характеристики таких чинників, як наявність (або відсут-

ність) автоматичної системи пожежогасіння, а також висота розташування точки вимірювання температури. Аналіз показів термопар на різних рівнях (1 м, 10 м, 18 м) дозволив встановити, що найвищі значення температур фіксуються у верхній частині приміщення, що відповідає фізичній природі руху гарячих газів і накопичення теплового потоку під стелею. Саме тому для подальших розрахунків та порівнянь обґрунтовано обрано рівень 18 м як репрезентативний для оцінювання максимальної термічної дії на огорожувальні конструкції.

Порівняльний аналіз температурних кривих для сценаріїв із наявністю та відсутністю автоматичної системи пожежогасіння показав, що ефективність гасіння проявляється вже після 180 секунди від початку горіння, у цей момент спостерігається стабільне зниження температури. Це свідчить про значний вплив систем активного протипожежного захисту на обмеження теплового навантаження на конструкції споруди. Проте для цілей нормування класу вогнестійкості прийнято розглядати найгірший сценарій без дії системи пожежогасіння, що відповідає принципу проектування за критичними умовами.

У ході моделювання виявлено, що характер розвитку пожежі в захисній споруді для трансформатора суттєво відрізняється від стандартного та вуглеводневого температурних режимів. Порівняння модифікованої температурної кривої, запропонованої авторами, з нормативними режимами (вуглеводневим і стандартним) показало, що вона більш адекватно відображає реальні умови пожежі у трансформаторних приміщеннях захисних споруд.

Отримана середня крива температурного режиму дозволила встановити граничні температурні умови для оцінювання вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій захисних споруд для трансформаторів.

Отже, результати дослідження мають як практичне, так і методологічне значення. Запропонований модифікований вуглеводневий температурний режим може бути використаний для проектування та розрахунку вогнестійкості конструкцій трансформаторних приміщень в захисних спорудах, а також для удосконалення національних нормативних документів у частині визначення розрахункових температурних режимів пожежі у спеціальних захисних спорудах.

8. Висновки

1. У роботі виконано обґрунтування температурного режиму пожежі на трансформаторах, розташованих у захисних конструкціях. Порівняння отриманого температурного режиму з чинними стандартизованими температурними режимами (стандартним та вуглеводневим) показало, що існуючі вимоги формують суттєво жорсткіший тепловий вплив. Зокрема, згідно з нормативами, температура може досягати понад 1100–1200 °C протягом перших 10–15 хвилин, тоді як розрахункові значення для реального розвитку пожежі трансформаторного мастила в замкнутому просторі є нижчими на 15–25 % у початковий період горіння. Встановлено, що замкненість об'єму та обмежений притік кисню знижують інтенсивність горіння і швидкість екзотермічних реакцій, що впливає на фактичну формулу температурного режиму пожежі.

2. Обґрунтовано сценарій виникнення та розвитку пожежі для трансформаторів у захисних конструкціях, що дозволило сформулювати аргументований підхід до визначення параметричного температурного режиму пожежі. На основі аналізу тепловиділення мастила, умов вентиляції та геометрії споруди отримано модифікований вуглеводневий температурний режим, який краще відповідає реальним

умовам. Розраховану криву характеризує швидший початковий приріст температури (приблизно до 900 °C–1000 °C).

Отримані результати ґрунтуються на моделі із визначеними геометричними параметрами приміщення та розмірах прорізів в його огорожувальних конструкціях. Модель не враховує можливе руйнування захисної споруди трансформатора. Це може призвести до відхилень між розрахунковими та реальними температурними режимами.

Запропонований підхід дозволяє коректніше оцінювати вогнестійкість конструкцій захисних споруд трансформаторів, уникати надмірного завищення вимог до матеріалів та забезпечувати підвищену інженерну надійність з урахуванням реальних сценаріїв пожеж.

Література

1. Nekora V., Sidnei S., Shnal T., Nekora O., Dankevych I., Pozdieiev S. Determination of Features of Composite Steel and Concrete Slab Behavior under Fire Condition / Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 6. № 7(114). P. 59–67. doi: 10.15587/1729-4061.2021.246805
2. Novgorodchenko A., Pozdeev S., Fedchenko S. Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 1. № 1(133). P. 52–61. doi: 10.15587/1729-4061.2025.320431
3. Shnal T., Pozdieiev S., Yakovchuk R., Nekora O. Development of a Mathematical Model of Fire Spreading in a Three-Storey Building Under Full-Scale Fire-Response Tests. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 100 LNCE. P. 419–428. doi: 10.32447/20786662.36.2020.14
4. EN 1992-1-2:2023 Eurocode 2 – Design of concrete structures – Part 1-2: Structural fire design. European Committee for Standardization, 2023. URL: https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-12/BD_EN_1992-1-2_rev2.pdf
5. Zubkova M., Boschetti L., Abatzoglou J., Giglio L. FireRegions as Environmental Niches: A New Paradigm to Define Potential Fire Regimes in Africa and Australia. Journal of Geophysical Research. Biogeosciences. 2022. Vol. 127. Art.: e2021JG006694. doi: 10.1029/2021jg006694
6. 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. Vol. 1. № 79. P. 36–44. doi: 10.33042/2522-1809-2021-4-164-158-165
7. Perehin A., Nuianzin O., Zaika N., Vedula S. Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. The Scientific Heritage. 2021. Vol. 78(1). P. 37–43. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21405>
8. ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. – Київ: Мінрегіон України, 2021. 47 с. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074797473579927547?doc_type=2
9. Palchykov R., Nizhnyk V., Mykhailov V., Linchevskiy Y., Loik V., Lozynskiy R., Sukach R., Voytovych D., Peleshko M., Myroshkin V. Application of Time/Temperature Fire Curves for the Estimation of Fire Resistance of Transformer within Protective Structures. Metallurgical & materials engineering. 2025. Vol. 31(4). P. 34–39. doi: 10.63278/1393
10. Іллюченко П., Ніжник В., Нікулін О. Методика експериментальних дос-

ліджень та обґрунтування параметрів теплообмінної системи для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2023. № 1(15). С. 116–127. URL: <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/view/201/131>

11. Ballo Y., Yakovchuk R., Kovalchuk V., Nizhnyk V., Veselivskyi R. Investigation of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading by vertical building structures of high-rise buildings. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2684. Art.: 030005. doi: 10.1063/5.0119998

R. Palchykov, Graduate Student
Institute for Scientific Research on Civil Protection
of the National University of Civil Protection of Ukraine, Kyiv, Ukraine

JUSTIFICATION OF PARAMETRIC TEMPERATURE REGIME IN TRANSFORMER PROTECTIVE STRUCTURES

The research results demonstrate that under conditions of Russian aggression, the implementation of modern approaches to limiting the spread of fire on transformer equipment is one of the priority tasks of protecting the country's economy and national security. A calculation scenario for studying the temperature regime during a fire on a transformer located in a protective structure was selected, and was conducted using two scenarios for the occurrence and spread of fire. Calculation models were built for the study. The results of the theoretical study demonstrate temperature changes in the protective structure during transformer burning according to data from a temperature sensor installed at heights of 1 m, 10 m and 18 m above the place of combustion, when the protective structure does not have an automatic fire extinguishing system and in the case when the protective structure has an automatic fire extinguishing system. The results obtained showed that with the presence of an automatic fire extinguishing system in the protective structure, a certain decrease in temperature is observed after the two hundredth second of the study, which is explained by the cooling of the building structures of the protective structure by water flows. To substantiate the temperature regime during a transformer fire, the conditions of the greatest impact of temperature on building structures were assumed. Statistical processing of the research results was carried out. The results of a study on the justification of a modified temperature regime during a fire on transformers located inside protective structures are presented, which is advisable to use in the future to assess the fire resistance class of building structures of such protective structures and establish a standardized time during which building structures of protective structures must withstand the effects of a modified temperature regime. Suggestions are provided for further research in this direction.

Keywords: fire resistance, fire resistance limit, fire resistance class, temperature regime, transformer, critical infrastructure

References

1. Nekora, V., Sidnei, S., Shnal, T., Nekora, O., Dankevych, I., Pozdieiev, S. (2021). Determination of features of composite steel and concrete slab behavior under fire condition. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 6(7(114)), 59–67. doi: 10.15587/1729-4061.2021.246805
2. Novgorodchenko, A., Pozdeev, S., Fedchenko, S. (2025). Determining the behavior of a glass panel under heating conditions during a fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(1(133)), 52–61. doi: 10.15587/1729-4061.2025.320431
3. Shnal, T., Pozdieiev, S., Yakovchuk, R., Nekora, O. (2021). Development of a mathematical model of fire spreading in a three-storey building under full-scale fire-response tests. Lecture Notes in Civil Engineering, 100, 419–428. doi: 10.32447/20786662.36.2020.14
4. European Committee for Standardization. (2023). EN 1992-1-2:2023 Eurocode 2

– Design of concrete structures – Part 1-2: Structural fire design. Available at: https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-12/BD_EN_1992-1-2_rev2.pdf

5. Zubkova, M., Boschetti, L., Abatzoglou, J. T., Giglio, L. (2022). FireRegions as Environmental Niches: A New Paradigm to Define Potential Fire Regimes in Africa and Australia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127, e2021JG006694. doi: 10.1029/2021jg006694

6. Klymas, R., Nizhnyk, V., Nekora, O., Nekora, V., Stylyk, I. (2021). Justification of minimum parameters of gravel backfill of the oil receiver of the transformer substation. *The Scientific Heritage*, 1(79), 36–44. doi: 10.33042/2522-1809-2021-4-164-158-165

7. Perehin, A., Nuianzin, O., Zaika, N., Vedula, S. (2021). Technique for creating the prototype of a compact fire plant for tests to determine the fire resistance of reinforced concrete structures. *The Scientific Heritage*, 78(1), 37–43. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21405>

8. Minrehion Ukrainy. (2021). DBN V.1.2-7:2021. Osnovni vymohy do budivel i sporud. Pozhezhna bezpeka. Kyiv. Available at: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074797473579927547?doc_type=2

9. Palchykov, R., Nizhnyk, V., Mykhailov, V., Linchevskyi, Y., Loik, V., Lozynskyi, R., Sukach, R., Voytovych, D., Peleshko, M., Myroshkin, V. (2025). Application of time/temperature fire curves for the estimation of fire resistance of transformer within protective structures. *Metallurgical & Materials Engineering*, 31(4), 34–39. doi: 10.63278/1393

10. Illiuchenko, P., Nizhnyk, V., Nikulin, O. (2023). 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. *Scientific bulletin: Civil protection and fire safety*, 1(15), 116–127. Available at: <https://nvcz.undicz.org.ua/index.php/nvcz/article/view/201/131>

11. Ballo, Y., Yakovchuk, R., Kovalchuk, V., Nizhnyk, V., Veselivskyi, R. (2023). Investigation of the fire-preventing eaves effectiveness to prevent the fire spreading by vertical building structures of high-rise buildings, *AIP Conference Proceedings*, 2684, 030005. doi: 10.1063/5.0119998

Надійшла до редколегії: 11.09.2025

Прийнята до друку: 12.10.2025