

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Пальчиков Роман Володимирович**

УДК 614.841.3:621.314

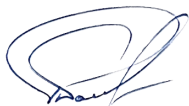
**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ НА**  
**АВТОТРАНСФОРМАТОРАХ, ЩО ВСТАНОВЛЮЮТЬСЯ В ЗАХИСНИХ**  
**СПОРУДАХ**

261 – пожежна безпека

26 – цивільна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Р.В. Пальчиков

Науковий керівник:

Ніжник Вадим Васильович, доктор технічних наук, професор

Черкаси 2026

## АНОТАЦІЯ

*Пальчиков Р.В.* Обґрунтування температурного режиму пожежі на автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 261 – Пожежна безпека. – Національний університет цивільного захисту України. Державна служба України з надзвичайних ситуацій, Черкаси, 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічного завдання у сфері пожежної безпеки - встановлення 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.

У вступі дисертаційної роботи здійснено обґрунтування актуальності теми, приведені статистичні дані про пожежі в трансформаторах під час воєнних обстрілів їх агресором, її зв'язок із науковими програмами. Сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, визначено наукову новизну, указано практичну значущість отриманих результатів та наведено інформацію про публікації та апробацію отриманих результатів із вказанням особистого внеску здобувача до кожної роботи.

У першому розділі наведено результати аналізу статистичних даних про пожежі та показано наявну тенденцію зростання кількості пожеж на автотрансформаторах. Показано результати аналізу чинних нормативних вимог до будівельних конструкцій захисних споруд трансформаторів, а також сучасного розвитку існуючих методів щодо оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій, зокрема у частині температурних режимів, які імітують вогневі впливи на такі конструкції. Показано, що вплив на будівельні конструкції температурного режиму вуглеводневої пожежі є досить жорстким режимом теплового впливу, особливо якщо врахувати фактично наявність замкнутого простору із обмеженим притоком

свіжого повітря (окисника реакції горіння), що негативно впливає на економічній складовій реалізації проектів будівництва захисних споруд, в яких розташовують автотрансформатори. Наведені результати аналізу типових конструктивних рішень захисних споруд трансформаторів та зосереджено увагу на такому параметру, як коефіцієнт прорізу у зовнішній огорожувальній конструкції значення якого становить 0,3 %, що теоретично має вплив на розвиток пожежі та її температурний режим оскільки обмежує доступ кисню у зону горіння

Визначено, що у працях вчених, направлених на запобігання виникненню пожеж та їх гасіння в електроустановках, зокрема на маслонаповнених трансформаторах, а також, які займалися питаннями дослідження температурних режимів пожеж в різних умовах, недостатньо досліджені процеси зміни температури під час пожежі на автотрансформаторах, що розташовані в захисних спорудах.

Визначено, що для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для трансформатора доцільно використовувати параметричну температуру реальної пожежі, що дозволить врахувати найбільш важливі параметри, які впливають на розвиток пожежі у таких спорудах, зокрема: пожежне навантаження, оснащеність системами протипожежного захисту, наявність прорізів для доступу окисника для підтримання умов горіння тощо. Показана актуальність роботи її мета та визначено перелік наукових задач вирішення яких дозволить досягнути поставленої мети.

У другому розділі наведена математична модель із використанням, якої запропоновано провести теоретичні дослідження процесів теплообміну під час пожежі в захисній споруді для автотрансформатора та провести обґрунтування параметричного температурного режиму пожежі у захисній споруді трансформатора. Наведено результати теоретичних досліджень щодо обґрунтування параметричного температурного режиму пожежі у захисній споруді трансформатора. Показано, що найбільші значення температури отримані на рівні висоти 18 м від рівня підлоги захисної споруди трансформатора, тому для подальшого дослідження температурного режиму пожежі взяті покази

температурних датчиків, які розміщені на висоті 18 м від рівня підлоги захисної споруди трансформатора. Для порівняння між собою отриманих даних по кожному із окремих датчиків використано критерій Грабса, за допомогою якого визначено покази, які були викидами і квазівикидами із загальної вибірки кожного окремого моменту часу, та які під час подальшого оброблення даних не використовувалися.

В дослідженні із наявністю у захисній споруді автоматичної водяної системи пожежогасіння спостерігалось зниження температури після 200 секунди дослідження, що пояснюється охолодження водяними потоками будівельних конструкцій захисної споруди. Тому для подальшого обґрунтування температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторах, які розташовані у захисних спорудах слід прийняти умову найбільш жорсткого впливу температури на будівельні конструкції, а саме коли в приміщенні захисної споруди відсутня автоматична система пожежогасіння.

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

У третьому розділі обґрунтовано вимоги до програми та методики експериментальних досліджень, зокрема шляхом застосування теорії фізичного моделювання або теорії подібності обґрунтовано зменшені параметри макету споруди для проведення експериментальних досліджень. Встановлено, що при збереженні критерію Фруде у фізичному моделюванні можливо адекватно відтворити теплогазообмінні процеси пожежі в приміщеннях з різними геометричними масштабами, що забезпечує коректність екстраполяції під час планування експериментального дослідження. При цьому, масштаб моделі приймаємо з коефіцієнтом 0,23. Матеріал огорожувальних конструкцій моделі, залізобетонні стіни та покриття. Площа прорізів у зовнішніх огорожувальних

конструкціях повинна становити  $0,023 \text{ м}^2$ , при цьому отвори створюємо у верхній частині моделі. Тепловиділення моделі масштабується відносно об'єкту за рівнянням  $Q_m=0,053Q_p$ . Часові характеристики скорочуються відповідно до співвідношення  $t_m=0,497t_p$ . У програмі та методиці експериментального дослідження обґрунтовано перелік обладнання необхідного для проведення експериментального дослідження, вимоги до вогнища пожежі, що імітує теплове навантаження від пожежі в захисних спорудах автотрансформаторів, необхідний перелік засобів вимірювальної техніки, виписана послідовність, порядок та вимоги щодо проведення експериментального дослідження, встановлені вимоги до аналізування та оцінювання результатів експериментального дослідження, а також вимоги щодо безпеки праці під час проведення експериментального дослідження.

Приведені результати трьох експериментальних досліджень та результати їх обробки. Показано, що отримані дані температур не заперечують нуль гіпотезі, а їх розбіжність можна вважати не суттєвою. Таким чином дані, що отримані за результатами експериментального дослідження, є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого із трьох експериментальних досліджень.

Наведено результати перевірки математичного моделювання із результатами експериментального дослідження та показано, що результати математичного моделювання є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 35 % та  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно. Показано, що отримані моделі є адекватними.

Вперше побудовано модифікований температурний режим під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора, який виражається залежністю:  $\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675e^{-2,5t}) + \theta_0$ , що враховує реальний характер розвитку пожежі в умовах обмеженої подачі окисника, великий внутрішній об'єм споруди та специфічні параметри пожежного навантаження трансформаторного масла.

У четвертому розділі розроблено пропозиції щодо вдосконалення вимог до захисних споруд автотрансформаторів в частині вогнестійкості.

Показана економічна ефективність використання запропонованого параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для оцінки вогнестійкості конструкцій захисної споруди автотрансформатора. Економічна ефективність запропонованого підходу проведемо шляхом порівняння затрат на виготовлення будівельної конструкцію, яка забезпечить клас вогнестійкості REI 90-НС за температурним режимом вуглеводневої пожежі із затратами на виготовлення будівельної конструкцію, яка забезпечить клас вогнестійкості REI 90 за запропонованим параметричним температурним режимом пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі).

Для оцінки вогнестійкості конструкцій розроблена методика оцінки класу вогнестійкості в умовах впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі та запропонованого параметричного температурного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі).

Розроблена методика базується на стандартах, гармонізованих із відповідною методичною та нормативною базою Європейського союзу, а також узгоджується із результатами досліджень вітчизняних та закордонних авторів, які апробовані, обговорені та визнані науковою спільнотою і входять у основну базу літературних посилань та цитування фахівцями даної галузі.

Так встановлено, що економічна ефективність використання запропонованого параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для оцінки вогнестійкості конструкцій захисної споруди автотрансформатора, як мінімум, за такими показниками будівельних конструкцій, як: товщина плити, товщина вогнезахисного шару бетону та товщина вогнезахисту який у порівнянні із чинним підходом дає можливість досягти економічного ефекту в 2 рази.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розкритті закономірностей зміни температури під час пожежі на захисній споруді для автотрансформатора, як наукового підґрунтя щодо удосконалення нормативної бази щодо оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій захисної споруди для автотрансформатора.

При цьому уперше:

- розроблено математичну модель тепломасопереносу під час пожежі у захисній споруді автотрансформатора, що відрізняється від існуючих урахуванням конструктивних особливостей приміщення, характеристик пожежного навантаження та параметрів прорізів у зовнішніх стінах;

- встановлено залежність зміни температурного режиму під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора з урахуванням конструктивних особливостей приміщення, властивостей пожежного навантаження та параметрів прорізів у зовнішніх стінах;

- розроблено методику експериментального дослідження температурних режимів у захисній споруді автотрансформатора, що забезпечує коректне масштабування результатів фізичного моделювання на основі законів подібності. Встановлено співвідношення для перерахунку параметрів:  $Q_m=0,053Q_p$  – для тепловиділення та  $t_m=0,497t_p$  – для часових характеристик, що підвищує достовірність прогнозування температурних процесів у реальних умовах.

Набув подальшого розвитку:

- метод оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів за рахунок реалізації запропонованого параметричного температурного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі).

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність полягає у застосуванні результатів роботи під час проектування й будівництва нових захисних споруд для автотрансформаторів із врахуванням модифікованого температурного режиму, що дозволить приблизно в 2 рази зменшити витрати на вогнезахисні матеріали для будівельних конструкцій захисних споруд, в яких встановлені автотрансформатори; запропонований модифікований температурний режим вуглеводневої пожежі для оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів може бути в перспективі впроваджено шляхом розроблення зміни до «Постанови Кабінету Міністрів

України від 26 квітня 2024 року № 471 «Деякі питання інженерного захисту критичної інфраструктури».

Результати проведених досліджень впроваджено (додаток Б) у практичну діяльність Міністерства розвитку громад та територій України, а також Конфедерації будівельників України та ТОВ «Украгроіндустрія», у частині використання запропонованого модифікованого температурного режиму вуглеводневої пожежі під час проектування вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів. Результати дисертаційних досліджень також впроваджені в освітній процес кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України. Результати дисертаційної роботи можливо та доцільно використовувати при плануванні та проведенні випробувань на вогнестійкість огорожувальних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів.

Ключові слова: пожежна безпека, пожежна небезпека, протипожежний захист, пожежа, вогнестійкість, межа вогнестійкості, клас вогнестійкості, температурний режим, трансформатор, об'єкти критичної інфраструктури, математична модель.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Публікації у наукових фахових виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази Scopus

1. **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. ISSN: 2812-9105 (online). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317332>.

*Особистий внесок – здобувач здійснив вибір сценарію дослідження, провів аналітичні дослідження, сформував висновки та пропозиції.*

### Публікації у наукових фахових виданнях

2. **Пальчиков Р.**, Коваль Р. Аналіз пожежної безпеки трансформаторів на основі масивів статистичних даних. *Науковий збірник Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (20). Київ: 2025. С. 73-81. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.73-81>.

*Особистий внесок – здобувач здійснив систематизацію та опрацювання масивів статистичної інформації щодо пожеж, які виникали на трансформаторах, проаналізував динаміку змін частоти пожеж за останні роки, визначив найбільш поширені причини займання та фактори, що впливають на поширення пожежі, побудував статистичні моделі оцінки небезпеки, що дозволяють прогнозувати ймовірність виникнення пожеж залежно від групи факторів ризику.*

3. **Пальчиков Р.** Обґрунтування параметричного температурного режиму в захисних спорудах трансформаторів. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»* ISSN-2524-0226, №2 (42), 2025 С. 69-82. <https://doi.10.52363/2524-0226-2025-42-5>.

*Особистий внесок – є одноосібною роботою.*

4. **Пальчиков Р.**, Ніжник В. Дослідження температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора. *Комунальне господарство міст*. Том 6. Випуск 194 (2025): Серія: Технічні науки та архітектура. С. 347-352.

*Особистий внесок – здобувач здійснив аналіз температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора, розглянув вплив різних джерел тепла та матеріалів конструкції на формування температурних полів, встановив закономірності зміни температури у часі та просторовому розподілі, запропонував методiku оцінки безпечного часу перебування персоналу в споруді.*

### **Публікації в інших виданнях**

5. Skorobahatko T., Nizhnyk V., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D, Kovalyshyn B., **Palchykov R.**, Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. *AD ALTA – Journal of Interdisciplinary Research*. 2024/ Vol. 14(1). P. 245-249. ISSN: 2464-6733 (online), **Web of Science**.

*Особистий внесок – здобувач здійснив розгляд застосування стандартизованих температурних режимів при оцінюванні в сучасних умовах класів вогнестійкості будівельних захисних конструкцій, в яких розміщуються трансформатори, проаналізував сучасний стан щодо визначення температурного впливу пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості огорожувальних захисних конструкцій, в яких розташовують трансформатори, показав необґрунтованість існуючого підходу щодо використання температурного режиму вуглеводневої пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості огорожувальних захисних конструкцій, в яких розташовують трансформатори.*

### **Публікації, які засвідчують апробацію дисертації**

6. В. Ніжник, Я. Балло, В. Михайлов, **Р. Пальчиков** Обґрунтування модифікованого вуглеводневого температурного режиму пожежі в трансформаторі, захищеного огорожувальними конструкціями. Екологічна

безпека в умовах війни : збірник тез доповідей V Міжнародної науковопрактичної конференції, м. Львів, 21 листопада 2024 року. Львів: ЛДУБЖД, 2024. 193-195 с.

7. **Пальчиков Р.В.**, Ніжник В.В. Аналіз температурного режиму пожежі в захисних конструкціях автотрансформаторів: проблематика та наукові підходи до оцінки вогнестійкості. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки» Київ: Київський інститут національної гвардії України, 2025. С. 423-424.

## ABSTRACT

Palchykov R. V. Substantiation of the fire temperature regime for autotransformers installed in protective structures. – Qualification scientific work as a manuscript.

The dissertation is submitted for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 261 – Fire Safety. – National University of Civil Protection of Ukraine of the State Emergency Service of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and technical problem in the field of fire safety, namely revealing the patterns of temperature variation during a fire in a protective structure housing an autotransformer, as a scientific basis for establishing a fire temperature regime for assessing the fire resistance class of building structures of such facilities.

In the introduction, the relevance of the topic is substantiated; statistical data on fires in transformers during military shelling by the aggressor are presented; and the link with scientific programs is demonstrated. The purpose, objectives, object and subject of the research are formulated; scientific novelty is defined; the practical significance of the results is indicated; and information on publications and approbation of the obtained results is provided, with the applicant's personal contribution to each work specified.

The first chapter presents the results of an analysis of statistical data on fires and demonstrates an existing upward trend in the number of fires involving autotransformers. The results of the analysis of current regulatory requirements for building structures of transformer protective structures are presented, as well as the modern development of

methods for assessing the fire resistance of building structures, in particular with regard to temperature regimes that simulate fire exposure. It is shown that the impact of a hydrocarbon fire temperature regime on building structures is a rather severe thermal exposure, especially considering the presence of an enclosed space with limited fresh air (oxidizer) supply, which negatively affects the economic feasibility of constructing protective structures housing autotransformers. The analysis of typical structural solutions for transformer protective structures is provided, with particular attention paid to the opening factor of the external enclosure, which amounts to 0.3%. This parameter theoretically influences fire development and its temperature regime, as it limits oxygen access to the combustion zone.

It is determined that, despite studies aimed at preventing and suppressing fires in electrical installations, including oil-filled transformers, and research into fire temperature regimes under various conditions, the processes of temperature change during fires involving autotransformers located in protective structures remain insufficiently investigated.

It is substantiated that, for assessing the fire resistance of building structures of protective structures for transformers, it is advisable to use the parametric temperature of a real fire, which makes it possible to account for the most important parameters influencing fire development in such structures, including fire load, provision with fire protection systems, and the presence of openings for oxidizer access to sustain combustion, etc. The relevance of the work, its purpose, and the set of scientific objectives required to achieve the stated goal are demonstrated.

The second chapter presents a mathematical model, which is proposed for theoretical studies of heat transfer processes during a fire in a protective structure for an autotransformer, and for substantiating a parametric fire temperature regime in a transformer protective structure. The results of theoretical studies substantiating the parametric fire temperature regime are provided. It is shown that the highest temperature values are obtained at a height of 18 m above the floor level of the transformer protective structure; therefore, readings from temperature sensors located at a height of 18 m were used for further analysis of the fire temperature regime. To compare the data obtained

from individual sensors, Grubbs' test was applied, which made it possible to identify readings that were outliers and quasi-outliers from the overall sample at each time point; such readings were excluded from further data processing.

In the study involving the presence of an automatic water fire suppression system in the protective structure, a temperature decrease was observed after 200 seconds, which is explained by cooling of the building structures by water flows. Therefore, for further substantiation of the fire temperature regime for autotransformers located in protective structures, the most severe thermal exposure condition should be adopted, namely the absence of an automatic fire suppression system in the protective structure.

Based on the averaged temperature curve of the fire regime obtained by computational methods, a decrease in combustion temperature after 30 minutes of fire is shown, which may be explained by burnout of the fire load. These results can be used to substantiate the standardized fire resistance class of enclosing building structures of protective structures in which autotransformers are installed, which, taking into account a safety factor of 1.2, should be not less than REI 45.

The third chapter substantiates the requirements for the program and methodology of experimental studies. In particular, using physical modeling theory and similarity theory, reduced parameters of a facility model for conducting experimental studies are justified. It is established that, while maintaining the Froude similarity criterion in physical modeling, it is possible to adequately reproduce thermo-gas exchange processes of fire in spaces with different geometric scales, which ensures correct extrapolation when planning experimental studies. The model scale coefficient is adopted as 0.23. The enclosure materials of the model are reinforced concrete walls and slabs. The total opening area in the external enclosures should be 0.023 m<sup>2</sup>, with openings provided in the upper part of the model. The model heat release rate is scaled relative to the prototype according to the equation  $Q_m = 0.053 Q_r$ . Time characteristics are reduced according to the ratio  $t_m = 0.497 t_r$ . The program and methodology substantiate the list of equipment required for conducting the experiment, requirements for the fire source simulating the thermal load of a fire in autotransformer protective structures, the necessary measuring instruments, the sequence and procedure for conducting the experiment, requirements for

analysis and evaluation of results, as well as occupational safety requirements during the experiment.

The results of three experimental studies and their processing are presented. It is shown that the obtained temperature data do not contradict the null hypothesis, and their discrepancy can be considered insignificant. Thus, the data obtained from the experimental studies are samples from the same general population, confirming the overall consistency of each of the three experiments.

The results of verifying the mathematical modeling against the experimental study are provided, showing that the modeling results are adequate, with a relative deviation of 35% and a root-mean-square deviation of 90 °C, respectively. It is shown that the developed models are adequate.

For the first time, a modified fire temperature regime for a fire in an autotransformer protective structure has been developed, expressed by a functional dependence that accounts for the real nature of fire development under limited oxidizer supply, the large internal volume of the structure, and specific parameters of transformer oil fire load.

The fourth chapter develops proposals for improving the requirements for autotransformer protective structures in terms of fire resistance.

The economic efficiency of using the proposed parametric fire regime (modified hydrocarbon regime) for assessing the fire resistance of structures of an autotransformer protective structure is demonstrated. The economic efficiency of the proposed approach is evaluated by comparing the costs of manufacturing a building structure that ensures fire resistance class REI 90-HC under a hydrocarbon fire temperature regime with the costs of manufacturing a building structure that ensures fire resistance class REI 90 under the proposed parametric fire temperature regime (modified hydrocarbon fire regime).

A methodology for assessing the fire resistance class of structures under the influence of the hydrocarbon fire temperature regime and the proposed parametric fire temperature regime (modified hydrocarbon fire regime) has been developed.

The developed methodology is based on standards harmonized with the relevant methodological and regulatory framework of the European Union and is consistent with

the results of studies by domestic and foreign authors, which have been approbated, discussed, and recognized by the scientific community and form the core literature base referenced and cited by specialists in this field.

It is established that the economic efficiency of using the proposed parametric fire regime (modified hydrocarbon regime) for assessing the fire resistance of structures of an autotransformer protective structure, at least for such structural parameters as slab thickness, thickness of the concrete fire-protective layer, and thickness of applied fire protection, enables a cost reduction by a factor of two compared to the current approach.

The scientific novelty of the obtained results lies in revealing the patterns of temperature variation during a fire in a protective structure for an autotransformer, as a scientific basis for improving the regulatory framework for assessing the fire resistance of enclosing structures of an autotransformer protective structure.

At the same time, for the first time:

- a mathematical model of heat and mass transfer during a fire in the protective enclosure of an autotransformer has been developed, which differs from existing ones by taking into account the structural features of the premises, the characteristics of the fire load, and the parameters of openings in the external walls;

- a relationship describing the variation of the temperature regime during a fire in the protective enclosure of an autotransformer has been established, considering the structural features of the premises, the properties of the fire load, and the parameters of openings in the external walls;

- a methodology for experimental investigation of temperature regimes in the protective enclosure of an autotransformer has been developed, ensuring correct scaling of physical modeling results based on similarity laws. Relationships have been established for recalculating parameters:  $Q_m = 0.053Q_p$  for heat release and  $t_m = 0.497t_p$  for time characteristics, which increases the reliability of predicting temperature processes under real conditions.

Further development has been achieved in:

- the method for assessing the fire resistance class of building structures of protective enclosures for autotransformers through the implementation of the proposed parametric temperature regime of fire (a modified hydrocarbon fire curve).

Practical significance. The practical value lies in applying the results in the design and construction of new protective structures for autotransformers with consideration of the modified temperature regime, which enables an approximately twofold reduction in expenditures on fire protection materials for building structures of protective structures in which autotransformers are installed. The proposed modified hydrocarbon fire temperature regime for assessing the fire resistance class of building structures of protective structures for autotransformers may, in the future, be implemented through amendments to the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 26, 2024, №. 471 “Certain issues of engineering protection of critical infrastructure”.

The research results have been implemented (Appendix B) in the practical activities of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, as well as the Confederation of Builders of Ukraine and LLC “Ukragroindustriia”, regarding the use of the proposed modified hydrocarbon fire temperature regime when designing the fire resistance of building structures of protective structures for autotransformers. The dissertation results have also been implemented in the educational process of the Department of State Supervision in the Field of Fire and Technogenic Safety at the National University of Civil Defence of Ukraine. The results of the dissertation can be appropriately used in planning and conducting fire resistance tests of enclosing structures of protective structures for autotransformers.

Keywords: fire safety, fire hazard, fire protection, fire, fire resistance, fire resistance limit, fire resistance class, temperature regime, transformer, critical infrastructure facilities, mathematical model.

## LIST OF PUBLICATIONS RELATED TO THE DISSERTATION

### Publications Indexed in the Scopus Database

1. **Palchykov R.**, Ballo Y., Nizhnyk V., Mykhailov V., Gavryliuk A., Loik V., Synelnikov O., Synelnikov S., Stepanenko V., Nuianzin O. Substantiating the parametric fire temperature regime during a fire in transformers placed inside protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (132)), 37–45. ISSN 2812-9105 (online). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317332>.

### Articles in National Scientific Journals

2. **Palchykov, R., Koval, R.** Analysis of transformer fire safety based on statistical data sets. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, № 2 (20). Kyiv, 2025, P. 73–81. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.73-81>.

3. **Palchykov, R.** Substantiation of the parametric fire temperature regime in transformer protective structures. *Problems of Emergency Situations: Collection of Scientific Papers*, ISSN 2524-0226, № 2 (42), 2025, P. 69–82. <https://doi.10.52363/2524-0226-2025-42-5>.

4. **Palchykov, R., Nizhnyk, V.** Investigation of the fire temperature regime in a protective structure for an autotransformer. *Municipal Economy of Cities*, Vol. 6, № 194 (2025), Series: Engineering Sciences and Architecture, P. 347-352.

### Publications in other publications

5. Skorobahatko T., Nizhnyk V., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D, Kovalyshyn B., **Palchykov R.**, Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. *AD ALTA – Journal of Interdisciplinary Research*. 2024/ Vol. 14(1). P. 245-249. ISSN: 2464-6733 (online).

### **Publications Confirming Approbation of the Dissertation Results**

6. Nizhnyk, V., Ballo, Y., Mykhailov, V., **Palchykov, R.** Substantiation of a modified hydrocarbon fire temperature regime in a transformer protected by enclosing structures. *Environmental Safety in Wartime Conditions: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*, Lviv, November 21, 2024. Lviv: Lviv State University of Life Safety, 2024, 193-195 p.

7. **Palchykov, R.**, Nizhnyk, V. Analysis of the fire temperature regime in protective structures of autotransformers: challenges and scientific approaches to fire resistance assessment. *Proceedings of the III Nationwide Scientific and Practical Conference “Current Issues of Ensuring State Security”*. Kyiv: Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine, 2025, pp. 423-424.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	21
ВСТУП.....	26
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ, ЩО ВСТАНОВЛЮЮТЬСЯ В ЗАХИСНИХ СПОРУДАХ .....	34
1.1 Статистика пожеж на автотрансформаторах .....	34
1.2 Аналіз вимог нормативних документів щодо захисту автотрансформаторів.....	42
1.2.1 Вимоги пожежної безпеки під час реалізації інтегрального захисту об'єктів критичної інфраструктури першого рівня.....	44
1.2.2 Вимоги пожежної безпеки під час реалізації інтегрального захисту об'єктів критичної інфраструктури другого рівня.....	44
1.2.3 Вимоги пожежної безпеки під час реалізації інтегрального захисту об'єктів критичної інфраструктури третього рівня.....	46
1.2.4 Загальні організаційно-технічні та конструктивні рекомендації з питань пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту під час реалізації інтегрального захисту критичної інфраструктури.....	50
1.3 Сучасний стан використання стандартизованих температурних режимів під час оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд.....	52
1.4 Аналіз типових рішень захисних споруд для автотрансформаторів .....	61
1.5 Висновки за першим розділом .....	69
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ НА АВТОТРАНСФОРМАТОРІ, ЩО РОЗТАШОВАНИЙ В ЗАХИСНІЙ СПОРУДІ.....	71
2.1 Математична модель для дослідження температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторі, який розміщено в захисній споруді .....	71
2.1.1 Обрання розрахункового сценарію.....	71
2.1.2 Опис математичної моделі.....	72
2.1.3 Математична модель, що враховує конструктивні особливості приміщення .....	82

2.1.4 Математична модель, що враховує пожежне навантаження .....	83
2.1.5 Математична модель, що враховує прорізи у щовнішніх стінах .....	84
2.2 Результати розрахунку температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторі, який розміщено в захисній споруді.....	85
2.3 Обґрунтування температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторах, що розташовані в захисних спорудах.....	94
2.4 Висновки за другим розділом.....	94
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. ВЕРИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ .....	97
3.1 Розроблення програми та методики експериментальних досліджень..	97
3.1.1 Обґрунтування зменшених параметрів макету споруди для експериментальних досліджень .....	97
3.1.2 Програма та методика експериментальних досліджень .....	104
3.2 Результати експериментальних досліджень .....	117
3.3 Висновки за третім розділом .....	123
РОЗДІЛ 4 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ВИМОГ ДО ЗАХИСНИХ СПОРУД АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ В ЧАСТИНІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ .....	124
4.1 Інженерний захист об'єктів критичної інфраструктури .....	124
4.2 Економічна ефективність використання запропонованого параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для оцінки вогнестійкості конструкцій захисної споруди автотрансформатора .....	131
4.3 Висновки за четвертим розділом .....	146
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	147
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації.....	163
ДОДАТОК Б Акти впровадження результатів дисертації.....	166

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ПОЗНАЧЕНЬ ТА ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ

ДСНС – Державна служба України з надзвичайних ситуацій;

ІНД ЦЗ НУЦЗ України – Інститут наукових досліджень з цивільного захисту  
Національного університету цивільного захисту України;

ЄС – Європейський Союз;

БПЛА – безпілотні літальні апарати;

REI – граничні стани будівельних конструкцій: R – несуча здатність, E –  
цілісність, I – теплоізолювальна здатність;

Г – група горючості;

НГ – негорючий матеріал;

РП – група поширення полум'я поверхнею матеріалу;

В – група займистості матеріалу;

Д – група димоутворювальної здатності матеріалу;

Т – група токсичності матеріалу;

Pr – критерій Прандтля;

Nu – критерій Нуссельта;

Re – число Рейнольдса;

ЗВТ - засоби вимірювальної техніки;

ТХА – термопара хром-алюмелева;

ASTM - Американське товариство з випробувань і матеріалів;

ДСТУ – держаний стандарт України;

ДБН – державні будівельні норми;

EN – європейський стандарт;

ISO – Міжнародна організація зі стандартизації;

ПУЕ – Правила налаштування електроустановок;

АТ – автотрансформатор;

СТР – стандартний температурний режим;

НС - температурний режим вуглеводневої пожежі

- $t$  – час вогневого випробування;
- $\tau$  – час стандартного випробування;
- $\tau_{max}$  – час досягнення максимальної середньооб'ємної температури;
- $\tau_l$  – тривалість пожежі;
- $\Theta$  або  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $T_0$  – початкова температура середовища,  $^{\circ}\text{C}$ ;
- $T_f^{st}(\tau)$  – температура у вогневій камері установки для визначення меж вогнестійкості конструкцій залежно від часу  $\tau$  стандартного випробування;
- $\lambda$  – теплопровідність,  $\text{Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C})$ ;
- $C_p$  – теплоємність,  $\text{кДж}/(\text{кг}^{\circ}\text{C})$ ;
- $a$  – коефіцієнт теплообміну,  $\text{Вт}/(\text{м}^2^{\circ}\text{C})$ ;
- $\alpha_e$  – коефіцієнт теплообміну від випромінювання,  $\text{Вт}/(\text{м}^2^{\circ}\text{C})$ ;
- $\alpha_k$  – коефіцієнт теплообміну конвекцією,  $\text{Вт}/(\text{м}^2^{\circ}\text{C})$ ;
- $\rho$  – густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $w$  – початкова вагова вологість;
- $C_B$  – коефіцієнт випромінювання поверхні;
- $C_s$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;
- $\varepsilon$  – ступень чорноти оточуючого середовища;
- $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана;
- $Q_P$  – додаткова теплота, яка витрачається на нагрівання та пароутворення вільної вологи у порах цементу;
- $r_t$  – питома теплота випаровування вологи;
- $q$  – густина теплового потоку,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
- $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;
- $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення;
- $F$  – площа поверхні;

$l$	– геометричний параметр поверхні;
$g$	– прискорення вільного падіння, $\text{м/с}^2$ ;
$Nu$	– число Нусельта;
$Gr$	– число Грасгофа;
$Pr$	– число Прандтля;
$Re$	– число Рейнольдса;
$Ga$	– число Галілея;
$\nabla$	– оператор Гамільтона;
$\Delta$	– оператор Лапласа;
$\psi$	– коефіцієнт опромінювання тіла;
$p$	– тиск;
$\mu$	– коефіцієнт динамічної в'язкості;
$\zeta$	– друга в'язкість;
$u$	– проекції швидкості на вісі $x, y, z$ , $\text{м/с}$ ;
$m_b^m$	– швидкість вигорання, $\text{кг/с}$ ;
$f_b$	– вектор зовнішньої сили (сили тяжіння);
$\tau_{ij}$	– вектор напруження в'язкості;
$q$	– параметр швидкості виділення тепла, $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ ;
$W$	– молекулярна маса газової суміші, моль;
$R$	– універсальна газова стала, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot ^\circ\text{C})$ ;
$\beta_m, \beta_p$	– коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;
$\eta$	– коефіцієнт повноти згорання;
$S_{xy}^2$	– дисперсія адекватності;
$S_y^2$	– дисперсія відтворюваності;
$S_{\max}$	– найбільше середньоквадратичне відхилення результатів випробувань;
$S_1^2, S_2^2$	– оцінки дисперсії експерименту і обчислювального експерименту;
$\delta x, \delta y, \delta z$	– крок просторової регулярної сітки вздовж осей координат;
$r_d$	– радіус краплини;

- $u_d$  – вектор швидкості краплини;  
 $C_D$  – коефіцієнт тертя;  
 $I$  – інтенсивність теплового випромінювання;  
 $\mathcal{Q}^l$  – тілесний кут, відповідний напрямку  $l$ ;  
 $V_{ijk}$  – об'єм комірки  $ijk$ ;  
 $A_m$  – площа поверхні комірки;  
 $n_m$  – одиничний нормальний вектор до поверхні комірки;  
 $\mu_d$  – косинус кута розсіювання  $\theta_d$ ;  
 $P_0(\theta_d)$  – фазова функція розсіювання одної краплини;  
 $S_1(\theta_d)$ ,  
 $S_2(\theta_d)$  – амплітуди розсіювання;  
 $Z$  – концентрація інертного газу, %;  
 $u, v, w$  – проекції швидкості газоповітряної суміші на осі координат, м/с;  
 $x, y, z$  – повздожня, вертикальна та поперечна координати, м;  
 $D_x, D_y, D_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії інертного газу в напрямку відповідних координат, м<sup>2</sup>/с;  
 $\gamma$  – коефіцієнт поглинання інертного газу стінками каналу, 1/с;  
 $h$  – висота, м;  
 $m$  – значення об'єму пожежного навантаження на один метр висоти кабелю;  
 $L$  – значення матеріалу ізоляції кабелів вертикального кабельного тунелю;  
 $S$  – значення площі поздовжнього перерізу вертикального кабельного тунелю;  
 $b$  – коефіцієнти регресії;  
 $L_{ep}$  – прогин, мм;  
 $b_{ep}$  – розрахункова висота перерізу конструкції, мм;  
 $E_{d,fi}$  – розрахунковий результат дії при пожежі;

- $E_s$  – значення модуля пружності арматури;
- $R_{d,fi}$  – розрахункова несуча здатність при пожежі;
- $\varepsilon_{c1,cd}$  – розрахункове значення відносних деформацій бетону при максимальних напруженнях стиску  $f_{cd}$ ;
- $\varepsilon_{ud}$  – значення відносних граничних деформацій видовження арматури;
- $f_{cd}$  – розрахункове значення напруженнях стиску;
- $f_{yd}$  – розрахункове значення міцності арматури на межі текучості;
- $\eta_{c(1)}$  – рівень відносних деформацій бетону найбільш стиснутого волокна перерізу плити;
- $\gamma_c$  – коефіцієнт, надійності для бетону;
- $a_{cc}$  – коефіцієнт, що враховує вплив на міцність бетону при стиску тривалості дій та несприятливих впливів, що викликані способом прикладання навантаження;
- $\Delta x$  – просторовий крок інтегрування;
- $\Delta t$  – часовий крок інтегрування.

## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми дослідження

Аналіз інформаційно-аналітичних матеріалів Міністерства енергетики України за останні п'ять років вказує, що кожного року близько 47 % пожеж виникає на підприємствах електричних мереж. За статистикою, половина пожеж в енергетичному секторі пов'язана саме з трансформаторним обладнанням (загалом виникло 963 пожежі, прями збитки від яких склали більше 32 млн гривень) [1-3]. В Україні функціонує 137 підстанцій, сумарна трансформаторна потужність яких сягає 78,6 тис. МВт. Як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його загорянням. Слід також зазначити, що трансформаторне обладнання в умовах російської агресії стало однією із пріоритетних цілей під час дистанційних бомбардувань території України. З метою захисту трансформаторного обладнання, яке є об'єктом критичної інфраструктури для життєдіяльності населення України, їх розміщують у захисних спорудах [4].

Трансформатори виконують ключову роль у з'єднанні потужностей генеруючих об'єктів з розподільчими мережами та споживачами. Саме тому такі об'єкти як трансформаторне обладнання стали пріоритетною ціллю з моменту повномасштабного вторгнення агресора на територію нашої держави. За час воєнного стану по трансформаторному обладнанню ворог наніс близько 600 ударів. На будь-якому трансформаторі, може міститися від 200 л до 60 000 л мінерального масла, що є горючою речовиною із густиною в діапазоні  $(0,80-0,89) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [5].

Згідно із [4] несучі конструкції каркасу та перекриття захисної споруди слід виконувати з класом вогнестійкості не нижче ніж REI 90 за умов впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі. Слід зазначити, що вплив на будівельні конструкції температурного режиму вуглеводневої пожежі є досить жорстким режимом теплового впливу, особливо якщо врахувати фактично наявність замкнутого простору із обмеженим притоком свіжого повітря (окисника реакції горіння), що негативно впливає на економічній складовій реалізації проектів будівництва захисних споруд, в яких розташовують автотрансформатори.

З урахуванням викладеного, ідеєю роботи є 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.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційну роботу виконано на перспективу розвитку перспективу реалізації Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року, схваленого розпорядженням Кабінету Міністрів України від «25» червня 2024 р. № 587-р., Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 13 серпня 2024 р. № 761-р та в продовження науково-дослідної роботи: «Наукове дослідження в частині обґрунтування параметричного температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторах класів АТ 750 кВ та АТ 330 кВ, що розміщені в захисних спорудах» за шифром «ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ - АВТОТРАНСФОРМАТОРА»).

**Метою роботи** є встановлення 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 поставлено та виконана наступні завдання:**

1) проаналізувати сучасний стан досліджень в області використання стандартизованих температурних режимів пожежі під час оцінювання класів вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд, в тому числі трансформаторів;

2) розробити математичні моделі тепломасопереносу при пожежі у захисній споруді для автотрансформатора, що дозволяють врахувати її конструктивні особливості та наявне пожежне навантаження на основі застосування чисельних методів комп'ютерної газогідродинаміки та обґрунтувати розрахункові сценарії;

3) виявити закономірності зміни температури під час пожежі у захисній споруді для автотрансформатора на основі обчислювальних експериментів температурних режимів пожежі на таких об'єктах;

4) розробити методику експериментальних досліджень і провести експериментальні дослідження температурного режиму у захисній споруді для автотрансформатора при врахуванні реального пожежного навантаження. Дослідити адекватність теоретичних даних за допомогою статистичних критеріїв достовірності;

5) розробити пропозиції до нормативно-правових актів щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних огорожувальних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів з використанням виявлених закономірностей зміни температури під час пожежі на таких об'єктах.

**Об'єкт дослідження** – вплив теплових процесів, які відбуваються під час пожежі на захисні споруди для автотрансформаторів.

**Предмет дослідження** – конструктивні параметри та параметри пожежного навантаження захисної споруди для автотрансформатора та закономірність зміни температури під час пожежі на таких об'єктах.

**Методи дослідження** В роботі використано методи досліджень, які включали: комплексний аналіз і узагальнення раніше виконаних робіт щодо дослідження температурних режимів пожежі; математичне моделювання із використанням систем диференціальних рівнянь Нав'є–Стокса для неперервних середовищ; методи кінцевих різниць за схемою «предиктор-коректор», кінцевих об'ємів для розв'язання диференціальних рівнянь; метод Ейлера для розв'язання системи рівнянь Нав'є–Стокса під час моделювання процесів зміни температури, метод наявності викидів та квазивикидів у результатах досліджень (метод Грабса); метод перевірки належності дисперсій результатів досліджень до однієї генеральної сукупності (метод Фішера); метод дихотомії для обґрунтування розміру розрахункової сітки комп'ютерних моделей, методи математичної статистики для оброблення результатів досліджень. Метод експериментальних досліджень згідно із розробленою програмою та методикою експериментальних

досліджень. Методи фізичного моделювання або методи подібності (методи масштабування).

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розкритті закономірностей зміни температури під час пожежі на захисній споруді для автотрансформатора, як наукового підґрунтя удосконалення нормативної бази щодо оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій захисної споруди для автотрансформатора.

**При цьому уперше:**

- розроблено математичну модель тепломасопереносу під час пожежі у захисній споруді автотрансформатора, що відрізняється від існуючих урахуванням конструктивних особливостей приміщення, характеристик пожежного навантаження та параметрів прорізів у зовнішніх стінах;

- встановлено залежність зміни температурного режиму під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора з урахуванням конструктивних особливостей приміщення, властивостей пожежного навантаження та параметрів прорізів у зовнішніх стінах;

- розроблено методику експериментального дослідження температурних режимів у захисній споруді автотрансформатора, що забезпечує коректне масштабування результатів фізичного моделювання на основі законів подібності. Встановлено співвідношення для перерахунку параметрів:  $Q_m=0,053Q_p$  – для тепловиділення та  $t_m=0,497t_p$  – для часових характеристик, що підвищує достовірність прогнозування температурних процесів у реальних умовах.

**Набув подальшого розвитку:**

- метод оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів за рахунок реалізації запропонованого параметричного температурного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі).

**Практичне значення отриманих результатів** Практична цінність полягає у застосуванні результатів роботи під час проектування й будівництва нових захисних споруд для автотрансформаторів із врахуванням модифікованого

температурного режиму, що дозволить приблизно в 2 рази зменшити витрати на вогнезахисні матеріали для будівельних конструкцій захисних споруд, в яких встановлені автотрансформатори; запропонований модифікований температурний режим вуглеводневої пожежі для оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів може бути в перспективі впроваджено шляхом розроблення зміни до «Постанови Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2024 року № 471 «Деякі питання інженерного захисту критичної інфраструктури».

Результати проведених досліджень впроваджено (додаток Б) у практичну діяльність Міністерства розвитку громад та територій України, а також Конфедерації будівельників України та ТОВ «Укragenдістрія», у частині використання запропонованого модифікованого температурного режиму вуглеводневої пожежі під час проектування вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів. Результати дисертаційних досліджень також впроваджені в освітній процес кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України. Результати дисертаційної роботи можливо та доцільно використовувати при плануванні та проведенні випробувань на вогнестійкість огорожувальних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків** підтверджується результатами аналітичних досліджень наукових джерел у цій сфері; узгодженістю методів дослідження із визначеними в роботі метою і завданнями; вичерпним обсягом отриманих результатів даних вимірювань в ході проведених експериментів при застосуванні метрологічно каліброваних засобів вимірювальної техніки; прийнятною збіжністю результатів проведених досліджень, а також результатами апробації та практичним впровадженням отриманих результатів проведених досліджень.

**Особистий внесок здобувача** заключається у встановленні мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження, проведенні аналізу літературних джерел, розробленню математичної моделі та проведенню відповідних обчислень із її

використання, розробці програми та методики експериментальних досліджень, проведенні експериментальних досліджень, аналізуванні та обробці отриманих даних, проведені фізичного моделювання із використання методів подібності (методів масштабування). Результати роботи впроваджені дисертантом особисто із дотриманням академічної доброчесності.

Особистий внесок здобувача у публікаціях, де містяться отримані результати наукових досліджень за участі співавторів, указано нижче:

- у публікації [13] Аналіз пожежної безпеки трансформаторів на основі масивів статистичних даних. *Науковий збірник Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (20). Київ: 2025. С. 73-81. здобувач здійснив систематизацію та опрацювання масивів статистичної інформації щодо пожеж, які виникали на трансформаторах, проаналізував динаміку змін частоти пожеж за останні роки, визначив найбільш поширені причини займання та фактори, що впливають на поширення пожежі, побудував статистичні моделі оцінки небезпеки, що дозволяють прогнозувати ймовірність виникнення пожеж залежно від групи факторів ризику;

- публікація [66] Обґрунтування параметричного температурного режиму в захисних спорудах трансформаторів. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»* ISSN-2524-0226, №2 (42), 2025 С. 69-82. <https://doi.10.52363/2524-0226-2025-42-5> є сольною роботою;

- у публікації [110] Дослідження температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора. *Комунальне господарство міст. Том 6. Випуск 194 (2025): Серія: Технічні науки та архітектура*. С. 347-352. здобувач здійснив аналіз температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора, розглянув вплив різних джерел тепла та матеріалів конструкції на формування температурних полів, встановив закономірності зміни температури у часі та просторовому розподілі, запропонував методику оцінки безпечного часу перебування персоналу в споруді;

- у публікації [61] CURRENT STATE OF RESEARCH AND NORMATIVE FRAMEWORK REGARDING ASSESSMENT OF FIRE ALARM SYSTEMS

SUITABILITY FOR OPERATION. JOURNAL OF INTERDISCIPLINARY RESEARCH. ISSN: 2464-6733 (online). здобувач здійснив розгляд застосування стандартизованих температурних режимів при оцінюванні в сучасних умовах класів вогнестійкості будівельних захисних конструкцій, в яких розміщуються трансформатори, проаналізував сучасний стан щодо визначення температурного впливу пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості огорожувальних захисних конструкцій, в яких розташовують трансформатори, показав необґрунтованість існуючого підходу щодо використання температурного режиму вуглеводневої пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості огорожувальних захисних конструкцій, в яких розташовують трансформатори;

- у публікації [96] Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10 (132), 37–45. ISSN: 2812-9105 (online). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317332> здобувач здійснив вибір сценарію дослідження, провів аналітичні дослідження, сформував висновки та пропозиції.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати дослідження представлені на таких науково-практичних конференціях:

1. [97] Обґрунтування модифікованого вуглеводневого температурного режиму пожежі в трансформаторі, захищеного огорожувальними конструкціями. Екологічна безпека в умовах війни : збірник тез доповідей V Міжнародної науковопрактичної конференції, м. Львів, 21 листопада 2024 року. Львів: ЛДУБЖД, 2024. 193-195 с. Здобувачу особисто належить обґрунтування актуальності проведення наукових досліджень;

2. [60] Аналіз температурного режиму пожежі в захисних конструкціях автотрансформаторів: проблематика та наукові підходи до оцінки вогнестійкості. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки» Київ: Київський інститут національної гвардії України, 2025. С. 423-424. Здобувачу особисто належить обґрунтування розрахункових сценаріїв, проведення розрахунків, узагальнення результатів розрахунків та формування висновків щодо температурного режиму пожежі.

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень опубліковано в 5 статтях, 3 з яких надруковано в фахових наукових журналах України та 1 стаття у науковому фаховому виданні, що проіндексована в міжнародній наукометричній базі Scopus та 1 стаття в іншому виданні, що проіндексована в міжнародній наукометричній базі Web of Science. Також результати досліджень висвітлено в двох тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

**Структура дисертації та її обсяг.** Дисертаційна робота містить анотацію, зміст, вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел, що складає 121 найменування і додатки. Загальний обсяг дисертації складає 170 сторінок, 16 таблиць, 41 рисунок та 2 додатки.

## **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ, ЩО ВСТАНОВЛЮЮТЬСЯ В ЗАХИСНИХ СПОРУДАХ**

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання першого завдання дослідження, а саме аналізу сучасного стану щодо використання стандартизованих температурних режимів під час оцінювання класів вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд.

### **1.1 Статистика пожеж за участю електротехнічних виробів**

За статистикою, половина пожеж в енергетичному секторі пов'язана саме з трансформаторним обладнанням. Магістральні та міждержавні електромережі Об'єднаної енергетичної системи України мають протяжність близько 23 тис. км. Із них приблизно 4,9 тис. км становлять лінії напругою 400–800 кВ, 13,4 тис. км – напругою 330 кВ, 4,0 тис. км – 220 кВ та 0,7 тис. км – 35–110 кВ. Крім того, функціонує 137 підстанцій, сумарна трансформаторна потужність яких сягає 78,6 тис. МВт.

Розподільчі мережі включають близько 1 млн км кабельних і повітряних ліній електропередачі напругою 0,4–150 кВ та близько 200 тис. трансформаторних підстанцій у діапазоні напруг 6–150 кВ.

Трансформатори виконують ключову роль у з'єднанні потужностей генеруючих об'єктів з розподільчими мережами та споживачами. Їхня відмова здатна спричинити масштабні перебої в енергопостачанні, що призведе до знеструмлення житлових масивів, промислових підприємств і критичної інфраструктури. Масштаб таких наслідків важко передбачити, адже причини аварій можуть бути різноманітними, а їх перебіг – непередбачуваним. Особливо небезпечними трансформатори є з точки зору пожежної безпеки [6].

В умовах бойових дій ризику пошкодження трансформаторного обладнання значно зростають. Ураження підстанцій внаслідок ракетних або артилерійських

обстрілів призводить не лише до механічних руйнувань, а й до виникнення масштабних пожеж через загоряння трансформаторного масла.

Такі інциденти мають каскадний ефект: вихід з ладу одного або кількох трансформаторів може спричинити відключення цілих районів від електропостачання, ускладнити роботу систем життєзабезпечення та створити додаткові загрози для населення й об'єктів критичної інфраструктури.

Крім безпосереднього руйнування, обстріли та вибухові хвилі можуть призводити до прихованих пошкоджень трансформаторів, таких як мікротріщини в баках, пошкодження ізоляції чи розгерметизація масляних систем.

Це створює додаткові ризики пожеж, які можуть проявитися через деякий час після атаки під час нормальної експлуатації обладнання. Також ускладненням є обмежений доступ пожежно-рятувальних підрозділів до зруйнованих енергетичних об'єктів у зоні бойових дій, що збільшує масштаби наслідків та ускладнює локалізацію аварійних ситуацій.

17 вересня 2022 року на території Слов'янської ТЕС в м. Миколаївка Краматорського району Луганської області відбулося загоряння трансформатору (Рис. 1.1.).



Рисунок 1.1 – Пожежа трансформатору в м. Миколаївка Краматорського району Луганської області

По прибуттю на місце виклику встановлено, що пожежа відбулася внаслідок артилерійського обстрілу російської федерації (загалом залучено 6 рятівників та 1 одиниця техніки).

22 червня 2024 на території виробничого приміщення в Оболонському районі м. Києва в наслідок короткого замикання загорівся трансформатор (Рис. 1.2.)



Рисунок 1.2 – Пожежа трансформатору в Оболонському районі м. Києві

07 березня 2024 року в с. Кубей Болградського району Одеської області загорівся трансформатор на території електропідстанції (Рис. 1.3.).



Рисунок 1.3 – Пожежа трансформатору в с. Кубей Болградського району Одеської області загорівся трансформатор на території електропідстанції

По прибуттю на місце виклику встановлено, що пожежа відбулася внаслідок короткого замикання (загалом залучено 10 рятувальників та 4 одиниці техніки).

16 лютого 2024 року в м. Луцьк горів трансформатор об'ємом мастила 400 літрів (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Пожежа трансформатору в м. Луцьк

За викликом до місця події спрямували 20 рятувальників 1 та 2 державних ДПРЧ м. Луцька. Після знеструмлення об'єкта, рятувальники розпочали гасіння, застосовуючи генератор піни ГПС-600.

Проведено статичний аналіз розподілу кількості пожеж в Україні за електричними машинами та перетворювачами (таблиця 1.1.)

Таблиця 1.1 – Розподіл кількості пожеж в Україні за електричними машинами та перетворювачами

Рік	Трансформатор	Стабілізатор	Електро-двигун	Генератор	Інші електричні машини та перетворювачі
2020	49	10	14	45	
2021	48	13	21	35	30
2022	54	10	12	55	22
2023	45	20	16	45	52
2024	69	12	17	98	63

З таблиці 1.1 видно, що в середньому щороку реєструється 53 випадки пожеж трансформаторів. Загалом із 877 пожеж, що виникали або були спричинені електричними машинами чи перетворювачами, 265 або 30,2 % припадає саме на трансформатори.

Проведено аналіз статистичних даних щодо пожеж на трансформаторних підстанціях (трансформаторах) (Табл. 1.2.)

Таблиця 1.2 – Основні показники статистики пожеж в Україні, що виникали на трансформаторних підстанціях (трансформаторах)

Рік	Трансформаторна підстанція, трансформатор			
	Кількість пожеж, од.	Прямі збитки, тис. грн.	Загинуло внаслідок пожеж, люд.	Травмовано внаслідок пожеж, люд.
2020	164	2412,1	0	0
2021	197	7067,1	0	0
2022	332	436213,6	1	4
2023	237	79879,0	0	1
2024	331	376135,4	0	2

Проаналізувавши масиви статистичних даних за об'єктом виникнення пожеж (Табл. 1.2) – трансформаторна підстанція (трансформатор) по основним показникам, встановлено, що середньорічна кількість таких пожеж складає 252.

Загалом за період 5 років на трансформаторних підстанціях і трансформаторах виникла 1261 пожежа, прями збитки склали від яких склали 901 млн 707 тис. грн, загинула 1 людини та 7 травмовано.

Таблиця 1.3 – Основні причини пожеж трансформаторів

Причини	Рік				
	2020	2021	2022	2023	2024
Порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації	150	184	216	195	158
Пожежі в наслідок війни	-	-	107	33	132
Підпал	2	4	1	2	18
Необережне поводження з вогнем	9	2	3	3	17
Інші причини	3	7	5	4	6

Відповідно таблиці 1.3 найпоширенішими причинами пожеж є: порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації – 180,6 випадків в середньому щороку (з яких в основному є короткі замикання) та пожежі в наслідок війни (з 2022 року) – 90,6 випадків в середньому щороку [1, 7].

Аналіз динаміки причин пожеж на трансформаторних підстанціях:

1. Порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації – ця причина стабільно є основною в структурі пожеж на трансформаторних підстанціях. У 2020 році – 150 випадків, що становило найбільшу частку.

Пік зафіксовано у 2022 році (216 випадків), після чого спостерігається зниження: 195 у 2023 та 158 у 2024 роках.

Динаміка свідчить, що технічні й експлуатаційні порушення залишаються головним фактором.

Зменшення після 2022 року можна пояснити зміщенням акценту на інші причини (зокрема бойові дії).

2. Пожежі внаслідок бойових дій. У 2022 році зафіксовано 107 пожеж, у 2023 році – 33, а у 2024 році різке зростання до 132 випадків.

Це свідчить про безпосередній вплив воєнних дій на об'єкти критичної інфраструктури. У 2023 р. спостерігається спад, що пов'язано з відносним зменшенням інтенсивності обстрілів у деяких регіонах. Проте у 2024 році відновилися масштабні атаки на енергетичні об'єкти. Тенденція є нестабільною та залежить від військового чинника.

3. Підпал – до 2023 року кількість випадків поодинокі (1–4 щороку).

У 2024 році відбулося різке зростання до 18 випадків, що у 9 разів перевищує рівень 2023 року.

Це може вказувати на цілеспрямовані диверсійні дії проти енергетичних об'єктів або на зростання соціальних ризиків у кризових умовах.

4. Необережне поводження з вогнем – з 2020-2023 рр. зафіксовано 2-9 випадків на рік.

У 2024 році показник різко зріс до 17 випадків, що свідчить про послаблення контролю. Цей фактор за своєю природою менш системний, проте в умовах війни він набуває значення.

5. Інші причини – коливання у межах 3-7 випадків протягом 2020–2023 рр. У 2024 р – 6 випадків – це поодинокі інциденти (удари блискавки, займання суміжного обладнання тощо), які важко класифікувати, і вони не впливають істотно на загальну картину та можуть не враховуватися під час формування висновків [1, 6].

Щодо загальних тенденцій, то домінуючим фактором є порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації трансформаторів (у 2020–2022 рр. понад 70 % усіх випадків). З 2022 року додався вплив воєнних дій – цей фактор став другим за значимістю причиною виникнення пожеж. З 2024 року відбувається зміна структури ризиків: різко зросла кількість випадків підпалів та необережного поводження з вогнем. Це свідчить про ускладнення ситуації та соціальної напруженість, що відображається в тому числі на пожежній безпеці в цілому.

Фактор воєнних дій формує нестабільну, але суттєву змінну у динаміці пожеж на трансформаторах, що зростає [1, 8, 9].

За результатами аналізу та систематизації методів забезпечення пожежної безпеки трансформаторів, пропонуються:

1. Конструктивні рішення:

– заміна в застосуванні горючих речовин і матеріалів на негорючі або важкогорючі, наприклад (естери, силіконові рідини) замість традиційного трансформаторного масла;

– поділ об'єму масла на ізольовані відсіки; встановлення протипожежних перегородок;

– використання систем аварійного відведення масла у аварійні резервуари або влаштування гравійних засипок території трансформаторної підстанції;

2. Системи раннього виявлення та моніторингу:

– діагностика розчинених газів концентрацій  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  тощо для прогнозування дефектів;

– тепловізійний контроль: виявлення перегрівів обмоток, контактів і з'єднань;

– використання автоматичних систем пожежної сигналізації для виявлення ознак займання;

– відстеження перевантажень, які підвищують ризик нагріву та займання;

3. Використання ефективних автоматичних систем пожежогасіння.

4. Організаційно-експлуатаційні заходи

– проведення регламентного технічного обслуговування (планові огляди, заміна масла, очищення від вологи та домішок);

– ведення журналів дефектів (систематизація виявлених відхилень для аналізу ризиків);

– контроль електричних з'єднань (затягування контактів, усунення окислення);

5. Планування території:

– встановлення трансформаторів в окремих протипожежних відсіках;

– забезпечення протипожежних відстаней між трансформаторами.

Окремої уваги потребує питання оцінки каскадних ефектів унаслідок пожеж трансформаторів. Ураження одного елемента підстанції може ініціювати послідовний вихід з ладу інших об'єктів енергетичної мережі, що формує ланцюгові ризики. В умовах воєнних дій та зростання навантаження на інфраструктуру ймовірність таких ефектів збільшується.

Не менш значущим напрямом є розвиток цифрових систем моніторингу та раннього виявлення пожеж. Використання сенсорних засобів вимірювальної техніки, тепловізійних систем та алгоритмів обробки даних на основі штучного інтелекту, що дозволяє виявляти критичні зміни параметрів роботи трансформаторів (наприклад, підвищення температури масла, наявність газових домішок, аномальні коливання напруги). Інтеграція таких технологій із системами протипожежного захисту створює умови для формування комплексів безпеки, які здатні автоматично реагувати на зміну рівня ризику.

Аналіз статистичних даних свідчить про наявну тенденцію зростання кількості пожеж на автотрансформаторах. Результати статистичних даних про пожежі є вихідними даними для управління ризиками. Застосування передових аналітичних інструментів дозволяє значно підвищити рівень пожежної безпеки [10-12].

Найефективніше забезпечення пожежної безпеки трансформаторів досягається при комбінованому застосуванні конструктивних рішень, систем моніторингу стану технологічного процесу трансформатора, застосування систем автоматичного пожежогасіння [13].

## **1.2 Аналіз вимог нормативних документів щодо захисту автотрансформаторів**

До лютого 2022 року вимоги щодо протипожежного захисту об'єктів критичної інфраструктури було викладено в декількох нормативних та нормативно-правових документах [14-26].

Разом з цим збройна агресія російської федерації стала найбільшим викликом для національної безпеки України за весь її час незалежності. Внаслідок атак на територію України уражено досить велику кількість об'єктів критичної інфраструктури. Масштабне вторгнення російської федерації на територію України у лютому 22-го року характеризується застосуванням засобів повітряного нападу противника насамперед – ракет та безпілотних літальних апаратів. Ключовими характеристиками засобів повітряного нападу є їх різноманітність та інтенсифікація застосування, вибіркового ураження найважливіших критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури, мінлива комбінована тактика їх застосування країною агресором. На даний час об'єкти критичної інфраструктури є одними із пріоритетних цілей противника.

Враховуючи ситуацію, що склалася, такі виклики потребують асиметричних відповідей та системних програм на державному рівні. Побудова ефективної системи захисту об'єктів критичної інфраструктури є одним із пріоритетним завдань держави.

Концептуально в державі визначено єдиний підхід до інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури та підвищення рівня захищеності структури для стабільного та безперервного виконання важливих функцій.

Ця концепція покликана забезпечити інтегральний захист території, об'єктів, громадян і суспільство в цілому від актуальних загроз, в тому числі від факторів ураження засобів повітряного нападу, що є складовою національної безпеки України.

Згідно з цією концепцією передбачено три рівня інженерного захисту елементів критичної інфраструктури:

перший рівень - це захист від поодиноких непрямих влучань безпілотних літальних апаратів (БПЛА) на відстані понад 5 метрів від систем інженерного захисту та поодиноких непрямих влучань ракети на відстані понад 15 метрів;

другий рівень - це захист від поодиноких прямих влучань безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та поодиноких непрямих влучань ракети на відстані понад 15 метрів від систем інженерного захисту;

третій рівень - це захист від поодиноких прямих влучань безплотних літальних апаратів (БПЛА) та поодиноких влучань ракети у системи інженерного захисту.

Для реалізації концепції, щодо інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури, було видано посібник типових рішень з інженерного захисту критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури. Одним із розділів даного посібника пропонуються рекомендації щодо заходів з питань пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту під час реалізації типових рішень з інженерного захисту елементів критичної інфраструктури України.

### **1.2.1 Вимоги пожежної безпеки під час реалізації інтегрального захисту об'єктів критичної інфраструктури першого рівня**

Вимоги полягають у наступному:

- інженерний захист наземних будівель (споруд) насосної станцій пожежогасіння, наземних резервуарів запасів вогнегасних речовин для цілей пожежогасіння, трубопроводів (сухотрубів) системи пожежогасіння, а також розподільчих вузлів систем пожежогасіння трансформаторів;
- улаштування додаткових проходів (отворів) у захисті, що забезпечать доступ пожежно-рятувальних підрозділів для можливості подачі вогнегасних речовин для цілей пожежогасіння, при цьому улаштовуючи додаткові захисні стіни з метою утворення Т або Г подібного захисту;
- застосування негорючих матеріалів під час улаштування додаткового протиуламкового захисту у верхній частині захисних конструкцій із габіонів.

### **1.2.2 Вимоги пожежної безпеки під час реалізації інтегрального захисту об'єктів критичної інфраструктури другого рівня**

Вимоги полягають у наступному:

- забезпечити інженерний захист наземних будівель (споруд) насосної станцій пожежогасіння, наземних резервуарів запасів вогнегасних речовин для

цілей пожежогасіння, трубопроводів (сухотрубів) систем пожежогасіння, а також розподільчих вузлів систем пожежогасіння трансформаторів;

- забезпечити виконання заходів щодо доступу пожежно-рятувальних підрозділів для можливості подачі вогнегасних речовин для цілей пожежогасіння обладнання під захисними конструкціями типу «Шелтер»;

- несучі конструкції каркас перекриття захисної конструкції типу «Шелтер» виконати з класом вогнестійкості не нижче REI90 за умов впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі;

- у разі необхідності підвищення вогнестійкості конструкцій та виробів застосовувати вогнезахисні засоби, що відповідають умовам експлуатації об'єктів;

- влаштування автоматичних систем пожежогасіння трансформаторів та вибухо-пожежонебезпечного обладнання розташованого під захисними конструкціями типу «Шелтер»;

- передбачити заходи з блискавкозахисту та захисту від вторинних проявів блискавки захисної конструкції типу «Шелтер»;

- у разі застосування дерев'яних матеріалів для збільшення стійкості до ураження: осколками та вибуховою хвилею обладнання виконати їх оброблення засобами вогнезахисту, що забезпечують І групу вогнезахисної ефективності;

- під час виконання заходів щодо збільшення стійкості до ураження осколками та вибуховою хвилею генераторів та турбін шляхом улаштування довкола них захисних сталевих рам, на болтових з'єднаннях, які обшиваються знімними металевими листами, передбачити: несучі конструкції каркасу з класом вогнестійкості не нижче REI90, влаштування автономних систем пожежогасіння генераторів та турбін, а також засобів контролю концентрації водню під захисним каркасом;

- під час влаштування додаткового захисту пультів управління передбачити встановлення протипожежних дверей, вікон та клапанів системи вентиляції з класом вогнестійкості не нижче EI90;

- під час заміни горючих матеріалів покрівель будівель машинних залів та котельних відділень застосовувати матеріали з такими показниками пожежної

небезпеки, а саме: утеплювач - негорючий, паро та гідроізоляція - не вище Г1, РП1, В1;

- у разі влаштування на покрівлях будівель машинних залів та котлів, додаткових ферм з прогонами, необхідно забезпечити їх клас вогнестійкості не нижче R90, якщо не буде здійснено заміну горючих матеріалів покрівлі.

### **1.2.3 Вимоги пожежної безпеки під час реалізації інтегрального захисту об'єктів критичної інфраструктури третього рівня**

Вимоги полягають у наступному:

- передбачити фортифікаційні споруди з властивістю захисних споруд цивільного захисту (сховищ або протирадіаційних укриттів) та розробки відповідних інженерно-технічних заходів цивільного захисту;
- передбачити ступінь вогнестійкості фортифікаційної споруди не нижче І;
- здійснити підтвердження вогнестійкості будівельних конструкцій відповідними розрахунками та експериментальними методами за стандартами, які відповідають європейським вимогам проектування;
- врахувати під час визначення класу вогнестійкості будівельних конструкцій, необхідність забезпечення їх стійкості до моменту прибуття пожежно-рятувальних підрозділів;
- здійснювати поділ фортифікаційної споруди на окремі протипожежні відсіки (блок камер автотрансформаторів та блок технічно-побутових приміщень) протипожежними стінами та протипожежними перекриттями 1-го типу із заповненням прорізів з боку технічно-побутових приміщень протипожежними дверима, воротами, люкам, клапанами, завісами з класом вогнестійкості не менше EI60;
- огорожувальні конструкції камер автотрансформаторів (стіни, перекриття) з боку побутових, технічних приміщень та між камерами автотрансформаторів (далі- АТ) передбачити протипожежними з класом вогнестійкості не менше REI 150 із заповненням прорізів протипожежними

дверима, воротами, люками, клапанами, завісами з класом вогнестійкості не менше EI 60;

- підтвердження класу вогнестійкості будівельних конструкцій камер АТ, а також вогнезахисних матеріалів, що застосовуються, необхідно оцінювати шляхом застосування методів, які ґрунтуються на сценарії впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі;

- забезпечення вогнезахисту несучих металевих конструкцій фортифікаційної споруди (у разі застосування) з метою підвищення їх класу вогнестійкості до значення, що відповідає ступеню вогнестійкості будівлі згідно табл. 1 [14], але не менше ніж до класу вогнестійкості REI90, а для камер трансформаторів REI150;

- відокремлення технічних, технологічних та побутових приміщень між собою, від коридорів, холів протипожежними перегородками 1-го типу та перекриттями 3-го типу із заповненням прорізів протипожежними дверима, воротами 2-го типу;

- виконання огорожувальних конструкцій приміщення дизель-електростанції (стіни, перекриття) та простору проходження електромереж від нього до електроприймачів I категорії надійності електропостачання, передбачити протипожежними класом вогнестійкості не менше REI90 із заповнення прорізів протипожежними дверима, воротами, клапанами 1-го типу та розрахованими на стійкість від надмірного тиску ударної хвилі

- забезпечення класу вогнестійкості конструкцій фальшпідлог та кабельних каналів в приміщеннях з електричним та електронним обладнанням не нижче EI30 з несучими конструкціями класом вогнестійкості не нижче R30;

- поділу коридорів будівлі протипожежними перегородками 1-го типу з протипожежними дверима 2-го типу на протипожежні секції довжиною не більше 60 м;

- влаштування сходів та сходових кліток з конструктивними та планувальними рішеннями згідно [14] та [27];

- сходові марші сходів виходів з коридорів передбачити з класом вогнестійкості не менше R60, огорожувальні конструкції приміщень з такими сходами передбачити протипожежними класом вогнестійкості не менше REI 150 із заповненням прорізів протипожежними дверима, клапанами 1-го типу, а вихід з приміщення зі сходами передбачити безпосередньо назовні;

- влаштування систем протидимного захисту;

- розділення димовими завісами на окремі димові зони простору перед відкритими порталами кожного АТ;

- проведення розрахунку часу евакуації людей у випадку пожежі та настання небезпечних чинників пожежі;

- влаштування не менше двох евакуаційних виходів з кожного протипожежного відсіку фортифікаційної споруди;

- розміщення протипожежних гідрантів на водопровідній мережі передбачити з розрахунку забезпечення пожежогасіння кожної частини будівлі не менше ніж від двох пожежних гідрантів;

- влаштування у фортифікаційній споруді внутрішнього протипожежного водопроводу з пожежними кран-комплектами;

- влаштування насосної станції пожежогасіння I категорії для створення розрахункового тиску та нормативних витрат для мереж зовнішнього та внутрішнього протипожежних водопроводів та автоматичних систем пожежогасіння (охолодження) обладнання;

- влаштування в насосних станціях пожежогасіння по два патрубки із з'єднувальними головками 80 мм обладнаних зворотними клапанами та засувками, для приєднання рукавів пожежних автомобілів та подавання вогнегасних речовин у систему внутрішнього та автоматичного пожежогасіння;

- передбачити влаштування маслоприймачів, масловідводів, та маслозбірника для кожної камери АТ;

- обладнання приміщень фортифікаційної споруди, у тому числі камер АТ, системами пожежної сигналізації та керування евакууванням людей при

пожежі, не нижче 2-го типу, з світловими покажчиками напрямку евакуації та евакуаційних виходів;

- обладнання приміщень з електричним та електронним обладнанням з урахуванням кабельних каналів та просторів під фальшпідлогами системами газового пожежогасіння;

- обладнання камер АТ системами автоматичного пожежогасіння (дренчерного водяного, або із застосуванням речовин, що підвищують ефективність гасіння нафтопродуктів або об'ємного газового у разі можливості створення замкнутого простору з допустимими значеннями герметичності;

- виконання кабельних ліній живлення і керування, що забезпечують функціонування системи пожежогасіння, кабелями, що зберігають цілісність кіл під дією стандартного температурного режиму (далі – СТР) протягом 60 хв або захищені від дії СТР будівельними конструкціями, вогнезахисними матеріалами, які забезпечують їх функціонування протягом 60 хв;

- обладнання приміщення дизель-електростанцій автоматичною системою пожежогасіння з вибором вогнегасної речовини, що забезпечує ефективність гасіння пожеж в приміщеннях з наявністю нафтопродуктів та електрообладнання під напругою;

- влаштування електрообладнання та прокладки кабелів в межах вибухо- та пожежонебезпечних зон з урахуванням вимог ПУЕ;

- проведення вогнезахисного оброблення кабельної продукції з улаштуванням вогнезахисних ущільнень з класом вогнестійкості не нижче EI90 у місцях проходження кабелів через стіни, перегородки, перекриття, у наземних кабельних коробах, підземних кабельних каналах через кожні 20 м по вертикалі та 30 м по горизонталі, а також в місцях розгалуження кабельних трас.

### **1.2.4 Загальні організаційно-технічні та конструктивні рекомендації з питань пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту під час реалізації інтегрального захисту критичної інфраструктури**

Рекомендації полягають у наступному:

- передбачити дотримання вимог діючих норм, правил, стандартів з питань пожежної безпеки, в залежності від функціонального призначення об'єктів;

- передбачити приведення у відповідність з вимогам діючих норм, правил, стандартів мережі зовнішнього протипожежного водопроводу, який виконано із металевих трубопроводів, які через тривалий термін експлуатації (біля 50 років), піддані корозійному впливу, не забезпечують нормовані показники витрат води та тиску, що у свою чергу унеможливорює якісне та своєчасне виконання пожежно-рятувальними підрозділами завдань за призначенням;

- забезпечення насосних станцій пожежогасіння резервним, незалежним, автономним джерелом електроживлення (генератором), для забезпечення безперебійної подачі вогнегасних речовин для цілей пожежогасіння в умовах повного знеструмлення об'єктів;

- у межах вибухопожежо- та пожежонебезпечних зон необхідно застосовувати електрообладнання з відповідним ступенем захисту згідно Правил улаштування електроустановок;

- біля місць розміщення критично-важливих та пожежонебезпечних елементів рекомендовано встановлювати додаткові первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники з масою заряду вогнегасної речовини не менш ніж 50 кг/л);

- у галереях транспортування вугілля ТЕС передбачити влаштування автономних систем пожежогасіння, що дозволить забезпечити гасіння

пожежі при повному знеструмленні об'єкту або пошкодження трубопроводів протипожежного водопостачання;

- по периметру обвалування резервуарів зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин влаштовувати на безпечній відстані стаціонарні лафетні стволи з можливістю підключення пожежної техніки;

- відокремлення резервуарів зберігання горючих та вибухонебезпечних речовин від місць розташування обладнання по їх перекачці, протипожежними стінами із нормованою межею вогнестійкості;

- влаштування системи раннього виявлення надзвичайних ситуацій та оповіщення людей у разі їх виникнення на об'єктах підвищеної небезпеки 1 та 2 класу.

У зв'язку з можливістю ураження зовнішніх мереж протипожежного водопостачання, повного знеструмлення об'єктів та обмеженнями щодо початку гасіння пожежно-рятувальними підрозділами можливих пожеж, пов'язаних з повітряними загрозами, проектними рішеннями доцільно передбачити заходи пасивного протипожежного захисту, а саме:

- виконання несучих металевих конструкцій будівель та споруд (з вибухонебезпечними та пожежонебезпечними технологічними процесами) з класом вогнестійкості не нижче R90;

- захист від впливів високих температур та забезпечення нормованого класу вогнестійкості (не нижче R45) зовнішніх металевих етажерок, на яких розміщуються обладнання та трубопроводи, що містять легкозаймисті або горючі рідини та горючі гази;

- влаштування ущільнень з межею вогнестійкості не нижче EI90 кабелів в наземних кабельних коробах та підземних кабельних (каналах) на території промислових майданчиків та ВРП, через кожні 30 метрів горизонтальних ділянок та у місцях розгалуження кабельних трас;

- вогнезахисне обробляння кабельної продукції в кабельних спорудах (поверхах, напівповерхах, тунелях тощо) по всій довжині кабельних трас з

улаштуванням вогнезахисних ущільнень з класом вогнестійкості не нижче EI90 у місцях проходження кабелів через стіни, перегородки та перекриття;

- вогнезахисне оброблення кабельної продукції в кабельних коробах та лотках прокладеної в об'ємах машинних залів та котельних відділень по всій довжині кабельних трас з улаштуванням вогнезахисних ущільнень (протипожежних поясів) з класом вогнестійкості не нижче EI90 у місцях проходження кабелів через стіни, перегородки та перекриття, через кожні 30 м горизонтальних та 20 м вертикальних ділянок, а також у місцях їх розгалужень;

- встановлення протипожежних дверей (люків) та протипожежних клапанів в системах вентиляції кабельних споруд (поверхах, напівповерхах, тунелях тощо) з класом вогнестійкості не нижче EI90, що дозволить запобігти розповсюдженню пожежі за межі протипожежного відсіку;

- доведення до нормованого значення межі вогнестійкості металевих конструкцій ферм машинних залів вогнезахисними матеріалами, що забезпечують клас вогнестійкості R90 в умовах дії температур горіння водню;

- доведення до нормованого значення межі вогнестійкості металевих конструкцій машинних залів в радіусі 10м від мастилонаповненого обладнання, вогнезахисними матеріалами, що забезпечують клас вогнестійкості не нижче R90.

### **1.3 Сучасний стан використання стандартизованих температурних режимів під час оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд**

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 [28].

Взагалі вогнестійкість має підтверджуватись на основі виконання наступних умов [29]:

- в часових параметрах:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (1.1)$$

- в міцнісних параметрах:

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (1.2)$$

- в температурних параметрах

$$\Theta_d \leq \Theta_{cr,d} \quad (1.3)$$

де

$t_{fi,d}$  - розрахункове значення межі вогнестійкості;

$t_{fi,requ}$  - нормована межа вогнестійкості;

$R_{fi,d,t}$  - розрахункове значення несучої здатності окремої конструкції під час пожежі в момент часу  $t$ ;

$E_{fi,d,t}$  - розрахункове значення навантажувального ефекту під час пожежі в момент часу  $t$ ;

$\Theta_d$  - розрахункове значення температури матеріалу;

$\Theta_{cr,d}$  - розрахункове значення критичної температури матеріалу.

Порівняння за температурними параметрами є найбільш поширеним методом за якого визначається критична температура для навантаження. Як правило це описується за допомогою спрощених розрахункових методів.

Температурний режим пожежі – це визначений розвиток пожежі, прийнятий при проектуванні.

Одним із основних критеріїв для розрахунку вогнестійкості будь-якої будівельної конструкції є визначення температурно-часової залежності розвитку

пожежі, яка має відноситися лише до одного протипожежного відсіку будівлі, якщо у проектному сценарії розвитку пожежі не зазначено інше. Розрізняють номінальні та параметричні температурні режими.

Номінальний температурний режим – це традиційний температурний режим, що приймається для класифікації або перевірки вогнестійкості, наприклад, стандартний температурний режим, температурний режим зовнішньої пожежі, режим вуглеводневої пожежі;

Параметричний температурний режим – це режим, що встановлений, ґрунтуючись на моделі пожежі та питомих фізичних параметрах, що визначають умови в протипожежному відсіку.

Як правило в більшості випадків для проектування будівельних конструкцій застосовують номінальні температурні режими пожежі. Разом з цим, методи моделювання реальної (параметричної) пожежі можуть застосовуватись під час розроблення заходів з протипожежного захисту будівель та споруд.

Номінальні температурно-часові залежності – це загальноприйняті режими розвитку пожежі, які адаптовані для класифікації та підтвердження вогнестійкості різних будівельних матеріалів, виробів та конструкцій.

Нормативний документ [29] регламентує наступні температурні режими:

- стандартний температурний режим;
- температурний режим зовнішньої пожежі;
- вуглеводневий температурний режим.

Додатково до регламентованих режимів розвитку пожежі відносять: температурний режим повільно-розвиваючої пожежі, модифікована температурно-часова залежність розвитку вуглеводневої пожежі (НСМ), режими розвитку пожежі в тунелях (RWS, RABT ZTV).

*Стандартний температурний режим пожежі*

Стандартний температурний режим визначається за формулою:

$$\theta_g = 345 \log_{10} (8t + 1) + 20 \quad (1.4)$$

де

$\theta_g$  – температура газового середовища в протипожежному відсіку, °С;

$t$  – час, хв.

Стандартний температурний режим пожежі визначено, як основний метод оцінки вогнестійкості залізобетонних конструкцій (рис. 1.5) [30-31]

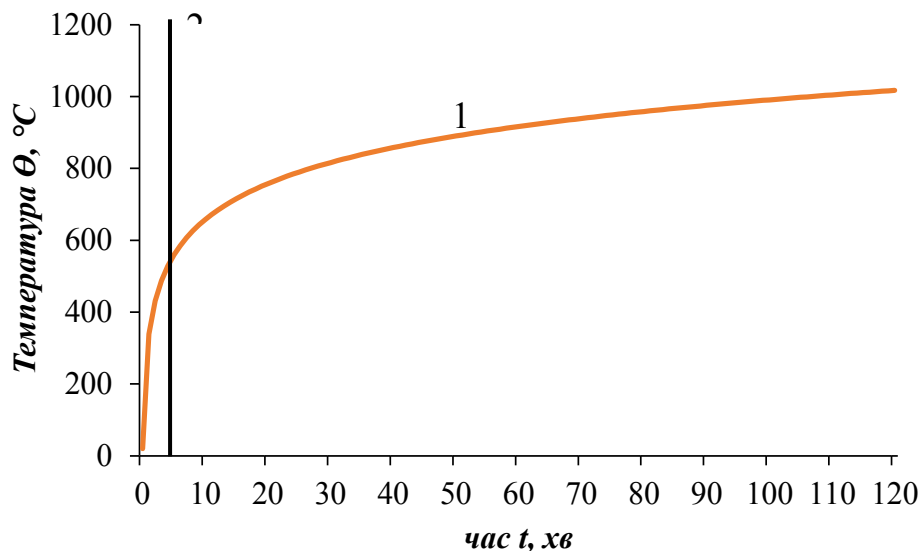


Рисунок 1.5 – Стандартний температурний режим [31]: 1 – стандартний температурний режим пожежі (1.1); 2 – проміжок часу, протягом якого відхилення температури не контролюється

Стандартний температурний режим відображає умовну модель, що використовується для оцінювання поведінки конструкцій під впливом пожежі у фазі повного розвитку та при проведенні вогневих випробувань з урахуванням кривої температура-час висвітлюється в національних стандартах [33-36].

Але це не єдина температурна крива, яка використовується під час проведення вогневих випробувань зокрема в [37], температурна крива описана нижчими показниками температурами і використовує величину згорання речовин небезпечними характеристиками пожежного навантаження.

*Зовнішня пожежа*

Температурний режим зовнішньої пожежі створює менш жорсткі умови, ніж при випробуваннях в стандартному температурному режимі. Цю температурно-часову залежність використовують при визначенні межі вогнестійкості зовнішніх стін будинків.

Температурний режим зовнішньої пожежі визначається за формулою:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{0,32t} - 0,313e^{3,8t}) + 20 \quad (1.5)$$

де

$\theta_g$  – температура газового середовища навколо конструкції, °С;

$t$  – час, хв.

#### *Вуглеводнева пожежа*

Вуглеводневий температурний режим відноситься до більш жорстких режимів, ніж режим стандартної пожежі. Даний режим необхідно використовувати при визначенні межі вогнестійкості будівельних конструкцій, які застосовуються на об'єктах нафтової промисловості, температура горіння яких зростає значно швидше і має більші значення, ніж при горінні будь-яких інших будівельних та облицювальних матеріалів.

Температурний режим вуглеводневої пожежі визначається за формулою:

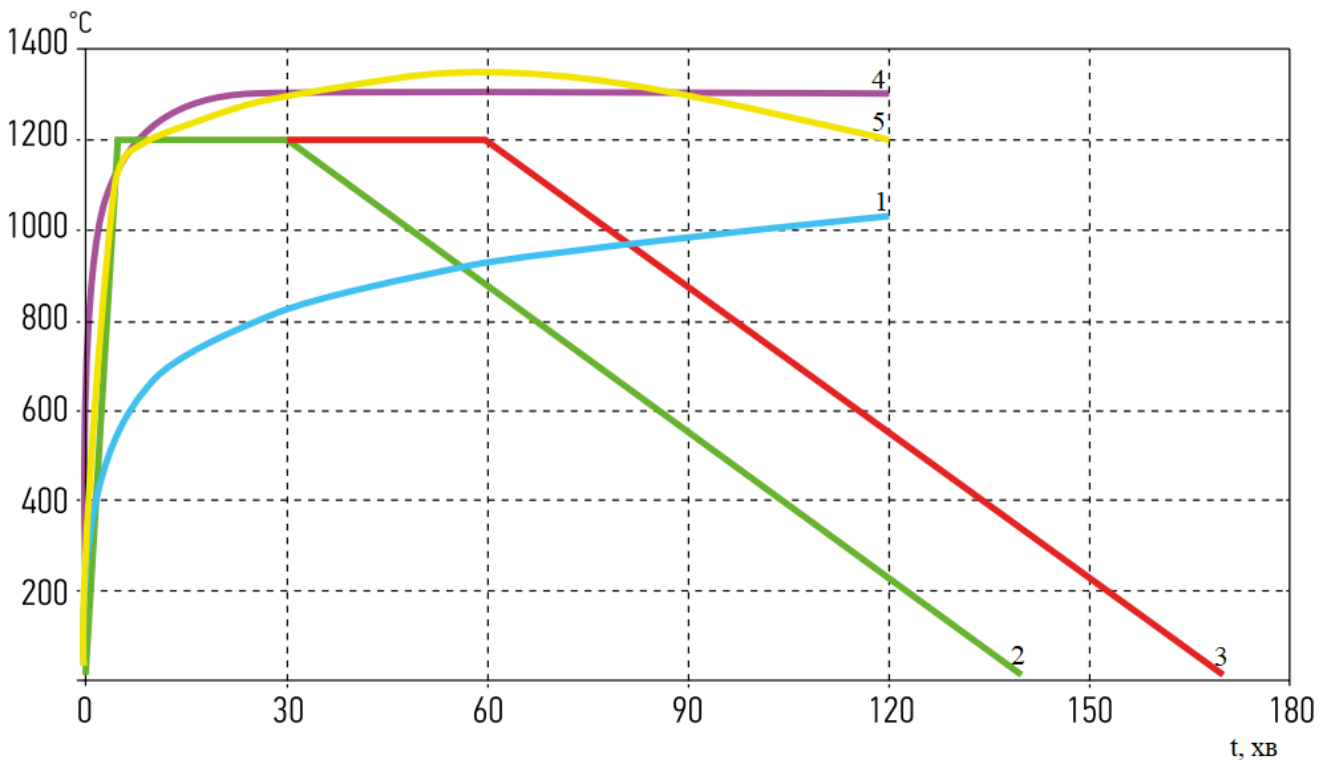
$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (1.6)$$

де

$\theta_g$  – температура газового середовища навколо конструкції, °С;

$t$  – час, хв.

Залежності деяких температурних режимів розвитку пожежі (температура від час) представлені у вигляді кривих на рисунку 1.6.



*Умовні позначки:*

- 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 м<sup>3</sup>) в тунелі)

Рисунок 1.6 – Температурні режими розвитку пожежі

Температурні режими пожеж у приміщеннях різних будівель та споруд можуть суттєво відрізнятися один від одного так зокрема існує ряд типових для певних будинків чи споруд температурні режими пожежі [31-37]. Наприклад, на рисунку 1.7 наведено температурні режими пожеж в автомобільних та залізничних тунелях, шахтах, лініях метро [38]. У відмінності від перебігу пожеж у звичайних будівлях та спорудах під час виникнення пожежі в тунелі відведення тепла від вогнища пожежі ускладнене, і в результаті температура пожежі може досягати величини до 1350 °С.

У 1979 році в Нідерландах проведені дослідження “TNO”, які повторно підтвержені під час повномасштабних випробувань у тунелі Рунехамр у Норвегії [38]. Температурна пожежна крива RWS описується наступною кривою [39].

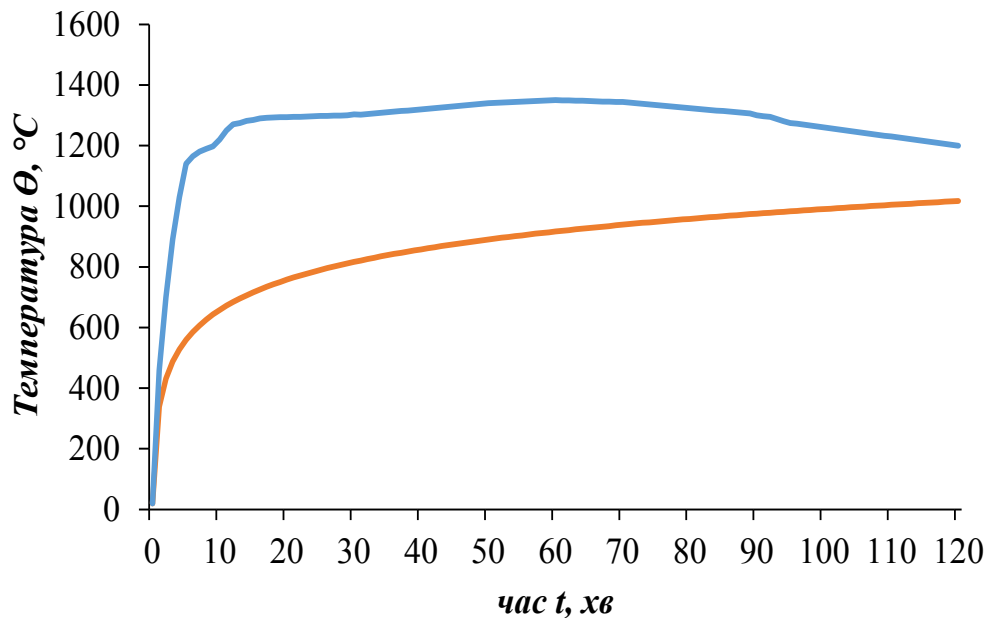


Рисунок 1.7 – Температурні режими пожеж: 1 – стандартний температурний режим пожежі за [31]; 2 – температурна пожежна крива RWS [38, 39]

У Франції використана температурна крива аналогова до кривої RWS яка на 50 °C нижча за розглянуту. Німеччина [35] та інші країни використовують 120 хвилинну температурну криву RABT для вогнезахисту всіх лінійно-кабельних споруд. Температурна залежність RABT наведена на рисунку 1.8, отримана за результатами серії випробувань за програмою проекту Еврика [40-42].

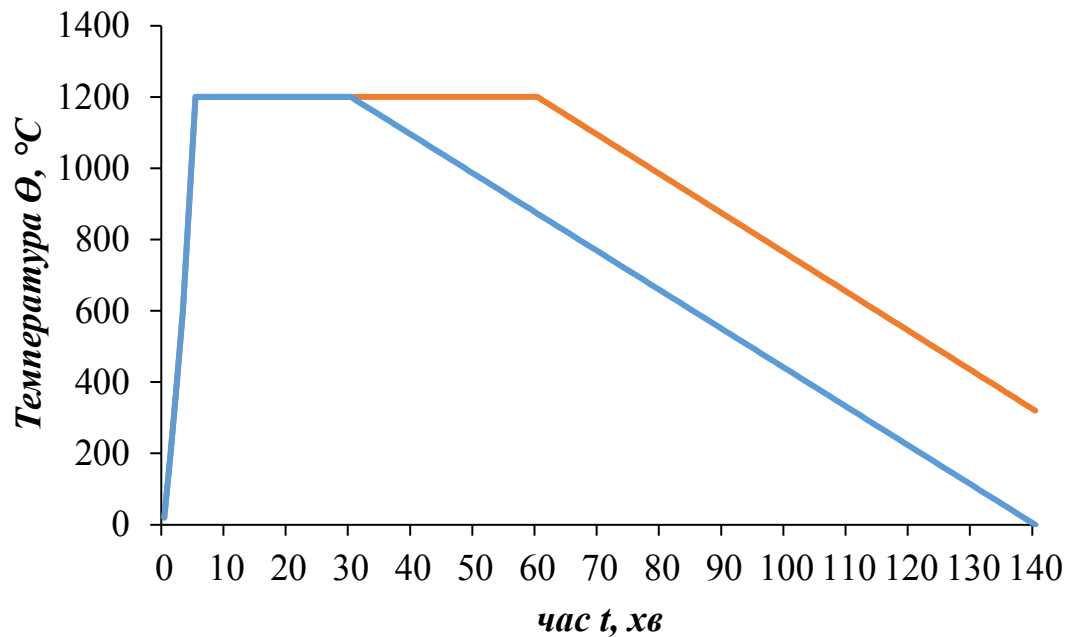


Рисунок 1.8 – Температурна часова залежність RABT [35]

Залежність RABT передбачає швидке температурне зростання до 1200 °C протягом 5 хв.

На рисунку 1.9 представлено узагальнені температурні криві залежностей враховуючи умови пожеж та досвід інших країн [35, 38, 42, 43, 44].

Останніми роками міжнародні дослідження зосереджені на визначення та класифікацію різних типів пожеж, що виникали в спорудах тунельного типу. Такі дослідження проводяться в діючих лінійно-кабельних спорудах та за умов проведення досліджень в лабораторіях та у спеціальних установках. Результатом проведених випробувань стали детально розроблені серії температурно-часових кривих, які описують різні варіанти розвитку пожеж рисунок 1.9.

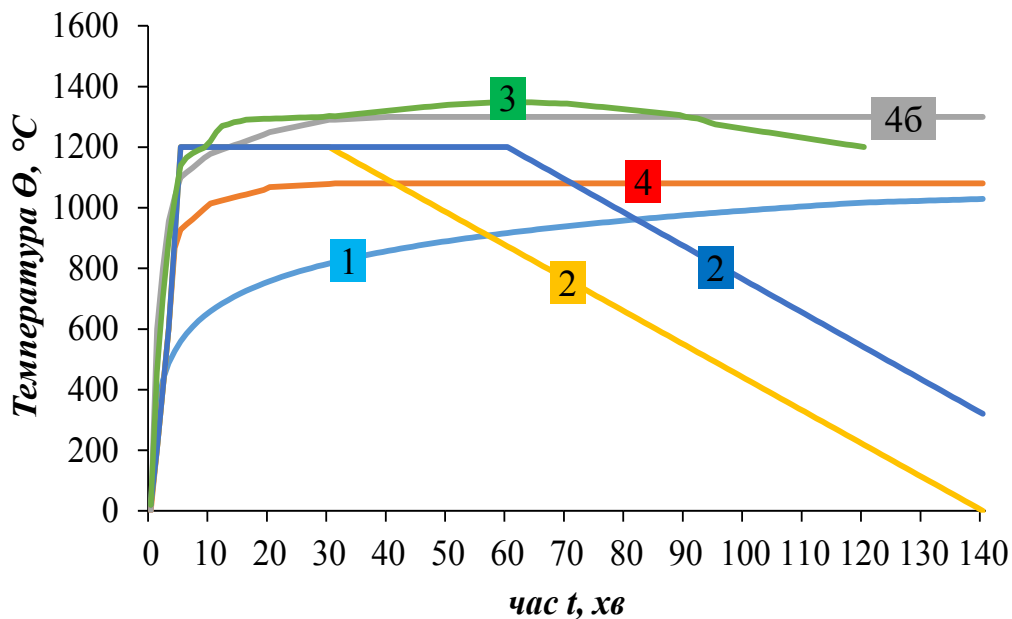


Рисунок 1.9 – Співвідношення між температурними кривими: 1-стандартна крива (рис. 1.5); 2 – RABT (рис. 1.8); 3 – RWS (рис. 1.7); 4 – вуглеводнева крива [43]; 4б – модифікована крива (4) [44]

Варто зазначити, що розрізняють об'ємні пожежі (пожежі у протипожежному відсіку) та локальні пожежі. Для об'ємних пожеж розподіл температури залежно від часу приймається рівномірним (середньооб'ємним), а локальних пожеж – нерівномірним.

Розрахунок температури газового середовища для пожеж у протипожежному відсіку повинен враховувати фізичні параметри приміщення, питоме пожежне навантаження, умови вентиляції тощо.

Розрахунок температури (теплових впливів) газового середовища локальної пожежі повинен бути наведений за неможливості об'ємного займання.

Отже, номінальними стандартизованими температурними режимами пожежі є: стандартний температурний режим; температурний режим зовнішньої пожежі; вуглеводневий температурний режим. Останній – найбільш жорсткий температурний режим та застосовується на об'єктах де наявні у великих кількостях нафта, мастило, бензин, дизель та ін.

Для визначення температурних режимів пожежі можуть застосовуватись як експериментальні так і розрахункові методи. Розрахункові методи більш сучасні менш об'ємні та описані в Єврокодах.

Крім того, слід звернути увагу, що не стандартизовані режими пожежі у замкнутих просторах (наприклад тунелях) мають етап падіння температури, що більш всього зумовлюється вигоранням кисню (окисника екзотермічної реакції горіння), що аналогічно може мати місце під час пожежі на автотрансформаторі, який розміщено у захисній споруді.

Слід зазначити, що вплив на будівельні конструкції температурного режиму вуглеводневої пожежі є досить жорстким режимом теплового впливу, особливо якщо врахувати фактично наявність замкнутого простору із обмеженим притоком свіжого повітря (окисника реакції горіння), що негативно впливає на економічній складовій реалізації проектів будівництва захисних споруд, в яких розташовують автотрансформатори.

#### **1.4 Аналіз типових рішень захисних споруд для автотрансформаторів**

За результатами аналітичних досліджень встановлено, що в Україні потужні трансформатори на 750 кВт мають типові конструктивні рішення, а захисні споруди, в яких розташовують такі автотрансформатори мають типові об'ємно-планувальні рішення [45].

На рисунках 1.10 та 1.11 зображені характеристики захисної споруди із автотрансформатором [46] (габаритні креслення автотрансформатора класу АТ 750 кВ), а у таблиці 1.5 наведено характеристики трансформаторного мастила, які потрібні були для подальшого дослідження [47-51]. Із характеристик захисної споруди для автотрансформатора уваги заслуговує такий параметр, як коефіцієнт прорізу у зовнішній огорожувальній конструкції значення якого становить 0,3 %, що теоретично матиме вплив на розвиток пожежі та її температурний режим оскільки обмежуватиме доступ кисню у зону горіння.



1-221 874ZZ(9 3)98

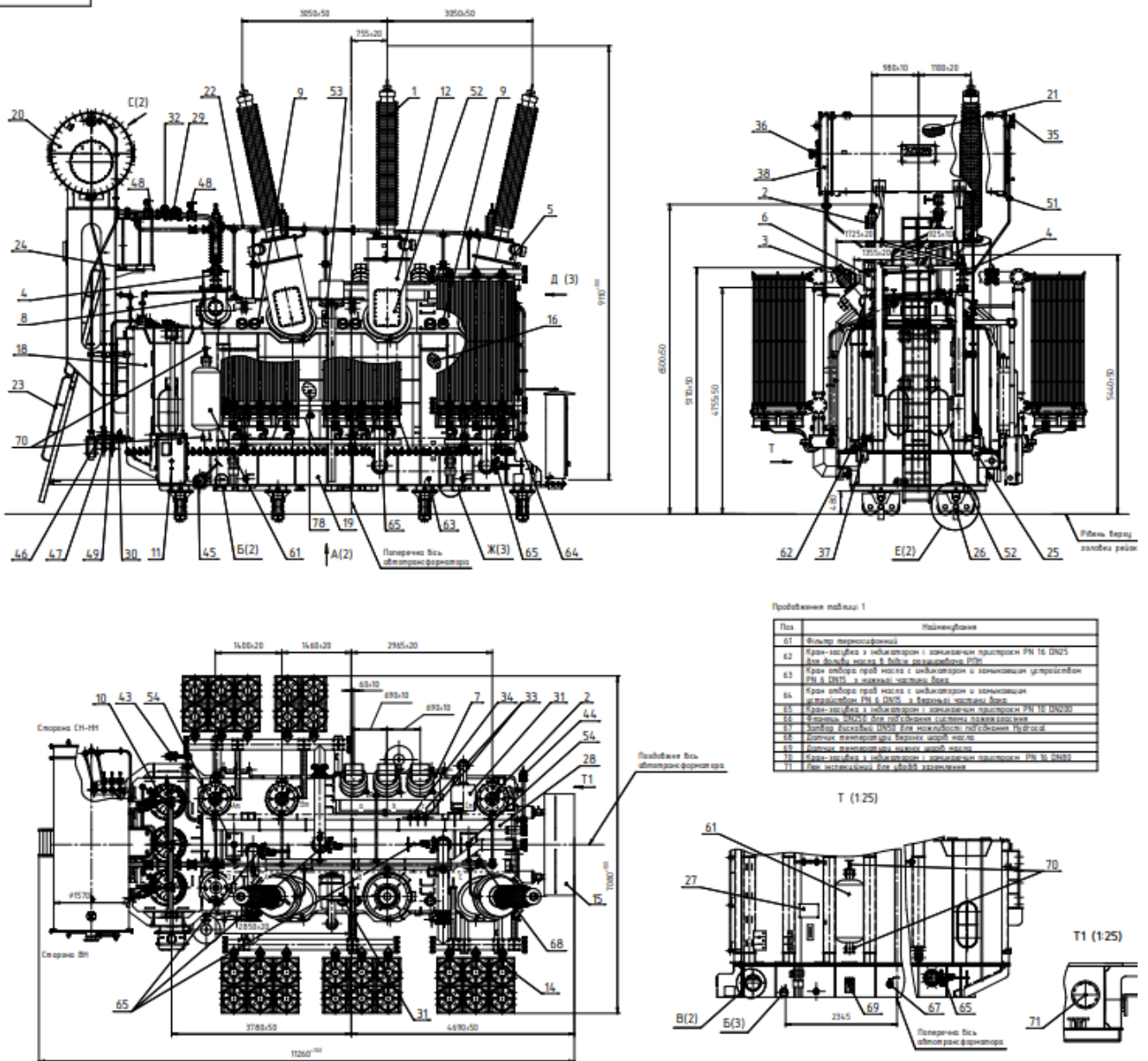


Рисунок 1.11 – Габаритні креслення автотрансформатора класу 330 кВ

Взагалі вогнестійкість підтверджується на основі таких параметрів: часовий, міцнісний, температурний. Порівняння за температурними параметром є найбільш поширеним методом за якого визначається критична температура для навантаження [52-54].

Останнім часом значну увагу, під час оцінки класу вогнестійкості будівельних конструкцій, приділяють параметричним температурним режимам, які дозволяють врахувати реальні характеристики пожежного навантаження та умови розвитку пожежі, що обумовлюють температурний вплив на будівельні конструкції. Такий

підхід дозволяє детально розробити криві «температура-час» для відповідних варіантів розвитку пожеж та найбільш обґрунтовано підійти до оцінки вогнестійкості будівельних конструкцій [56, 57].

Кількість трансформаторного мастила, яке розташовується у кожному із зазначених класів автотрансформаторів становить близько 60 т. Автотрансформатор класу 750 кВ оснащується автоматичною водяною системою пожежогасіння, яка спрацьовує через 180 секунд після виникнення пожежі – зазначена умова прийнята виключно для розрахункових сценаріїв цього звіту з метою розгляду двох сценаріїв поширення пожежі та зміни температурного впливу на будівельні конструкції, а саме коли система пожежогасіння не функціонує та коли функціонує.

Кожний із автотрансформаторів встановлюють в залізобетонний маслоприймач. Інформація по габаритним розмірам маслоприймачів під автотрансформатори класів 750 кВ та 330 кВ, яка була взята з проєктів реконструкції підстанцій з влаштування захисту II рівня наведена у таблиці 1.4. Маслопроводи, як правило виконують з використанням безнапірних бетонних труб з внутрішнім діаметром 400 мм.

Таблиця 1.4 – Інформація по габаритним розмірам маслоприймачів під автотрансформатори класів 750 кВ та 330 кВ

Назва підстанції	Тип АТ	Габарити маслоприймача ДхШхВ, м
ПС 330 кВ	АТДЦТН- 125000/330/150	17х15х0,37
ПС 750 кВ	АОДЦТН- 333000/750/330	17х15х0,37

Таблиця 1.5 – Технічні характеристики трансформаторного мастила

№ п.п	Найменування основних параметрів	Параметри, що вимагаються	Метод випробування
1	Відповідність стандартам	IEC 60296	
2	Кінематична в'язкість, мм <sup>2</sup> /с, не більше за		ISO 3104
	при +40 °С	12	
	при -30 °С	1800	
3	Температура застигання, °С, не більше	- 40	ISO 3016
4	Температура спалаху, °С, не менше	135	ISO 2719
5	Вологовміст, мг/кг, не вище:	30	IEC 60814
6	Зовнішній вигляд	Прозоре, вільне від осаду та зважених	-
7	Густина за температури 20 °С, кг/дм <sup>3</sup> , не більше	0,895	ISO 3675
8	Кислотне число, мг КОН/г масла, не більше	0,01	IEC 62021-1
9	Корозійна сірка	некорозійна	DIN 51353
10	Вміст антиокислювальної присадки, %	0,08 – 0,4	IEC 60666
11	Стабільність проти окислення (500 год при температурі 120 °С), не вище:		IEC 61125 С
	повна кислотність, мгКОН/г, не більше	1,2	
	осад, %, не більше	0,8	
	Тангенс кута діелектричних втрат за температури 90 °С, %, не більше	50	
12	Пробивна напруга, кВ, не менше:		IEC 60156
	під час поставки	30	
	після лабораторного оброблення проби	70	
13	Тангенс кута діелектричних втрат за температури 90 °С і частоти 50 Гц, не більше	0,005	IEC 60247
14	Гарантійний термін зберігання – не менше 5 років з моменту приймання продукції		
15	Технічна документація:		
15.1	Оригінал сертифікату (протоколу, паспорта) виробника масла, в якому наведені значення	По 1 примірнику на кожну цистерну	

Також в захисній споруді трансформатора опалення приміщення розташування трансформатора проектом не передбачається, вентиляція

приміщення розташування трансформатора передбачається механічна та природна, витяжка - механічна, виконується з верхньої зони через витяжні отвори 1000 мм x 1000 мм, потужність двигунів 44,0 кВт. Двигуни стоять лише у верхній зоні (4 отвори – 4 двигуни).

Проектом передбачено каскадну роботу вентиляторів систем. В кожній системі проектом передбачено по 2 вентилятора, 50 % від загальної продуктивності однієї системи. Загальна кількість витяжного повітря становить 143 300 м<sup>3</sup>/год. Витрата повітря на 1 систему становить  $143\,300 / 2 = 71\,650$  м<sup>3</sup>/год. Продуктивність одного вентилятора системи становить:  $71\,650 / 2 = 35\,825$  м<sup>3</sup>/год. Витяжний вентилятор вмикається від температурного датчика, який розміщено на стіні приміщення на відмітці 12 метрів над підлогою приміщення [46].

Приплив повітря – природній, за рахунок вільного руху повітря в середині приміщення трансформатора через отвори в стінах за рахунок розрідження повітря через роботу витяжної вентиляції.

Даний проект виконаний у відповідності з вимогами [14, 58 та 59] в частині протипожежних заходів. В якості протипожежних заходів проектом передбачено:

- вентилятори працюють безперебійно при температурі повітря до 80 °С, та мають клас захисту електродвигунів IP54;
- автоматичне вимкнення систем вентиляції з механічним спонуканням у разі виникнення пожежі від центру приймального пожежних сповіщень та зв'язку в приміщенні диспетчерської.

На рисунку 1.12 наведено планувальні рішення нижньої плити приміщення захисної споруди із отворами для встановлення вентиляторів. Розміри отворів 1000 мм x 1000 мм. Вентилятори можуть безперебійно працювати при температурі повітря до 80 °С та мають клас захисту електродвигунів IP54.

Автоматизація системи вентиляції передбачає:

- автоматичний вибір робочого та резервного обладнання для рівномірного часу напрацювання;
- автоматичне вмикання резервного вентилятора при аварійній зупинці основного;

- автоматичний контроль і підтримку заданих параметрів систем вентиляції;
- управління і контролю стану обладнання;
- забезпечення енергозбереження;
- відключення вентиляції під час пожежі передбачено системою автоматичної пожежної сигналізації будівлі шляхом подачі відповідного сигналу на шафу автоматики при спрацюванні основного захисту автотрансформатора.

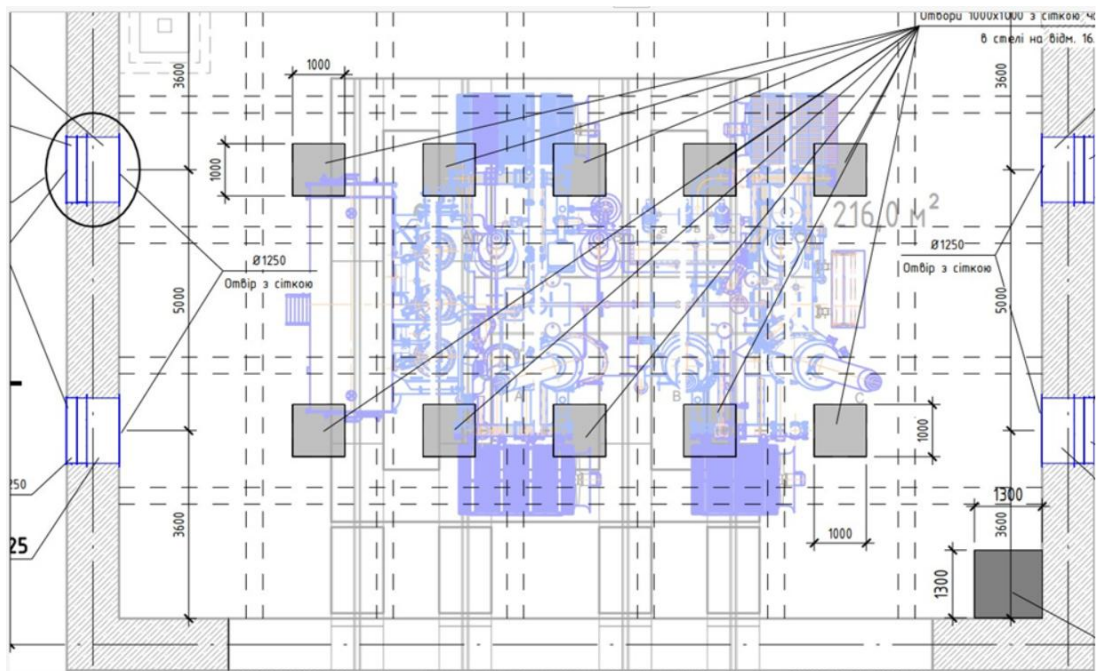


Рисунок 1.12 – Планувальні рішення нижньої плити приміщення захисної споруди із отворами для встановлення вентиляторів

На рисунку 1.13 схематично показано розріз захисної споруди в якій встановлено автотрансформатор

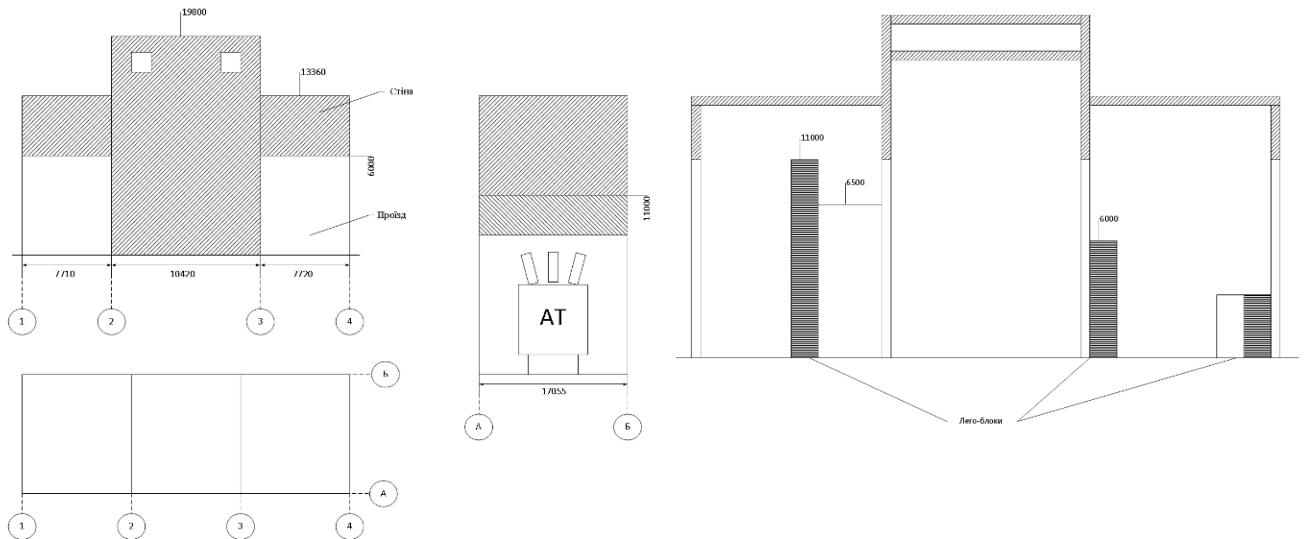


Рисунок 1.13 – Схематичне зображення захисної споруди у розрізі в якій встановлено автотрансформатор

На рисунку 1.14 схематично зображено план захисної споруди в якій встановлено автотрансформатор

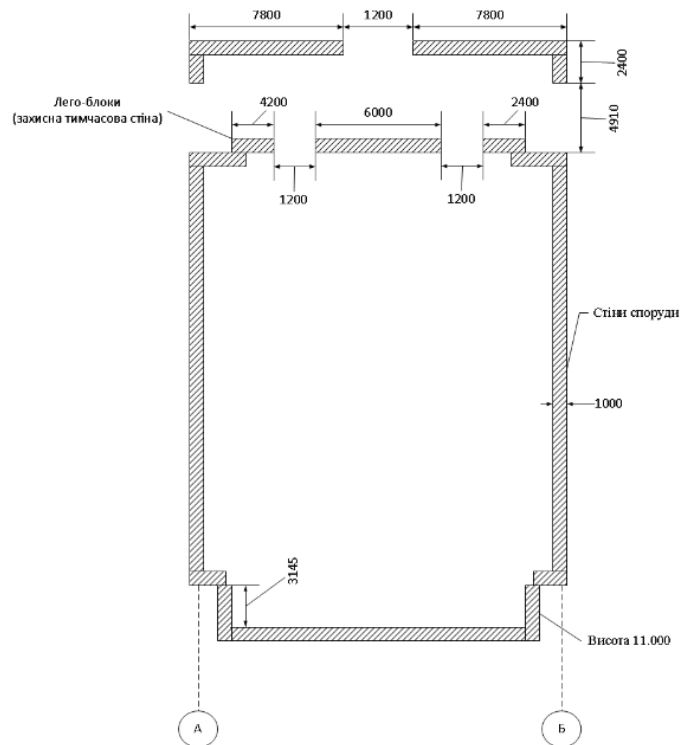


Рисунок 1.14 – Схематичне зображення плану захисної споруди в якій встановлено автотрансформатор

## 1.5 Висновок за першим розділом

За статистикою, половина пожеж в енергетичному секторі пов'язана саме з трансформаторним обладнанням. В Україні функціонує 137 підстанцій, сумарна трансформаторна потужність яких сягає 78,6 тис. МВт. Трансформатори виконують ключову роль у з'єднанні потужностей генеруючих об'єктів з розподільчими мережами та споживачами. Саме тому такі об'єкти як трансформаторне обладнання стали пріоритетною ціллю з моменту повномасштабного вторгнення агресора на територію нашої держави. За час воєнного стану по трансформаторному обладнанню ворог наніс близько 600 ударів. Саме тому в Україні розроблена концепція «Країна - Фортеця» згідно із якою вимоги до несучих конструкції каркасу та перекриття захисної споруди для автотрансформаторів слід виконувати з класом вогнестійкості не нижче ніж REI 90 за умов впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі. Слід зазначити, що вплив на будівельні конструкції температурного режиму вуглеводневої пожежі є досить жорстким режимом теплового впливу, особливо якщо врахувати фактично наявність замкнутого простору із обмеженим притоком свіжого повітря (окисника реакції горіння), що негативно впливає на економічній складовій реалізації проектів будівництва захисних споруд, в яких розташовують автотрансформатори [60].

Питаннями запобігання виникненню пожеж та їх гасіння в електроустановках, зокрема на маслонаповнених трансформаторах, займалися такі вітчизняні та зарубіжні вчені як: Ніжник В.В., Климась Р.В., Іллюченко П.О. Лінчевський Є.А., Поздєєв С.В., Marc Foata. Питаннями дослідження температурних режимів пожеж в різних умовах займалися такі вчені як: Поздєєв С.В., Нуянзін О.М., Некора О.В, Некора В.С., Отрош Ю.А., Веселівський Р.Б та інші. Однак, у цих працях недостатньо досліджені процеси зміни температури під час пожежі на автотрансформаторах, що розташовані в захисних спорудах.

Для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для трансформатора найбільш доцільно використовувати параметричну температуру

реальної пожежі, що дозволить врахувати найбільш важливі параметри, які впливають на розвиток пожежі у таких спорудах, зокрема: пожежна навантага, оснащеність системами протипожежного захисту, наявність прорізів для доступу окисника для підтримання умов горіння тощо [61].

З урахуванням викладеного, проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування температурного режиму під час пожежі в захисних спорудах для автотрансформатора, що розташовані є актуальним науковим завданням.

Метою проведення досліджень є встановлення 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 досліджень в області використання стандартизованих температурних режимів пожежі під час оцінювання класів вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд, в тому числі трансформаторів;

2) розробити математичні моделі тепломасопереносу при пожежі у захисній споруді для автотрансформатора, що дозволяють врахувати її конструктивні особливості та наявне пожежне навантаження на основі застосування чисельних методів комп'ютерної газогідродинаміки та обґрунтувати розрахункові сценарії;

3) виявити закономірності зміни температури під час пожежі у захисній споруді для автотрансформатора на основі обчислювальних експериментів температурних режимів пожежі на таких об'єктах;

4) розробити методику експериментальних досліджень і провести експериментальні дослідження температурного режиму у захисній споруді для автотрансформатора при врахуванні реального пожежного навантаження. Дослідити адекватність теоретичних даних за допомогою статистичних критеріїв достовірності;

5) розробити пропозиції до нормативно-правових актів щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних огорожувальних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів з використанням виявлених закономірностей зміни температури під час пожежі на таких об'єктах.

## **РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПІД ЧАС ПОЖЕЖІ НА АВТОТРАНСФОРМАТОРІ, ЩО РОЗТАШОВАНИЙ В ЗАХИСНІЙ СПОРУДІ**

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання другого та третього завдання дослідження, а саме обґрунтування математичних моделей тепломасопереносу при пожежі у захисній споруді для автотрансформатора, що дозволяють врахувати її конструктивні особливості та наявне пожежне навантаження на основі застосування числових методів комп'ютерної газогідродинаміки та обґрунтування розрахункових сценаріїв пожежі та результати числових експериментів щодо вивчення температурних режимів пожежі у захисній споруді для автотрансформатора, встановлені закономірності зміни температури під час пожежі на таких об'єктах.

### **2.1 Математична модель для дослідження температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторі, який розміщено в захисній споруді**

#### **2.1.1 Обрання розрахункового сценарію**

Для обрання розрахункового сценарію здійснюємо збирання даних про будівлю чи споруду, що включає:

- об'ємно-планувальні рішення;
- теплофізичні характеристики будівельних конструкцій і розміщеного обладнання;
- вид, кількість і розміщення горючих речовин і матеріалів;
- системи пожежогасіння та вентиляції [62].

Вибір розрахункового сценарію проводиться із міркувань, за яких очікуються найгірші наслідки щодо подальшого розвитку пожежі, при цьому слід також врахувати:

- можливі місця виникнення пожежі;
- можлива динаміка розвитку пожежі;
- склад і характеристики системи протипожежного захисту.

- пожежа виникає в приміщенні із найбільш пожежонебезпечним навантаженням та найменшим за об'ємом [63].

Виходячи із зазначеного розглянемо два сценарія 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 водяного пожежогасіння відсутня. Розрахункова площа становить 348 м<sup>2</sup>, розрахункова висота становить 18 м. Розвиток пожежі приймаємо як для кругової форми. Вихідні параметри характеристик трансформаторного мастила для розрахунку приймаємо як для трансформаторного мастила згідно із [64, 65].

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 водяного пожежогасіння наявна та спрацювала належним чином на 180 с після початку виникнення горіння. Розрахункова площа становить 348 м<sup>2</sup>, розрахункова висота становить 18 м. Розвиток пожежі приймаємо як для кругової форми. Вихідні параметри характеристик трансформаторного мастила для розрахунку приймаємо як для трансформаторного мастила згідно із [64, 65].

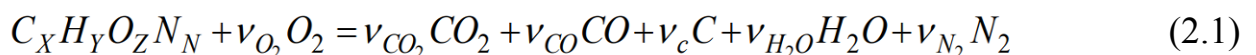
### 2.1.2 Опис математичної моделі

Розрахунок температурного режиму під час пожежі автотрансформатора, який розташований в захисній споруді проводимо за польовою моделлю використовуючи реакцію простої стехіометрії (трансформаторне мастило може містити тільки атоми вуглецю, водню, кисню та азоту) [66].

У більшості випадків в FDS застосовується одноступінчаста хімічна реакція, результати якого передаються через двох параметричну модель частки в суміші (mixture fraction model). "Частки в суміші" у даному змісті - це скалярна величина, яка надає масову частку одного або більш компонентів газу в даній крапці потоку.

За замовчуванням розраховуються два компоненти суміші: масова частка незгорілого трансформаторного мастила й масова частка згорілого трансформаторного мастила (тобто продуктів згоряння). Двоступінчаста хімічна реакція із трьох параметричним розкладанням частки в суміші розкладається на одноступінчасті реакції - окиснення трансформаторного мастила до монооксиду вуглецю й окиснення монооксиду до діоксиду. Три компоненти в цьому випадку - незгоріле трансформаторне мастило, маса трансформаторного мастила, яка завершила перший крок реакції й маса трансформаторного мастила, яка завершила другий крок реакції. Масова концентрація всіх основних реагентів і продуктів може бути отримана за допомогою "співвідношення стану". Також можна використовувати багатокрокову реакцію з кінцевою швидкістю протікання [67].

Реакція горіння для простої стехіометрії має наступний вигляд:



Променистий теплообмін включений у модель за допомогою розв'язку рівняння переносу випромінювання для сірого газу й, для деяких обмежених випадків, з використанням широкодіапазонної моделі. Рівняння вирішується за допомогою методу, аналогічного методу контрольних об'ємів для конвективного переносу (FVM). Коефіцієнти поглинання сажею й димом обчислені за допомогою вузькополосної моделі RADCAL. Геометрія FDS вирішує основні рівняння на прямокутній сітці. Перешкоди зобов'язано бути прямокутними, щоб задовольняти параметри сітки [68].

На всіх твердих поверхнях задаються теплові граничні умови, плюс дані про горючість матеріалу. Тепло- і масопереносу із поверхні й назад розраховується за допомогою емпіричних співвідношень.

Для відображення та візуалізації результатів моделювання програми FDS використовується спеціальна програма SmokeView [69-71].

FDS реалізує обчислювальну газодинамічну модель (CFD) тепломасопереносу при горінні, чисельно вирішує рівняння Нав'є - Стокса для

низькошвидкісних температурно-залежних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму й теплопередачі при пожежі. У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є-Стокса [72, 73] складається з двох рівнянь:

- рівняння руху,
- рівняння нерозривності.

У векторному вигляді для нестисливої рідини їх записують у такий спосіб:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left[ \left( \frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right] + Q_{rad}, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left[ \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right] + Q_k, \quad (2.5)$$

де  $t$  – час;  $\rho$  – густина;  $V$  – вектор відносної швидкості;  $p$  – відносний тиск;  $\mu$  – молекулярна динамічна в'язкість;  $\mu_t$  – турбулентна динамічна в'язкість;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності суміші;  $Pr_t$  – турбулентне число Прандтля;  $Sc$  – число Шмідта;  $Sc_t$  – турбулентне число Шмідта;  $Y_k$  – концентрація  $k$ -го компонента реакції горіння.

Статичну ентальпію  $h$  суміші визначають за виразом:

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k \quad (2.6)$$

де  $T$  – температура;  $h_0$  – початкова ентальпія за температури  $T_0$ ;  
 $c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$  – теплоємність суміші за постійного тиску;  $H_k$  – теплота утворення  
 $k$ -го компонента.

Початковий член  $S$  визначають за виразом:

$$S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B, \quad (2.7)$$

де  $\rho_{hyd}$  – гідростатична густина;  $g$  – вектор гравітаційних сил;  $B$  – вектор сил обертання (центробіжної та Коріоліса), що обраховують за формулою:

$$B = -2\omega \times V, \quad (2.8)$$

де  $\omega$  – вектор кутової швидкості [74].

Для визначення турбулентної в'язкості застосовують різні варіанти, пов'язані зі способами визначення опосередкованих і флуктуаційних складників величин, що входять до рівняння Нав'є – Стокса. Ці способи визначення турбулентної динамічної в'язкості називають моделями турбулентності. Найбільше поширення має стандартна  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності. Згідно з цією моделлю, динамічну турбулентну в'язкість визначають за виразом [75]:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.9)$$

де  $C_\mu = 0,09$  – сталий коефіцієнт;  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії;  $k$  – турбулентна енергія.

Для визначення величин  $\varepsilon$  і  $k$  використовують рівняння, які доповнюють систему рівнянь Нав'є – Стокса, що мають вигляд:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon, \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.11)$$

де  $G$  – величина, яку визначають за виразом:

$$G = D_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad (2.12)$$

де величину  $D_{ij}$  визначають як

$$D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3} \left( \nabla \cdot \mathbf{V} + \frac{\rho k}{\mu_t} \right) \delta_{ij}, \quad (2.13)$$

Величину  $\delta_{ij}$ , яка входить до рівняння (2.13), визначають як:

$$S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (2.14)$$

Інші параметри, що входять до рівняння (2.2) і (2.3), є постійними.

Для замикання системи рівнянь (2.1) – (2.4) використовують рівняння стану ідеального газу [76, 77]. Для суміші газів його записують у вигляді:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (2.15)$$

де  $R_0$  – універсальна газова стала;  $M_k$  – молярна маса  $k$ -го компонента.

Рівняння, що описують горіння у двофазному потоці повітря й часток рідкого трансформаторного мастила.

Горіння представляє узагальнена хімічна вуглеводнева формула  $C_xH_yO_z$  ( $C_6H_6O$ ). Теплоту згорання рідкого трансформаторного мастила визначають за такою формулою:

$$LHV_{liq, fuel} = h_{liq, fuel}^0 - h_{CO_2}^0 \frac{44x}{12x + y + 16z} - h_{H_2O}^0 \frac{9y}{12x + y + 16z}, \quad (2.16)$$

де  $h_{lic, fuel}^0$ ,  $h_{CO_2}^0$ ,  $h_{H_2O}^0$  – теплоти утворення, вуглекислого газу й води;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – стехіометричні коефіцієнти для гасу, що дорівнюють відповідно 6, 6 і 0.

Газова фаза являє собою суміш із п'яти газів, тому основна система (2.2)–(2.5) доповнена ще п'ятьма рівняннями для кожного зі складників суміші газів: летких  $C_xH_yO_z$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$  і  $CO_2$ , що мають вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left( \left( \rho D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_i^P + Q_i^{chem}, \quad (2.17)$$

де вихідний член  $Q_i^{chem}$  дорівнює швидкості бруто-реакції газофазного горіння для першого рівняння летких, для інших – рівний нулю.

Вихідні члени компонентів суміші для основних рівнянь системи (2.2) – (2.5) визначені за виразами:

$$Q_i^P = \sum_j (m_{i,in} - m_{i,out}) \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.18)$$

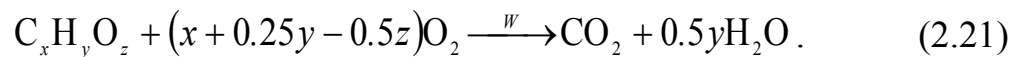
$$\bar{Q}_{mom}^P = \sum_j \frac{\pi r_p^2}{2} C_{Dj} \rho_g |V_g - V_p| (V_g - V_p)_j \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.19)$$

$$Q_{enth}^P = \sum_j (m_{i,in} h_{i,in} - m_{i,out} h_{i,out}) \frac{N_{pj}}{\Omega_{cell}}, \quad (2.20)$$

де індекс  $i$  стосується газового компонента, а індекс  $j$  – відповідної траєкторії частки;  $N_{pj}$  – число часток, що пролітають за секунду по траєкторії;  $\Omega_{cell}$  – об'єм

розрахункового осередку;  $C_{Dj}$  – коефіцієнт опору часток, що летять по траєкторії;  $\rho_g$  – щільність газової фази;  $r_p$  – радіус частки.

Модель горіння визначають й витратами трансформаторного мастила, окисника і продуктів згорання. Кількісні співвідношення визначені за узагальненим хімічним рівнянням [78, 79]:



Швидкість реакції  $W$  визначають за стехіометричним коефіцієнтом:

$$i_{chem} = \frac{32(x + 0.25y - 0.5z)}{12x + y + 16z}. \quad (2.22)$$

Для обліку променистого теплообміну в газовому середовищі та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим матеріалом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу (P1). Ця модель побудована на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описаний рівнянням [80]:

$$\nabla \left( \frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0, \quad (2.23)$$

де  $E_r$  – щільність енергії випромінювання;  $E_b$  – рівноважна щільність енергії випромінювання, що визначають за рівнянням:

$$\alpha E_b = \alpha_m E_{b,m} + \alpha_p E_{b,p}, \quad (2.24)$$

$\alpha$  – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p, \quad (2.25)$$

$\beta$  – інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання:

$$\beta = \beta_m + \beta_p. \quad (2.26)$$

У рівняннях (2.22) – (2.25) використовувані величини мають такі позначення:

–  $\alpha_m, \alpha_p$  – коефіцієнти поглинання відповідно до газового середовища й часток;

–  $\beta_m, \beta_p$  – коефіцієнти розсіювання відповідно до газового середовища й часток;

–  $E_{b,m}, E_{b,p}$  – рівноважна щільність енергії випромінювання для газової фази та фази часток розсіювання відповідно до газового середовища й часток.

Перераховані величини визначають за формулами:

$$E_{b,m} = \sigma T_m^4, \quad (2.27)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j T_{pj}^4, \quad (2.28)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.29)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 N_j, \quad (2.30)$$

де  $\sigma$  – стала Стефана – Больцмана;  $T_{pj}$  – температура  $j$  – тої частки;  $N_j$  – кількість часток у комірці;  $\varepsilon_p$  – ступінь чорноти часток.

Вихідний член у рівнянні (2.1) визначають за рівністю:

$$Q_{rad} = -4\alpha n^2 (E_b - E_r), \quad (2.31)$$

де  $n$  – коефіцієнт заломлення середовища.

Методи чисельного розв'язання базових рівнянь моделі теплообміну. Базові рівняння системи Нав'є – Стокса для цього процесу можна записати в такому узагальненому вигляді [81]:

– рівняння дифузного типу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(TS \cdot f) = \frac{1}{PS} \nabla(DS \cdot \nabla f) + SST, \quad (2.32)$$

– рівняння дифузно-конвекційного типу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(TS \cdot f) + \nabla(CC \cdot Vf) = \frac{1}{PC} \nabla(DC \cdot \nabla f) + SST, \quad (2.33)$$

де узагальнені величини  $TC$  (Time Coefficient),  $CC$  (Convective Coefficient),  $PC$  (Prediffusion Coefficient) і  $DC$  (Diffusion Coefficient) визначають коефіцієнти рівняння за відповідних похідних, а величина  $SST$  (Scalar Source Term) задає вихідний член.

Для інтеграції узагальнених рівнянь (2.32) і (2.33), їх апроксимують для області, що дискретизує, за допомогою адаптивної локально подрібненої сітки. Апроксимовані для дискретної області узагальнені рівняння в ході реалізації неявної розрахункової схеми мають вигляд [82-89]:

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} = \frac{1}{TC} \nabla_h(DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \quad (2.34)$$

$$\frac{(TC \cdot f)^{n+1} - (TC \cdot f)^n}{\tau} \nabla^{(k,s)}(CC \cdot VF^{n+1}) = \frac{1}{PC} \nabla_h(DC \cdot \nabla_h f^{n+1}) + SST \quad (2.35)$$

де  $t$  – часовий крок;  $TC \cdot f$  – різницева апроксимація конвективного оператора, при цьому  $k = 1$  (1-й порядок точності), а  $s = 0$  (невраховане перенесення через ребра й вершини осередку);  $\nabla_h(DC \cdot \nabla_h f^{n+1})$  – різницева апроксимація дифузійного оператора.

Під час проведення розрахунків, умовно приймається що дим цілком складається із вуглецю. У довідкових джерелах немає даних по виділенню азоту і його похідних, тому приймаємо, що зміст азоту в трансформаторному мастилі дорівнює нулю,  $N = 0$ .

Параметр  $Y_{CO}$  - частка трансформаторного мастила, що йде на утворення чадного газу - аналогічний за змістом параметру  $L_{CO}$ :

$$Y_{CO} = L_{CO} \quad (2.36)$$

Параметр  $Y_s$  виходить з димоутворювальної здатності матеріалу:

$$Y_s = \frac{D_m}{K_m} = L_C \quad (2.37)$$

де  $K_m = 8700 \text{ м}^2 / \text{кг}$  (коефіцієнт світлового поглинання)

Параметри  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  виходять наступним чином з рівняння реакції закону збереження маси:

$$L_{H_2O} = 1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C \quad (2.38)$$

$$X = \nu_{CO_2} + \nu_{CO} + \nu_C = \left( \frac{L_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{L_{CO}}{M_{CO}} + \frac{L_C}{M_C} \right) M_f = \left( \frac{L_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{L_{CO}}{M_{CO}} + \frac{D_m}{K_m \cdot M_C} \right) M_f ,$$

$$Y = 2\nu_{H_2O} = 2 \frac{(1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C) M_f}{M_{H_2O}} ,$$

$$Z = 2\nu_{CO_2} + \nu_{H_2O} + \nu_{CO} - 2\nu_{O_2} = \left( 2 \frac{L_{CO_2}}{M_{CO_2}} + \frac{L_{CO}}{M_{CO}} + \frac{(1 + L_{O_2} - L_{CO_2} - L_{CO} - L_C)}{M_{H_2O}} - 2 \frac{L_{O_2}}{M_{O_2}} \right) M_f$$

У наведених виразах залишається одне невідоме - молярна маса трансформаторного мастила,  $M_f$ . Оскільки в довідниках наведені складні змісти

трансформаторного мастила, то однозначно визначити молярну масу неможливо. Тому для розрахунку використовуються молярні маси умовних, «базових» речовин, характерні для даного виду трансформаторного мастила.

Основні рівняння доповнюються математичними моделями, що мають враховувати супутні явища, а саме: модель конвективних та радіаційних потоків, модель стану газу, модель горіння (у вигляді узагальненого стехіометричного рівняння хімічної реакції, та швидкості хімічної реакції, що визначає кількість утворення відповідного компонента), модель турбулентності (великих вихрів, Смагоринського).

Для розв'язку системи рівнянь Нав'є-Стокса використовують один із чисельних методів (наприклад метод контрольних об'ємів або метод кінцевих різниць). Продуктивним та достатньо точним є метод кінцевих різниць за явною схемою «предиктор-коректор» коректора другого порядку точності по координатах температури і часу. Рішення польової моделі може реалізуватися в програмному забезпеченні Fire Dynamics Simulator (FDS) [90, 91].

### **2.1.3 Математична модель, що враховує конструктивні особливості приміщення**

В основу задачі для розроблення математичної моделі, що враховує конструктивні особливості приміщення закладено, що вона повинна враховувати геометрію приміщення, матеріали стін, теплообмін, акумуляцію тепла стінами та стратифікацію температури.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_{wall}) + \varepsilon \sigma (T^4 - T_{wall}^4) \quad (2.39)$$

де  $h$  - коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\varepsilon$  - ступінь чорноти поверхні;

$\sigma$  - стала Стефана–Больцмана;

$T_{wall}$  - температура стіни.

Рівняння теплопровідності у конструкціях

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (2.40)$$

де  $\rho$  - густина матеріалу стіни, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  - питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);

$k$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К);

$T$  - температура в товщині стіни, К;

$t$  - час, с.

Граничні умови (зв'язок з газовим середовищем) на межі «газ–стіна»:

$$-k_{wall} \frac{\partial T_{wall}}{\partial n} = h(T_{gas} - T_{wall}) + \varepsilon \sigma (T_{gas}^4 - T_{wall}^4) \quad (2.41)$$

де  $T_{gas}$  - температура газового середовища, К;

$h$  - коефіцієнт конвекції, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

#### 2.1.4 Математична модель, що враховує пожежне навантаження

В основу задачі для розроблення математичної моделі, що враховує пожежне навантаження закладено, що вона повинна враховувати фізико-хімічні характеристики матеріалу, який складає пожежне навантаження, кількість такого матеріалу, інтенсивність горіння, температуру газів та процес утворення диму.

Джерело тепла можна визначити за рівнянням:

$$\dot{q} = \dot{m}_f \cdot \Delta H_c \quad (2.42)$$

де  $\dot{q}$  - тепловиділення, Вт/м<sup>3</sup>;

$\dot{m}_f$  - швидкість вигорання палива, кг/с;

$\Delta H_c$  - теплота згоряння, Дж/кг.

Рівняння розвитку пожежі:

$$\dot{Q}(t) = \alpha t^2 \quad (2.43)$$

де  $\dot{Q}(t)$  - потужність пожежі, Вт;

$\alpha$  - коефіцієнт росту пожежі, Вт/с<sup>2</sup>.

Рівняння масопереносу компонентів:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = \nabla \cdot (D \nabla Y_i) + \dot{\omega}_i \quad (2.44)$$

де  $Y_i$  - масова частка компонента (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, інші продукти згорання);

$D$  - коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$\dot{\omega}_i$  - швидкість утворення/зникнення компонента, кг/(м<sup>3</sup>·с).

### 2.1.5 Математична модель, що враховує прорізи у зовнішніх стінах

В основу задачі для розроблення математичної моделі, що враховує прорізи у зовнішніх стінах закладено, що вона повинна враховувати притік кисню, вихід гарячих газів та формування димового шару та записується у вигляді рівняння масового потоку через отвір:

$$\dot{m} = C_d A \sqrt{2 \rho \Delta p} \quad (2.45)$$

де  $\dot{m}$  - масова витрата повітря, кг/с;

$C_d$  - коефіцієнт витрати ( $\approx 0.6-0.7$ );

$A$  - площа отвору, м<sup>2</sup>;

$\rho$  - густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$\Delta p$  - перепад тиску, Па.

## 2.2 Результати розрахунку температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторі, який розміщено в захисній споруді

Візуалізована 3D модель будівлі захисної споруди із автотрансформатором зображена на рисунку 2.1.

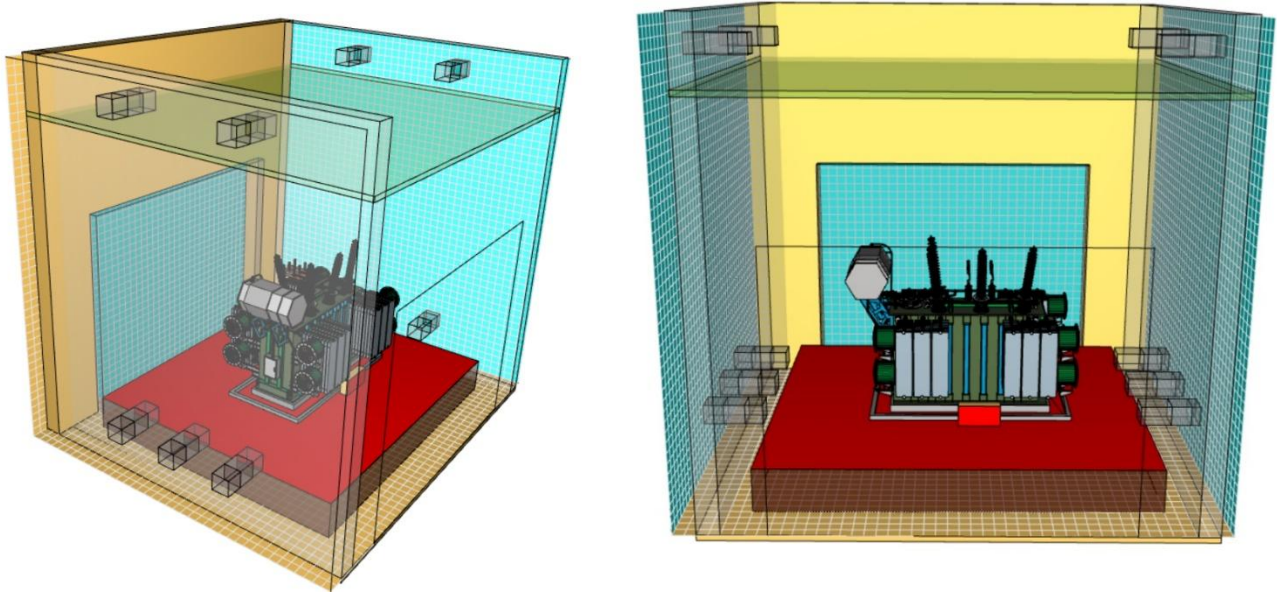


Рисунок 2.1 – Візуалізована 3D модель будівлі захисної споруди із автотрансформатором

Візуалізована 3D модель будівлі захисної споруди із автотрансформатором максимально відповідає даним проектної документації, перегородки в прорізах наведені прозорими для наглядності простору в середині, в якому розташовано автотрансформатор.

Схема розміщення осередку пожежі та датчиків вимірювання значення температури на рисунку 2.2. Слід відмітити, що датчики вимірювання температури встановлювали на відстані 100 мм від поверхонь огорожувальних будівельних конструкцій захисної споруди на трьох рівнях від відмітки підлоги, а саме на рівнях 1 м, 10 м та 18 м.

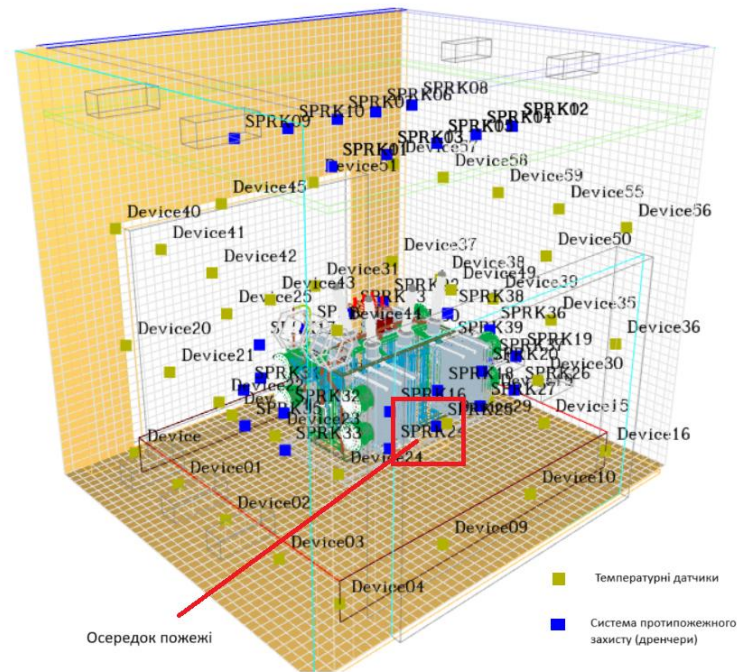


Рисунок 2.2 – Схема розміщення осередку пожежі та датчиків вимірювання значення температури

Відповідно до обраних сценаріїв пожежі, горіння відбувається в середині приміщення на всій його площі протягом всього часу моделювання. Допускається завершувати моделювання достроково в разі спостереження стабільного зниження температури за показами всіх датчиків вимірювання значення температури.

Датчики вимірювання значення температури розміщено безпосередньо по периметру приміщення де розміщується трансформаторне обладнання.

Результати відображення динаміки розповсюдження пожежі згідно із сценарієм № 1 представлено на рисунках 2.3 та 2.4.

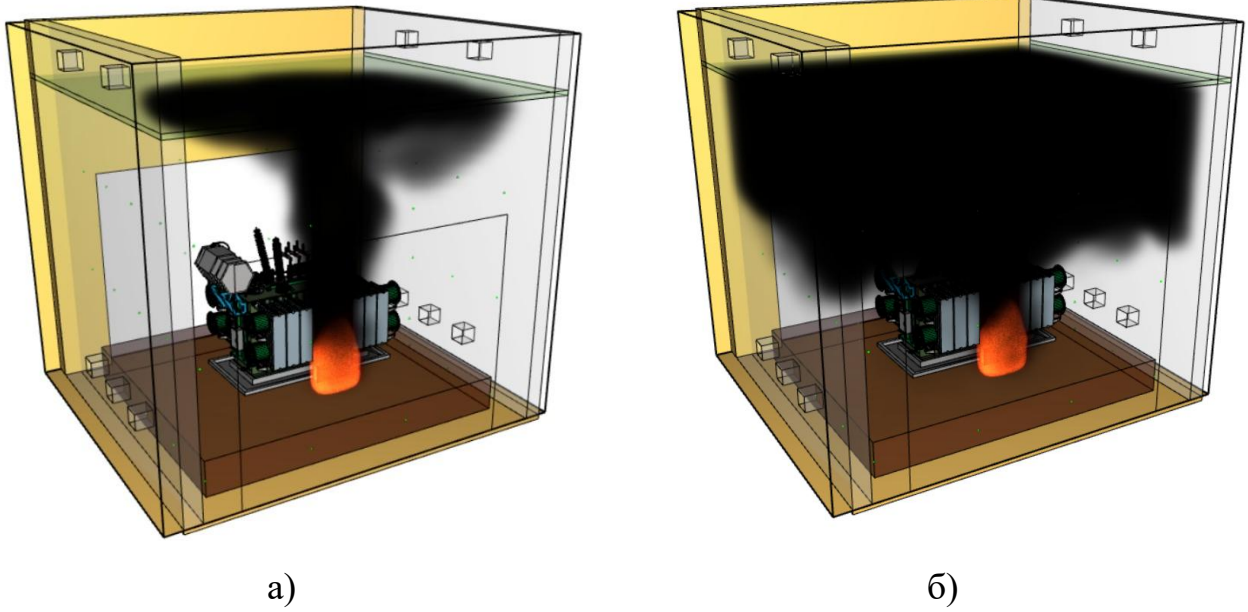


Рисунок 2.3 – Результати розрахунку поширення задимлення у просторі захисної споруди трансформатора згідно із сценарієм №1: а) на 1 хв розрахунку б) на 5 хв розрахунку

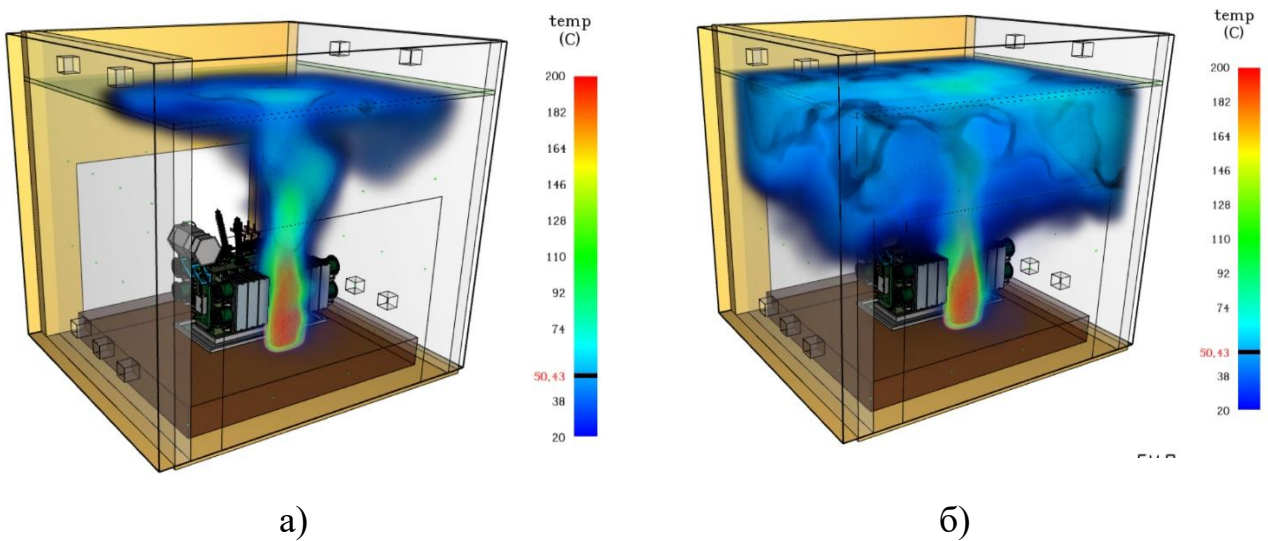


Рисунок 2.4 – Результати розрахунку підвищення температури у просторі захисної споруди трансформатора згідно із сценарієм №1: а) на 1 хв розрахунку б) на 5 хв розрахунку

Результати відображення динаміки розповсюдження пожежі згідно із сценарієм № 2 представлено на рисунках 2.5 та 2.6.

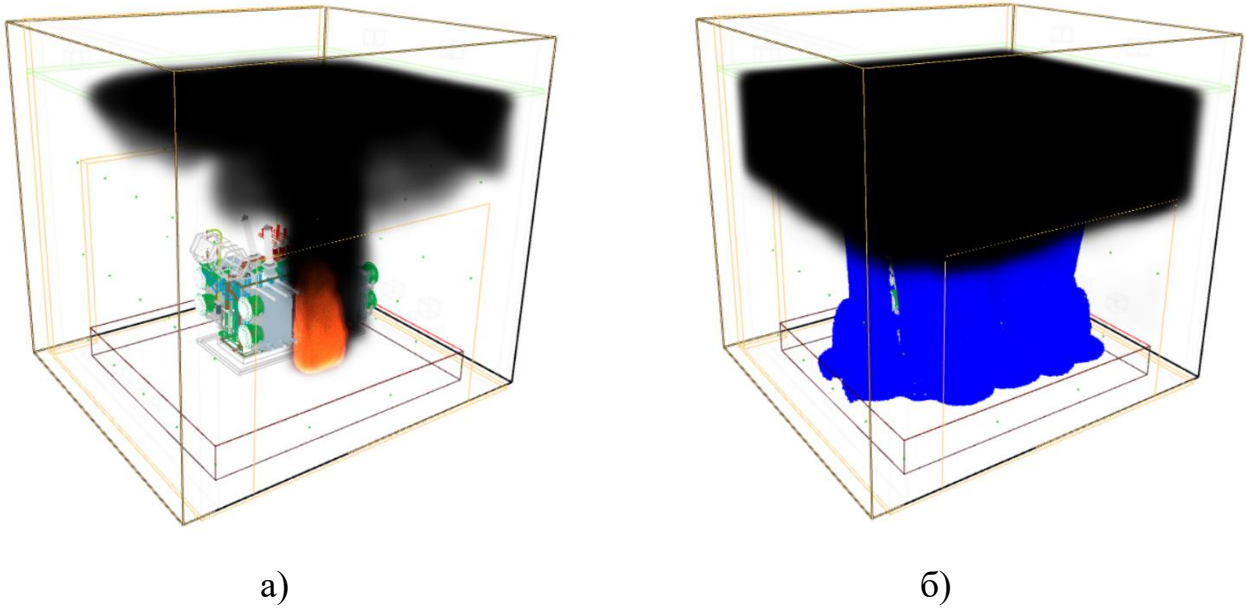


Рисунок 2.5 – Результати розрахунку поширення задимлення у просторі захисної споруди трансформатора згідно із сценарієм № 2: а) на 1 хв розрахунку б) на 5 хв розрахунку

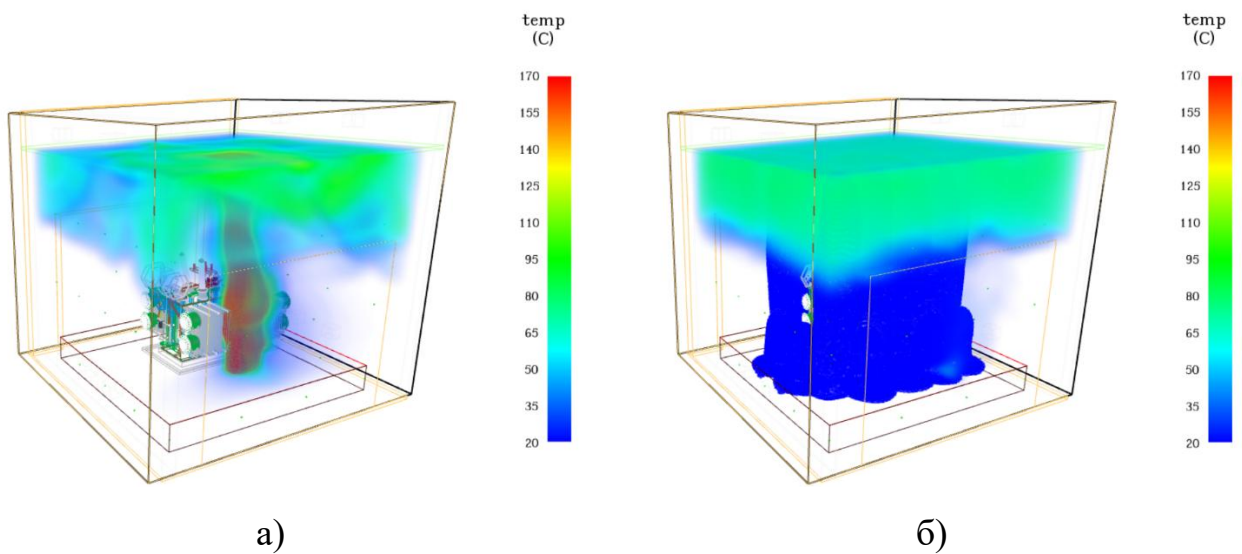
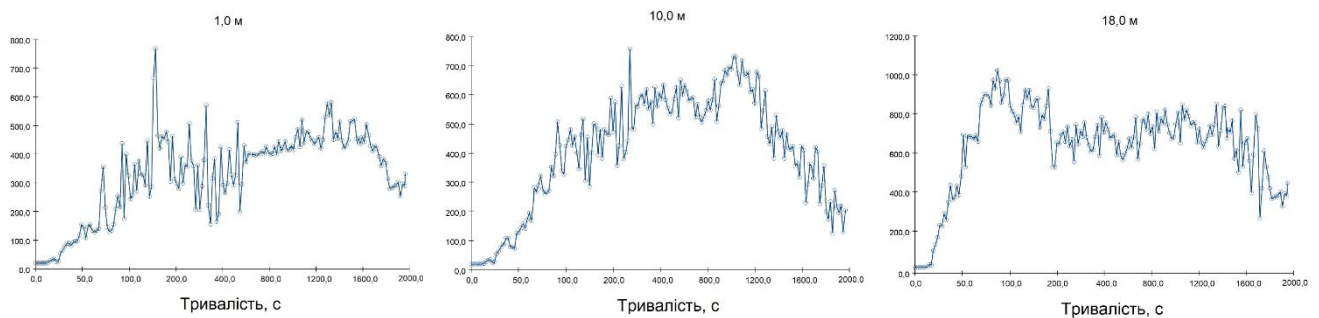


Рисунок 2.6 – Результати розрахунку підвищення температури у просторі захисної споруди трансформатора згідно із сценарієм № 2: а) на 1 хв розрахунку б) на 5 хв розрахунку

На рисунку 2.7 показано зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатора за даними датчика температури, що встановлено на

висотах 1 м, 10 м та 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді відсутня автоматична водяна система пожежогасіння (сценарій № 1).



а) для рівня устанавлення датчиків температур 1 м    б) для рівня устанавлення датчиків температур 10 м    в) для рівня устанавлення датчиків температур 18 м

Рисунок 2.7 – Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчика температури, що встановлено на висотах 1 м, 10 м, 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді відсутня автоматична водяна система пожежогасіння

Як бачимо із графіків, що датчик, який розташовано на висоті 18 м від рівня підлоги захисної споруди 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 споруди. На рисунку 2.8 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 водяна система пожежогасіння (сценарій № 1).

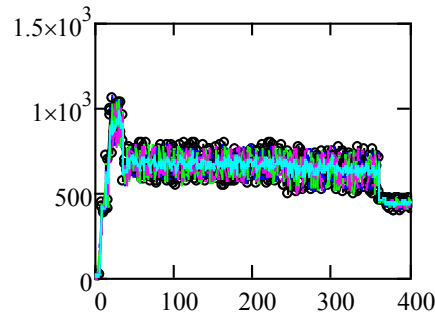


Рисунок 2.8 – Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчиків температури, що встановлено на висоті 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді відсутня автоматична водяна система пожежогасіння

Проведемо перевірку результатів досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса [92].

Для встановлення того, чи є найбільший результат в ранжованому ряду  $y_{jmax}$  викидом чи квазівикидом, розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmax}$  за формулою 2.46 [93].

$$G_{jmax} = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad (2.46)$$

де  $\bar{y}_j$  і  $S_j$  - відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 2.47 [92]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{S_j} \quad (2.47)$$

Розраховані таким чином значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [92].

Якщо після порівняння  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ( $G_{кр.5\%}$ ) і менше (або дорівнює) 1 %-го ( $G_{кр.1\%}$ ) критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), тоді значення  $u_{jmax}$  або  $u_{jmin}$  вважають квазівикидом.

Якщо розраховане значення  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  більше 1 %-го критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), то відповідно  $u_{jmax}$  або  $u_{jmin}$  вважають викидом.

Якщо розраховані значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  є меншими (або рівними) за критичні значення 5% ( $G_{кр.5\%}$ ), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рисунку 2.9.

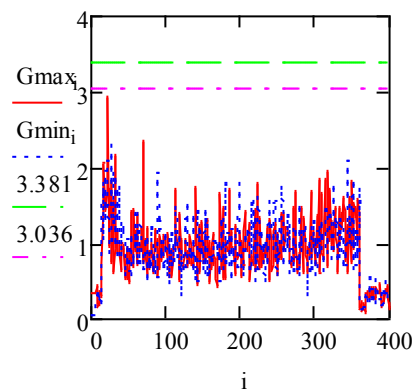
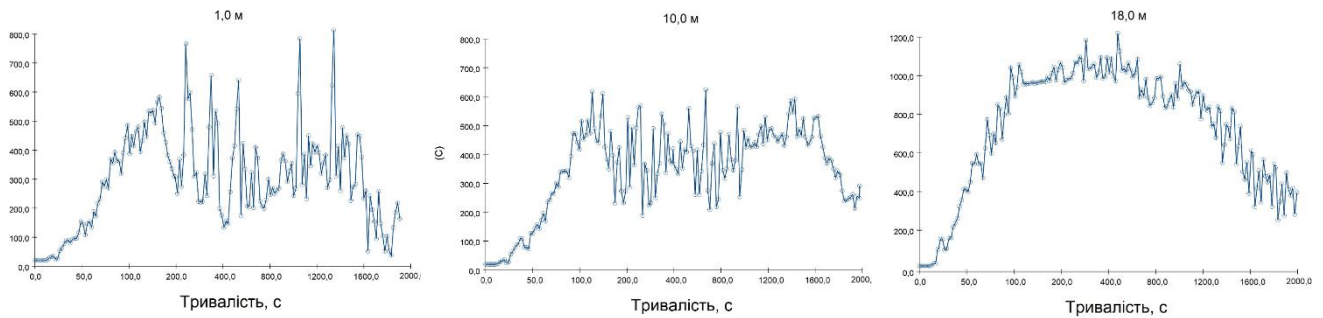


Рисунок 2.9 – Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса

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

На рисунку 2.10 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 водяна система пожежогасіння (сценарій № 2).



а) для рівня встановлення датчиків температур 1 м. б) для рівня встановлення датчиків температур 10 м. в) для рівня встановлення датчиків температур 18 м.

Рисунок 2.10 – Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчика температури, що встановлено на висотах 1 м, 10 м, 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді наявна автоматична водяна система пожежогасіння

За даними графіками аналогічна ситуація щодо найбільших значень температур на датчику, який розташований на відмітці 18 м від рівня підлоги захисної споруди, як і для сценарію № 1. На рисунку 2.11 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 наявна автоматична водяна система пожежогасіння (сценарій № 2).

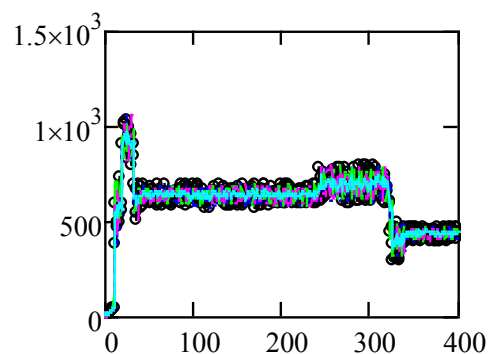


Рисунок 2.11 – Зміни температури в захисній споруді під час горіння автотрансформатору за даними датчиків температури, що встановлено на висоті 18 м над місцем виникнення горіння, коли у захисній споруді відсутня автоматична водяна система пожежогасіння

Проведемо перевірку результатів досліджень на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса [92] із використанням формул 2.46 та 2.47.

Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рисунку 2.12.

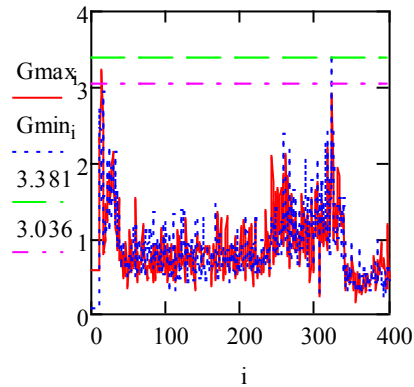


Рисунок 2.12 – Результати перевірки на наявність у дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса

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

### **2.3 Обґрунтування температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторах, що розташовані в захисних спорудах**

Сучасні силові трансформатори переважно використовують систему охолодження із застосуванням мінерального трансформаторного масла. Таке масло заповнює внутрішній простір корпусу трансформатора, витісняючи повітря, та як діелектрик забезпечує надійну електроізоляцію. Крім того, воно ефективно забирає тепло від обмоток та сердечника трансформатора. Проте мінеральне трансформаторне масло має суттєві недоліки, що підвищують ризики виникнення пожежонебезпечних ситуацій, адже воно є горючою рідиною, а його пари, змішуючись із повітрям, можуть спалахнути під впливом високої температури [94, 95].

Процес гасіння трансформатора пов'язане із охолодженням його нагрітих тепловим потоком компонентів і частин. При цьому охолодження металевих елементів значно подовжує тривалість гасіння, у кілька разів перевищуючи час, необхідний для припинення горіння масла на горизонтальній поверхні. [94].

На рисунку 2.13 наведено усереднену температурну криву отриману за результатами проведеного дослідження із показів датчиків термопар, які розташовані на рівні 18 м від рівня підлоги захисної споруди де влаштовано автотрансформатор для випадку, коли приміщення захисної споруди не оснащено автоматичною водяною системою пожежогасіння, 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.

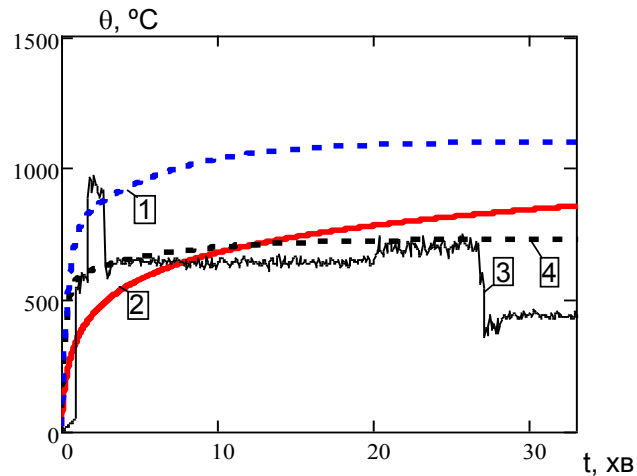


Рисунок 2.13 – Температурні криві режимів пожежі: 1 – вуглеводневий температурний режим пожежі; 2 – стандартний температурний режим пожежі; 3 – температурна крива режиму пожежі, отримана розрахунковим методом; 4 – модифікований вуглеводневий температурний режим пожежі

Вуглеводневий температурний режим пожежі

$$\theta_p(t) = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0, \quad (2.48)$$

де:  $t$  – час стандартного вогневого випробування, с;

$\theta_0$  – 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

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t / 60 + 1) + \theta_0, \quad (2.49)$$

Модифікований вуглеводневий температурний режим пожежі під час горіння трансформатора, який розташований у захисній споруді [96]:

$$\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0, \quad (2.50)$$

За результатами усередненої температурної кривої режиму пожежі, що отримана розрахунковим методом можна відмітити зниження температури горіння після 30 хв пожежі, що межу бути пояснено вигоранням пожежного навантаження та можна використати для обґрунтування нормованого класу вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій захисних споруд, в яких встановлено автотрансформатори та із урахуванням коефіцієнту запасу 1,2 має становити не менше ніж REI 45 [97].

## 2.4 Висновки за другим розділом

1. Обґрунтовано сценарії виникнення та розвитку пожежі, при якому слід обґрунтувати температурний режим пожежі на автотрансформаторі, який встановлено у захисній споруді.

2. Обґрунтовано набір математичних моделей, що дозволяють визначити закономірність зміни температури під час пожежі на захисній споруді для автотрансформатора, які спираються на рівняння Нав'є–Стокса, доповнені рівнянням стану газу по компонентах, тиску, зберігання моменту, компонентів і маси. Для розв'язання системи кінцево-різницевого рівнянь, які апроксимують диференціальні рівняння тепло- і масопереносу, застосовано програмний пакет FDS (Fire Dynamic Simulator)..

3. Встановлено модифікований вуглеводневий температурний режим пожежі під час горіння трансформатора, який розташований у захисній споруді та який можна визначити через залежність:

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

4. Клас вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій захисних споруд, в яких встановлено автотрансформатори має становити не менше ніж REI 45.

## **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ. ВЕРИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

У цьому розділі представлені результати щодо розв'язання четвертого та п'ятого завдання дослідження, а саме обґрунтування параметрів дослідного зразка із використанням методів фізичного моделювання або методів подібності для проведення експериментального дослідження, розроблення програми та методики експериментальних досліджень та результати експериментальних досліджень температурного режиму у захисній споруді для автотрансформатора при врахуванні реального пожежного навантаження, наведені результати перевірки щодо адекватності експериментальних та розрахункових даних за допомогою статистичних критеріїв достовірності статистичних гіпотез при порівняльному аналізі теоретичних та експериментальних результатів досліджень.

### **3.1. Розроблення програми та методики експериментальних досліджень**

#### **3.1.1 Обґрунтування зменшених параметрів макету споруди для експериментальних досліджень**

В якості основного обладнання для проведення експериментальних досліджень слід вибрати макет споруди, яка імітує захисну споруду для автотрансформатора. Як зазначено у розділі 1 реальні параметри захисної споруди для автотрансформатора становлять: висота – 19,8 м, ширина – 17 м, довжина – 10,5 м, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях – 0,03 %. Очевидно, що створювати нову, чи використовувати для експериментальних досліджень реально існуючу споруду є неможливим з точки зору економічних та безпекових показників. Тому, в такому випадку доречно застосувати теорію фізичного моделювання або теорію подібності [98, 99] з метою обґрунтування зменшених параметрів макету споруди для проведення експериментальних досліджень.

Фізичне моделювання або теорія подібності – це метод, коли замість реального об'єму (оригіналу, прототипу) досліджують його модель, яка подібна до нього за геометрією, фізичними процесами та умовами [100].

Фізична подібність може складатися із різних критеріїв, а саме:

- геометрична подібність, коли модель і об'єкт мають однакову форму, але різні розміри (усі довжини пропорційні). Під час реалізації геометричної подібності, доцільно притримуватися наступного принципу масштабування, коли обирається масштабний коефіцієнт, наприклад по довжині  $L_m = l_{\text{модель}} / l_{\text{об'єкту}}$ , після чого всі інші геометричні параметри масштабуються із урахуванням отриманого коефіцієнту. Таким чином, ширина та висота моделі мають бути визначені за формулами:

$$b = b_{\text{об'єкта}} L_m \quad (3.1)$$

$$h = h_{\text{об'єкта}} L_m \quad (3.2)$$

Геометричну подібність можна виразити у вигляді рівняння:

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{l'_1}{l'_2} = \text{const} \quad (3.3)$$

- кінематична подібність – співвідношення швидкостей у моделі і об'єкті повинні бути однаковими;

- динамічна подібність – сили, що діють у моделі й на натурному об'єкті повинні бути подібними між собою. Для того щоб забезпечити динамічну подібність у задачах теплообміну вводять безрозмірні критерії, наприклад: число Прандля (Pr), Нуссельта (Nu), Грасгофа (Gr), Фруда (Fr), Рейнольдса (Re), Маха (M), Біо (Bi) [101, 102] тощо.

Оскільки в нашому випадку досліджуються процеси теплообміну та теплопередачі, то важливо врахувати під час обґрунтування зменшених параметрів макету споруди для проведення експериментальних досліджень, такі критерії теорії

фізичного моделювання або теорії подібності: геометрична подібність динамічна подібність.

Таким чином, використовуючи теорію фізичного моделювання або теорію подібності проведемо дослідження щодо обґрунтування зменшених параметрів макету споруди для проведення експериментальних досліджень з визначення температурного режиму під час горіння трансформаторного масла в захисній споруді для автотрансформатора.

Визначаємо критерій геометричної подібності. Значенням масштабного коефіцієнту ( $\lambda$ ) приймаємо  $\lambda=0,23$ . Таким чином, якщо реальні параметри об'єкта становлять  $h=19,8$  м,  $b=10,5$  м,  $L=17$  м, то геометричні параметри моделі можуть відповідно становити  $h=4,6$  м,  $b=2,4$  м,  $L=3,9$  м, коефіцієнт прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях – 0,007 %, тобто сумарна площа прорізів у моделі повинна становити 0,023 м<sup>2</sup>. При цьому, висота прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях моделі повинна задовільнять умовам прийнятим у геометричній подібності.

Таблиця 3.1 – Результати визначення критерія геометричної подібності

Геометричний параметр	Масштабний коефіцієнт $\lambda$	Параметри об'єкту	Параметри моделі
Довжина, м	0,23	19,8	4,6
Ширина, м		10,5	2,4
Висота, м		17	3,9
Коефіцієнт прорізів, %		0,03	0,007

Визначаємо критерій динамічної подібності. Для пожеж у приміщенні коректно застосовувати подібність за числом Фруда (Fr). Число Фруда (Fr) — це безрозмірна величина, яка характеризує співвідношення інерційних сил до сил тяжіння у потоці та визначається за рівнянням:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (3.4)$$

де –  $v$  - характерна швидкість потоку (м/с),

$q$  - прискорення вільного падіння ( $\approx 9.81 \text{ м/с}^2$ ),

$L$  – довжина лінії вздовж якої направлений потік, м.

Безрозмірний тепловий потік слід визначати за рівняннями:

$$Q^* = \frac{q}{\rho c_p T \sqrt{g} H^{5/2}} \quad (3.5)$$

де  $Q$  – тепловий потік, кДЖ/с;

$\rho$  - густина повітря при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;

$c_p$  – питома теплоємність повітря при сталому тиску,  $\text{Дж/кгК}$ ;

$T$  – температура повітря,  $\text{К}$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$H$  – висота приміщення, м.

Масштаб теплового потоку із урахуванням критерія Фруда буде становити:

$$Q_m = Q_p \lambda^{5/2} \quad (3.6)$$

Із рівняння 3.6 можна визначити тепловий потік моделі, який повинен становити:

$$Q_m = 0,053 Q_p \quad (3.7)$$

На рисунку 3.1 зображена залежність теплового потоку моделі від теплового потоку об'єкту.



Рисунок 3.1 Залежність теплового потоку моделі від теплового потоку об'єкту

Відповідно масштаб по часу становитиме:

$$t_m = t_p \lambda^{1/2} \quad (3.8)$$

Із рівняння 3.8 можна визначити масштаб по часу моделі, який повинен становити:

$$t_m = 0,497 t_p \quad (3.9)$$

На рисунку 3.2 зображена залежність часу моделі від часу об'єкту.



Рисунок 3.2. Залежність часу моделі від часу об'єкту

Для подальших розрахунків використаємо тепло-фізичні характеристики трансформаторного мастила, які приведені у таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Тепло-фізичні характеристики трансформаторного мастила

Характеристика	Значення	Одиниці вимірювання
Питома теплота згорання	43	МДж/кг
Густина	870	кг/м <sup>3</sup>
Масова швидкість горіння	0,1	кг/м <sup>2</sup> с

Якщо в реальних умовах весь вміст масла розлити на всю площу підлоги, то утвориться шар масла товщиною 0,386 м. Масова витрата масла під час його горіння становитиме 17,85 кг/с, тепловий потік становитиме 767,7 МВт. За таких умов приблизний час повного вигорання масла становить 56 хв.

Використовуючи попередньо визначені коефіцієнти масштабування встановлено, що тепловий потік моделі повинен становити 23,3 МВт. Для того, щоб досягнути такого теплового потоку у моделі достатньо забезпечити такі витрати мастила під час його горіння 0,541 кг/с. Час горіння моделі за цим режимом

становить близько 27,9 хв. За таких умов об'єм масла в моделі повинен становити 905 кг або 780 л.

Таблиця 3.3 – Результати визначення критерія динамічної подібності

Геометричний параметр	Масштабний коефіцієнт $\lambda$	Параметри об'єкту	Параметри моделі
Тепловий потік, МВт	0,23	767,7	23,3
Швидкість вигорання масла, кг/с		17,85	0,541
Час горіння, хв		56	27,9
Об'єм масла, л		60000	780

Перевіримо об'єм масла для моделі використовуючи підходи геометричного моделювання по об'єму. Під час геометричного моделювання об'єм масштабується згідно із рівнянням:

$$V_m = V_p \lambda^3 \quad (3.10)$$

Із рівняння 3.10 можна визначити масштаб моделі по масштабу, який повинен становити:

$$V_m = 0,012 V_p \quad (3.11)$$

За таких умов об'єм масла в моделі повинен становити 730 л. Слід відмітити, що при відносно не великих значеннях площі та великого об'єму трансформаторного мастила, об'єм мастила за таких умов більшою мірою характеризує тривалість вільного горіння а не потужність теплового виділення під час пожежі. Разом із цим враховуючи результати фізичного моделювання об'єм мастила для моделі під час експериментального дослідження пропонується прийняти 750 л.

Отже, при збереженні критерію Фруде у фізичному моделюванні можливо адекватно відтворити теплогазообмінні процеси пожежі в приміщеннях з різними

геометричними масштабами, що забезпечує коректність екстраполяції під час планування експериментального дослідження. При цьому, масштаб моделі приймаємо 0,23. Матеріал огорожувальних конструкцій моделі, залізобетонні стіни та покриття. Площа прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях повинна становити  $0,023 \text{ м}^3$  при цьому отвори створюємо у верхній частині моделі. Тепловиділення моделі масштабується відносно об'єкту за рівнянням  $Q_m=0,053Q_p$ . Часові характеристики скорочуються відповідно до співвідношення  $t_m=0,497t_p$ .

Таким чином, вперше встановлено, що основні параметри процесу зміни температури в захисній споруді для автотрансформатора можуть підлягати закону подібності під час масштабування її експериментального зразка: тепловиділення моделі масштабується відносно об'єкту за рівнянням  $Q_m=0,053Q_p$ , часові характеристики скорочуються відповідно до співвідношення  $t_m=0,497t_p$ .

### **3.1.2 Програма та методика експериментальних досліджень**

#### *Обладнання для досліджень*

Обладнання для проведення вогневих досліджень включає: вогневий бокс розмірами висотою 3,9 м, довжиною 4,6 м та шириною 2,4 м, модельне вогнище пожежі класу В (377 В), засоби вимірювальної техніки, обладнання для проведення фото та відео зйомок.

#### *Конструкція вогневої камери*

Вогнева камера є інженерною спорудою, призначеною для моделювання умов пожежі. Вона має форму паралелепіпеда з внутрішніми розмірами  $4,89 \text{ м} \times 3,3440 \text{ м} \times 2,571 \text{ м}$ . Камера виконується у вигляді монолітного або збірного залізобетонного блоку, виготовленого з високоміцного бетону з класом вогнестійкості не нижче REI 180. Конструкція включає стіни, підлогу та стелю з армованого бетону товщиною не менше 200 мм, що забезпечує необхідний рівень термостійкості, герметичності та механічної міцності. Вхід здійснюється через металеві ворота, а технологічні отвори та патрубки дозволяють підключати

інженерні системи та засоби контролю за температурою. В об'ємі вогневої камери розміщується деком для збирання пального. Вогнева камера використовується для проведення досліджень, спрямованих на оцінювання динаміки зміни температурного режиму у приміщенні, а також на визначення потенційного температурного впливу на зовнішні огорожувальні конструкції з метою встановлення обґрунтованих вимог щодо їх мінімально необхідного класу вогнестійкості. Така конструкція дозволяє створити контрольоване середовище для проведення випробувань, вивчення поведінки конструкцій і обладнання в умовах впливу високих температур. На рисунку 3.3 наведено зовнішній вигляд вогневої камери.

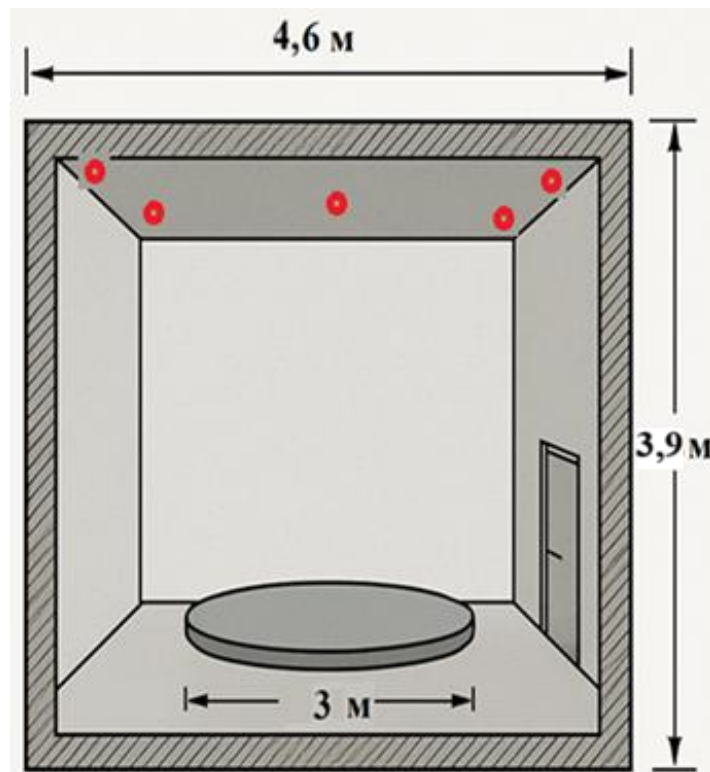


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд вогневої камери

*Модельне вогнище пожежі класу В (233В)*

Під час досліджень, в якості модельного вогнища, яке встановлено в об'ємі вогневої камери використовують модельне вогнище пожежі класу В (233В) [103], що представляє собою металеве деко діаметром  $3000,0 \pm 40,0$  мм, висотою борта

200 ± 5,0 мм та товщиною стінки борта 3,0±0,5 мм, яке встановлено по середині моделі захисної споруди автотрансформатора. Вогнище пожежі заповнювалося трансформаторним маслом, для підпалювання трансформаторного масла у вогнище пожежі заливали 10 л бензину. На рисунку 3.4 наведено фото модельного вогнища пожежі класу В (233В) встановленого в моделі захисної споруди для автотрансформатора.



Рисунок 3.4 – Фото модельного вогнища пожежі класу В (233В)

#### *Засоби вимірювальної техніки*

Перелік засобів вимірювальної техніки, які використовуються під час вогневих досліджень, а також їх технічні характеристики приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Перелік засобів вимірювальної техніки

№ з/п	Найменування і тип ЗВТ	Характеристика	Діапазон вимірювання	Клас точності, похибка ЗВТ
1.	Рулетка	лінійні розміри	від 0 до 5000 мм	2 клас точності, $\Delta = \pm 1$ мм
2.	Термопара	температура	від 0 до 1200 °С, від 0 до 333 °С, від 334 °С до 1200 °С	$\Delta = \pm 2,5$ °С, $\Delta = \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим}}$
3.	Секундомір	тривалість часу	від 0 до 60 с, від 60 с до 3600 с	2 клас точності, $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с, $\Delta = \pm (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$
4.	Вимірювально-обчислювальна система	температура	від 0 до 1200 °С	$\Delta = \pm 0,6$ %
5.	Термогігрометр	температура; вологість	від 0 до 50 °С, від 2% до 98%	$\Delta = \pm 0,5$ °С, $\Delta = \pm 3$ %
6.	Барометр-анероїд	атмосферний тиск	від 600 мм.рт.ст. до 800 мм.рт.ст.	$\Delta = \pm 1$ мм рт.ст.,
7.	Мірна ємність	об'єм	від 0 до 10 дм <sup>3</sup>	$\Delta = \pm 0,05$ дм <sup>3</sup>
8.	Анемометр	швидкості потоку повітря	від 0,3 м/с до 5 м/с	$\Delta = \pm 1$ м/с
9.	Фото-відеокамера	розширення	48 Мп	-
10.	Тепловізор	розширення	8,0 Мп	-

Для проведення експериментальних досліджень допускається використання інших засобів вимірювальної техніки з негіршими метрологічними характеристиками ніж ті, які наведено в таблиці 3.4 [104].

Для додаткового контролю температурного поля на внутрішніх поверхнях вогневої камери як допоміжний засіб вимірювальної техніки допускається застосування тепловізора.

### *Методологія проведення експерименту*

Натурний експеримент базується на створенні контрольованого вогневого середовища, яке максимально наближене до реальних умов виникнення та розвитку пожежі у захисній споруді автотрансформатора. В основі експериментального підходу – моделювання теплового впливу джерела пожежі на конструктивні елементи будівлі та визначення температурного режиму в середині об'єму приміщення за умов контрольованого сценарію горіння.

Експериментальні дослідження виконуються у спеціалізованій вогневій камері, яка представляє собою залізобетонну конструкцію. Така геометрія дозволяє забезпечити необхідну теплоємність, герметичність та інерційність середовища для моделювання умов розвитку пожежі.

Як джерело теплового впливу використовується модельне вогнище пожежі класу В (233В) у вигляді металевого дека, в яке заливається до 780 л трансформаторного мастила та 10 л бензину для розпалювання. Параметри вогнища забезпечують встановлений температурний режим із піковими значеннями до 1200 °С і сталим температурним плато на рівні  $800 \pm 50$  °С упродовж не менше ніж 1200 секунд із загальних 1800 секунд експерименту. Запалювання палива виконується контрольовано відповідно до інструкції з пожежної безпеки та [105, 106]. Температурний контроль здійснюється системою термопар типу К, розміщених у важливих контрольних точках в межах об'єму вогневої камери та поблизу зовнішніх огорожувальних конструкцій на відстані 150 мм згідно із рисунком 3.3. Так, для вимірювання температури встановлювалися п'ять термопар під покриттям споруди на відстані 150 мм від будівельних конструкцій.

Вимірювання температурного поля виконується за допомогою вимірювально-обчислювальної системи, яка включає модуль аналогового вводу для зчитування сигналів з термопар. Система забезпечує автоматичну реєстрацію, попередню обробку, візуалізацію та архівацію експериментальних даних у реальному часі. Перед початком дослідження виконується калібрування каналів збору даних і перевірка ліній зв'язку з термопарами. Запис температурного режиму розпочинається синхронно з ініціюванням процесу горіння.

Загальна послідовність виконання експерименту включає наступні етапи: підготовка вогневої камери та засобів вимірювальної техніки, підготовка модельного вогнища пожежі, проведення калібрування вимірювальної системи, фіксація початкових параметрів середовища, ініціювання пожежі, проведення температурного моніторингу протягом усього експерименту, завершення горіння, охолодження об'єкта, розшифрування даних та заповнення протоколу досліджень. Фото- та відеофіксація здійснюється з використанням захищених камер.

#### *Вимоги до проведення експериментальних досліджень*

Дослідження у вогневій камері проводяться не менше трьох разів для кожного типу імітаційного макету дизельного електрогенератора.

#### *Підготовка до проведення досліджень:*

1. Перевіряється готовність вогневої камери.
2. Встановлення засобів вимірювальної техніки, а саме термопар, згідно із схемою наведеною на рисунку 3.3.
3. Підключення термопар до вимірювально-обчислювальної системи для забезпечення безперервного контролю температурного режиму. Перед початком експерименту здійснюється перевірка їх працездатності та коректності зчитування показників.
4. Здійснення підготовки фото- та відеообладнання для документування ходу експерименту, включаючи налаштування кутів огляду, фокусування та перевірку працездатності засобів реєстрації.
5. Модельне вогнище пожежі класу В (233В) встановлюється у центрі вогневої камери відповідно до схеми проведення експерименту. Заповнення дека маслом здійснюється не раніше ніж за 3 хвилини до початку випробувань.
6. Підготовка первинних засобів пожежогасіння відповідно до вимог пожежної безпеки, а також перевірка справності та цілісності засобів індивідуального захисту особи, відповідальної за проведення вогневих робіт.

*Послідовність проведення досліджень:*

1. *Перевірка вогневої камери.* Здійснюється візуальний огляд імітаційного макету з метою перевірки його геометричних параметрів, цілісності конструктивних елементів та відповідності технічному завданню.
2. *Монтаж засобів вимірювальної техніки.* Розміщення термопар типу К згідно зі схемою, наведеною на рисунку 3.3, в контрольних точках всередині вогневої камери та поблизу випробувального зразка.
3. *Підключення системи збору даних.* Під'єднання термопар до вимірювально-обчислювальної системи для забезпечення автоматизованого зчитування та реєстрації температурних параметрів. Перевіряється працездатність термопар та достовірність відображення показників на екрані системи та теплові зорі.
4. *Підготовка засобів фіксації.* Встановлення та налаштування фото- і відеореєструвальної апаратури: виставлення кутів огляду, фокусування, перевірка працездатності реєстраторів та носіїв інформації.
5. *Установка модельного вогнища.* Розміщення модельного вогнища пожежі класу В (233В) у центрі вогневої камери згідно з рисунком 3.3. Заповнення металевого дека маслом виконується не раніше ніж за 3 хвилини до початку експерименту.
6. *Підготовка протипожежного захисту.* Перевіряється наявність і справність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники, покривала тощо). Здійснюється контроль стану індивідуального захисного одягу та екіпірування особи, відповідальної за проведення вогневих робіт, включаючи термозахисний костюм, каску, щиток та рукавиці.
7. *Початок експерименту.* За командою керівника проведення досліджень, пальне в деці підпалюють факелом та одночасно вмикають секундомір. Наявність даного об'єму палива забезпечує час його горіння не менше 1800 секунд, що контролюється секундоміром. Дослідження тривають до повного вигорання пального у модельному вогнищі пожежі.

8. *Моніторинг температурного режиму.* Реєстрація температури проводиться з інтервалом не більше, ніж 10 секунд. За результатами досліджень для кожного моменту часу  $t_j$  вимірювання визначають температуру  $t$  поверхні всередині вогневої камери.

9. *Завершення експерименту.* По закінченню вільного горіння модельного вогнища за командою керівника проведення досліджень захисним щитом або кошмою накривається модельне вогнище пожежі. Зберігаються отримані дані на засобах вимірювальної техніки та відеоапаратурі.

10. Експериментальні дані заносяться до протоколу первинних даних.

#### *Вимірювання температури та вологості повітря*

Вимірювання температури та вологості повітря проводиться психрометром аспіраційним МВ-4М, в такій послідовності:

- перед початком роботи виносимо пристрій із приміщення за 15 хв до моменту відліку вимірювань та встановлюємо його з навітряної стіни фрагменту будинку, щоб повітря йшло від пристрою до стіни, на висоті 2 м від поверхні землі;

- знімаємо зовнішній екран правого термометра та вимиваємо резервуар термометра чистою водою;

- обертаємо батистом в один оберт, таким чином, щоб заповнити резервуар термометра на відстані 3 см та зав'язуємо нитками вище і нижче резервуара та обрізаємо вільний кінець на 2-3 мм нижче резервуара;

- змочуємо батист на резервуарі термометра дистильованою водою за 4 хв до початку вимірювань. Для цього беремо наповнений дистильованою водою гумовий балон із затискачем і легким натискуванням доводимо воду в піпетці не ближче ніж 1 см до краю і утримуємо воду на цьому рівні за допомогою затискувача. Потім вводимо піпетку у внутрішню трубку захисту і змочуємо батист. Витримавши певний час не виймаючи піпетки із трубки, розжимаємо затискувач вбираючи воду в балон і виймаємо піпетку;

- вмикаємо електромотор вентилятора психрометра до джерела живлення;

- через 4 хв після пуску вентилятора проводимо вимір температур по термометрам, відлік знімаємо із точністю до 0,25 ціни поділки шкали, значення температур округлюємо до 0,1 °С;

- температуру повітря зовнішнього середовища фіксуємо по значенню сухого термометра;

- відносну вологість повітря визначаємо за формулою

$$f = \frac{E_m - A \cdot P \cdot d_\theta \cdot 100\%}{E_c} \quad (3.12)$$

де  $E_m$  – насичена пружність водяного пара при температурі змоченого термометра;

$E_c$  - насичена пружність водяного пара при температурі сухого термометра;

$A$  – психрометричний коефіцієнт, дорівнює 6,62010 °С<sup>-1</sup>;

$P$  – тиск повітря;

$d_\theta$  – різниця між значеннями температур сухого термометра та змоченого термометра, °С

### *Вимірювання атмосферного тиску*

Вимірювання атмосферного тиску проводимо барометром анероїдом М67, в такій послідовності:

- встановлюємо барометр в робоче положення, на закріплену горизонтальну поверхню, шкалою до гори. Місце встановлення барометра повинно бути захищене від прямих променів сонця;

- усуваємо тертя в рухомих механізмах за допомогою легких ударів пальцями по корпусу або склу барометра;

- відлік показів барометра здійснюємо в момент повного співпадання в горизонтальній площині покажчика стрілки з його віддзеркаленням на дзеркальній поверхні кільця шкали;

- відлік показів барометра здійснюємо із точністю до 0,3 ціни поділки шкали. Кожний відлік по барометру повинен бути відкоригований введенням до його показників поправок:

а) температурна поправка, визначається за формулою

$$P_{\theta}=a+b\theta+c\theta^2+d\theta^3+K(\theta-20)(P_k-P_{sl}), \quad (3.13)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $K$  – коефіцієнти типової температурної залежності ( $a=0,18$  мм рт. ст.,  $b=-0,009$  мм рт. ст.,  $c=-0,000014$  мм рт. ст.,  $d=0,000002$  мм рт. ст.,  $K=0,000312$ );

$P_k$  - 97592 Па (732 мм рт. ст.);

$P_{sl}$  – значення тиску, що визначено по барометру;

$\theta$  – температура оточуючого середовища.

б) шкальна поправка, визначається згідно із паспортом барометра анероїда М67.

### *Вимірювання швидкості вітру*

Вимірювання швидкості вітру проводимо анемометром крильчастим АСО-3, в такій послідовності:

- перед початком роботи вимикаємо передаточний механізм і записуємо показники лічильника по трьом шкалам;
- анемометр встановлюємо в повітряному потоці вітроприймачем на зустріч потоку і віссю крильчатки вздовж напрямку повітряного потоку;
- через 10-15 секунд одночасно вмикаємо передаточний механізм анемометра і секундомір;
- анемометр витримуємо в повітряному потоці продовж 1-2 хвилин;
- після цього передаточний механізм анемометра і секундомір вимикаємо;
- фіксуємо показники лічильника, а також визначаємо кількість поділок, що припадають на одну секунду;
- швидкість потоку визначаємо по графіку, що додається до анемометра наступним чином: на вертикальній вісі графіка знаходимо число, що відповідає числу поділок шкали лічильника анемометра в секунду. Від цієї точки проводимо

горизонтальну лінію до перетину із прямою графіка. Із точки перетину опускаємо вертикальну лінію до перетину із горизонтальною віссю. Точка перетину дає значення швидкості повітряного потоку (м/с).

### *Оцінка результатів експериментальних досліджень*

Для визначення ступеня розсіювання значень випадкової величини ( $x_i$ ) відносно її математичного сподівання ( $\bar{x}_i$ ) та мінливості вибірки обчислено середнє квадратичне відхилення результатів досліджень за формулою 1 [7]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|^2}{n}}, \quad (3.14)$$

Для визначення середніх відхилень значення і-го дослідження від середнього значення всіх досліджень визначено середнє абсолютне відхилення за формулою 2 [107]:

$$d = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n}, \quad (3.15)$$

Для вираження лінійних відхилень у відсотках та з метою підвищення рівня інформативності аналізу визначимо середнє відносне відхилення за формулою 3 [107]:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}_i|}{n \cdot \bar{x}_i} \cdot 100\%, \quad (3.16)$$

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 4 [107]:

$$G_{jmin} = \frac{\bar{y}_j - y_{jmin}}{S_j}. \quad (3.17)$$

За результатом розрахункових операцій значення  $G_{j\max}$  та  $G_{j\min}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [107], які для трьох досліджень відповідно становлять 1,715 та 1,764.

#### *Вимоги безпеки праці під час проведення експерименту*

Під час проведення досліджень слід керуватись вимогами [105, 106], відповідними інструкціями ІНДЦЗ НУЦЗ України, які регламентують заходи безпеки безпосередньо на робочому місці, а також іншими чинними нормативно-правовими актами з охорони праці.

Серед персоналу, що здійснює дослідження, обов'язково має бути призначена відповідальна особа за дотримання вимог охорони праці. До участі в дослідженнях допускаються лише ті особи, які пройшли загальний інструктаж з охорони праці, ознайомлені з методикою проведення випробувань, а також отримали цільовий інструктаж із визначенням функціональних обов'язків кожного учасника експерименту.

До початку експерименту необхідно організувати попереджувальне позначення небезпечної зони – на відстані не менше 10 м від дверного прорізу вогневої камери має бути встановлено відповідний знак, що забороняє вхід стороннім особам.

Під час виконання вогневих робіт оператор повинен бути екіпірований у захисний одяг пожежника, включаючи пожежну каску, пояс, захисні рукавиці та взуття.

Категорично забороняється:

заходити у вогневу камеру під час експерименту;

використовувати воду для гасіння модельного осередку пожежі класу В (233В), оскільки це створює ризик неконтрольованого розповсюдження вогню;

Місце проведення випробувань забезпечують медичною аптечкою загального призначення.

Також слід передбачити наявність первинних засобів пожежогасіння, зокрема не менше трьох переносних вуглекислотних вогнегасників типу ВВК-5, для можливого гасіння модельного осередку пожежі класу В (233В).

Таким чином, розроблена методика натурних вогневих досліджень процесів теплообміну між джерелом теплового випромінювання у вигляді трансформаторного масла та будівельними конструкціями захисної споруди для автотрансформатора. Зазначена програма та методика експериментальних досліджень дозволяє провести верифікацію результатів теоретичних досліджень щодо встановлення температурного режиму пожежі в захисних спорудах автотрансформаторів, отриманих із використанням розроблених математичних моделей у другому розділі цієї роботи.

### **3.2 Результати експериментальних досліджень**

Для визначення температурного режиму пожежі в захисних спорудах для трансформаторних підстанцій проведені експериментальні згідно із методикою наведеною у розділі 3.1.

Дані дослідження імітують випадок пожежі під час якої відбулося розтікання трансформаторного масла на підлогу захисної споруди в якій встановлено автотрансформатор.

Модельний макет споруди, вогнище пожежі описані у розділі 3.1, а також засоби вимірної техніки (п'ять термопари) встановлювалися згідно із схемою, що наведена на рис. 3.3, які встановлювалися під покриттям споруди на відстані 150 мм від будівельних конструкцій. Експериментальне дослідження проведено три рази. На рисунку 3.5 наведено фото фрагменту експериментального дослідження.



Рисунок 3.5 – Фото фрагменту експериментального дослідження

Під час експериментального дослідження спостерігалось на початку миттєве зростання температури за показами термопар, що можна прирівняти до експоненційного розподілу за температурним режимом пожежі близьким до вуглеводневої пожежі, але через певний проміжок часу стрімке зростання температури змінилося на повільний розвиток пожежі, що можна пояснити вигоранням кисню та недостатньою його кількістю для підтримання інтенсивності пожежі на її початковій стадії. Експеримент тривав близько 30 хв, хоча після 10 хв подальший температурний режим ставав прогнозованим.

Результати трьох експериментів по кожній із п'яти термопар представлені на рисунку 3.6.

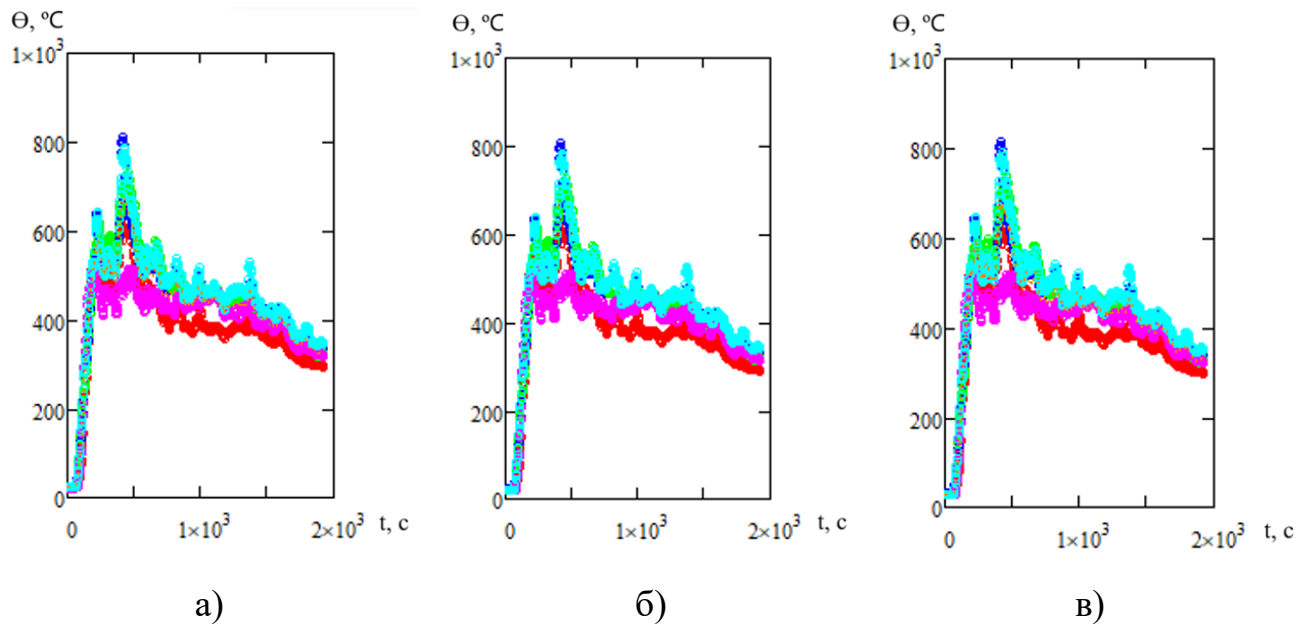


Рисунок 3.6 – Результати експериментальних досліджень: а) експериментальне дослідження № 1, б) експериментальне дослідження № 2, в) експериментальне дослідження № 3

Усереднені результати, за всіма п'ятьма термопарами, трьох експериментальних досліджень представлені на рисунку 3.7.

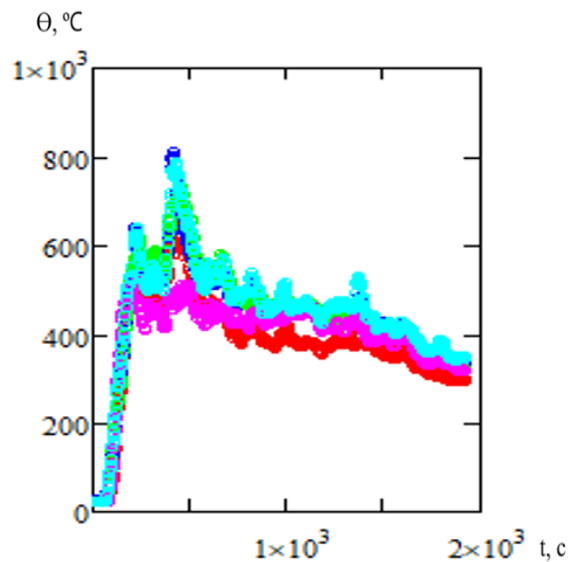


Рисунок 3.7 – Усереднені результати експериментальних досліджень

Із рисунку 3.7 можна відмітити, що на 4 хв горіння досягнуто максимум інтенсивності зростання температури, а після 4 хв її зростання відбувається з

меншою інтенсивністю, що можна пояснити відсутністю достатньої кількості кисню у процесі горіння за рахунок низького коефіцієнту прорізів у огорожувальних конструкціях захисної споруди для автотрансформатора. Приблизно після 10 хв експериментального дослідження температурний режим стабілізується та починає повільно спадати, що пояснюється поступовим вигоранням пожежної навантаги.

Проведемо перевірку результатів кожного окремого експерименту на наявність викидів та квазівикидів за критерієм Граббса [108].

Для встановлення того, чи є найбільший результат в ранжованому ряду  $y_{jmax}$  викидом чи квазівикидом, розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmax}$  за формулою 3.1.

$$G_{jmax} = \frac{y_{jmax} - \bar{y}_j}{S_j}, \quad (3.18)$$

де  $\bar{y}_j$  і  $S_j$  - відповідно середнє значення та середньоквадратичне відхилення.

Для перевірки значимості відхилення найменшого значення в упорядкованому ряду,  $y_{jmin}$ , розраховуємо критерій Граббса,  $G_{jmin}$  за формулою 3.17.

Середнє значення  $\bar{y}$  розраховували за формулою:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (3.19)$$

де  $n$  – кількість результатів експериментальних досліджень.

А оцінювання дисперсії та середньоквадратичного відхилення результатів експериментальних досліджень  $S^2$  та  $S$  були відповідно:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{та} \quad S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.20)$$

Для оцінки розрахункових значень  $G_{max}$  та  $G_{min}$  з метою визначення викидів і квазівикидів у результатах експериментальних досліджень за критерієм Граббса [107] використовували схему, подану на рисунку 3.8.



Рисунок 3.8 – Визначення в результатах експериментальних досліджень викидів та квазівикидів за критерієм Граббса

Розраховані таким чином значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  порівнюємо з 5 % ( $G_{кр.5\%}$ ) та 1 % ( $G_{кр.1\%}$ ) критичними значеннями, заданими в таблицях [107], які для трьох досліджень відповідно становлять 1,715 та 1,764.

Якщо після порівняння  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  з їх критичними значеннями виявиться, що ці розраховані значення коефіцієнтів становлять більше ніж 5 %-ве критичне значення ( $G_{кр.5\%}$ ) і менше (або дорівнює) 1 %-го ( $G_{кр.1\%}$ ) критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), тоді значення  $u_{jmax}$  або  $u_{jmin}$  вважають квазівикидом.

Якщо розраховане значення  $G_{jmax}$  або  $G_{jmin}$  більше 1 %-го критичного значення ( $G_{кр.1\%}$ ), то відповідно  $u_{jmax}$  або  $u_{jmin}$  вважають викидом.

Якщо розраховані значення  $G_{jmax}$  та  $G_{jmin}$  є меншими (або рівними) за критичні значення 5% ( $G_{кр.5\%}$ ), то результати випробувань не містять викидів та квазівикидів.

Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях викидів та квазівикидів за критерієм Граббса показані на рисунку 3.9.

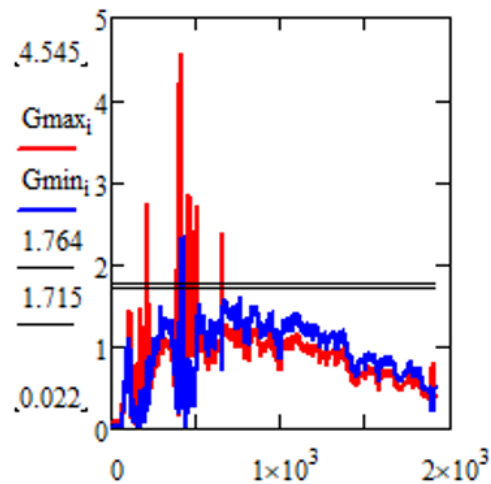


Рисунок 3.9 – Результати перевірки на наявність у експериментальних дослідженнях викидів та квазिवикидів за критерієм Граббса

Експериментальні дані, які мали викиди або квазивидами за критерієм Граббса, не враховували під час подальшого оброблення результатів.

З метою перевірки збіжності між собою трьох експериментів, обчислено дисперсії відхилень по середнім значенням за формулою 3.15 [109]. Дисперсії відхилень по середнім значенням наведені на рисунку 3.10.

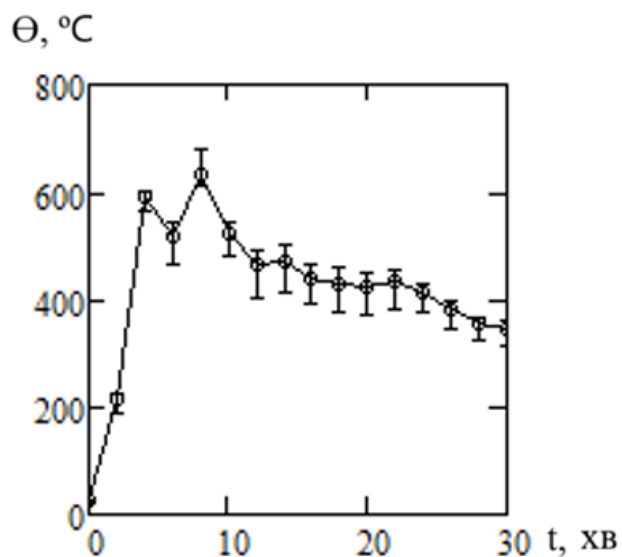


Рисунок 3.10 – Дисперсії відхилень по середнім значенням

Таким чином, можна зазначити, що отримані дані температур не заперечують нуль гіпотезі, а їх розбіжність можна вважати не суттєвою. Таким

чином дані, що отримані за результатами експериментального дослідження, є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого із трьох експериментальних досліджень. З урахуванням вищенаведеного, для подальшого порівняння результатів теоретичних досліджень із експериментальними дослідженнями застосовуємо усереднені значення температури, отримані за даними 3-х експериментальних досліджень, з урахуванням наявності викидів та квазівикидів.

Аналіз даних, що отримані експериментальним та теоретичним шляхом проводили за такими критеріями: абсолютні відхилення, які склали близько 150 °С, відносні відхилення, які склали в межах 35 %, середньоквадратичні відхилення, які склали близько 90 °С. Зазначене вказує на те, що теоретичні дані максимально наближені до усереднених даних експерименту. При цьому, теоретичні дані не містять процесу затухання як наслідку недостатньої кількості окисника, що є певним запасом рівня безпеки та є прийнятним з точки зору прийняття практичного рішення.

Це в свою чергу означає, що отримані дані щодо модифікованого температурного режиму в захисній споруді для автотрансформатора досить точні і достовірні та можуть бути використані для розроблення пропозицій щодо внесення змін до нормативно-правової бази в частині вимог до класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів.

Таким чином сформульовано друге наукове положення: побудовано модифікований температурний режим під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора, який дозволяє врахувати пожежну навантагу захисної споруди автотрансформатора та конструктивні рішення цієї споруди, що впливають на процес горіння в середині її, зокрема площа прорізів у огорожувальних конструкціях.

### 3.3 Висновки за третім розділом

1. Обґрунтовано вимоги до програми та методики експериментальних досліджень, зокрема шляхом застосування теорії фізичного моделювання або теорії подібності обґрунтовано зменшені параметри макету споруди для проведення експериментальних досліджень. Встановлено, що при збереженні критерію Фруде у фізичному моделюванні можливо адекватно відтворити теплогазообмінні процеси пожежі в приміщеннях з різними геометричними масштабами, що забезпечує коректність екстраполяції під час планування експериментального дослідження. При цьому, масштаб моделі приймаємо з коефіцієнтом 0,23. Матеріал огорожувальних конструкцій моделі, залізобетонні стіни та покриття. Площа прорізів у зовнішніх огорожувальних конструкціях повинна становити  $0,023 \text{ м}^2$ , при цьому отвори створюємо у верхній частині моделі. Тепловиділення моделі масштабується відносно об'єкту за рівнянням  $Q_m=0,053Q_p$ . Часові характеристики скорочуються відповідно до співвідношення  $t_m=0,497t_p$ .

2. Показано, що отримані дані температур за трьома результатами експериментальних досліджень не заперечують нуль гіпотезі, а їх розбіжність можна вважати не суттєвою. Таким чином дані, що отримані за результатами експериментального дослідження, є вибірками з однієї генеральної сукупності, що підтверджує загальну збіжність кожного окремого із трьох експериментальних досліджень.

3. Наведено результати перевірки математичного моделювання із результатами експериментального дослідження та показано, що результати математичного моделювання є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 35 % та  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  відповідно. Показано, що отримані моделі є адекватними.

4. Вперше побудовано модифікований температурний режим під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора, який виражається залежністю:  $\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0$ , що враховує реальний характер розвитку пожежі в умовах обмеженої подачі окисника, великий внутрішній об'єм споруди та специфічні параметри пожежного навантаження трансформаторного масла [110].

## **РОЗДІЛ 4 ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ВИМОГ ДО ЗАХИСНИХ СПОРУД АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ В ЧАСТИНІ ВОГНЕСТІЙКОСТІ**

У цьому розділі представлені результати щодо розроблення пропозицій до нормативно-правових актів щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних огорожувальних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів з використанням встановлених закономірностей зміни температури під час пожежі на таких об'єктах.

### **4.1 Інженерний захист об'єктів критичної інфраструктури**

Збройна агресія російської федерації визначила необхідність у підвищеному інженерному захисті об'єктів критичної інфраструктури від наслідків вибухових дій ракетних та дронів ударів. Під інженерним захистом об'єктів критичної інфраструктури [111] розуміється сукупність заходів з інженерного обладнання елементів об'єктів критичної інфраструктури з метою підвищення їхньої живучості, безпеки персоналу та стійкого функціонування газотранспортної систем, нафтовидобувної промисловості держави, та, особливо електроенергетичної галузі в інтересах забезпечення життєвих потреб суспільства.

В Концепції «Країна-фортеця» [4], указано, що відповідно [112], визначено три категорії відповідальності елементів об'єктів критичної інфраструктури:

- категорія А - конструкції та елементи об'єктів критичної інфраструктури, відмова яких може призвести до повної непридатності до експлуатації об'єктів критичної інфраструктури або значної його частини, а відновлення триває понад 3 тижні;

- категорія Б - конструкції та елементи об'єктів критичної інфраструктури, відмова яких може призвести до ускладнення нормальної експлуатації об'єктів критичної інфраструктури або до відмови інших елементів об'єктів критичної інфраструктури, які не належать до категорії Л, а їх відновлення триває 1-3 тижні;

- категорія В - конструкції та елементи, відмови яких не призводять до порушення основної функції об'єктів критичної інфраструктури функціонування інших конструкцій або їх елементів, а відновлення триває до 1 тижня.

В Типових рішеннях з інженерного захисту критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури України від ураження засобами повітряного нападу противника в рамках реалізації Концепції «Країна-фортеця» [4] уточнено, що в енергетичній галузі трансформатори відносяться до відповідальності категорії А. Маслонаповнені трансформатори [90], як один із найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на підприємствах, зокрема енергетичної галузі, можуть містити від 200 л до 60 000 л мінерального масла, що є горючою речовиною із густиною в діапазоні  $(0,80-0,89) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , і за результатами експериментальних досліджень має температуру спалаху  $141 \text{ }^\circ\text{C}$ , температуру займання  $154 \text{ }^\circ\text{C}$  та температуру самозаймання  $252 \text{ }^\circ\text{C}$  [90]. Відповідно до стандарту Міжнародної електротехнічної комісії IEC 60596-1-40 [113] трансформаторні мінеральні масла це ізоляційні рідини класу O1, що означає, що температура займання масла становить  $\leq 300 \text{ }^\circ\text{C}$ , а нижча теплота згорання  $\geq 42 \text{ }^\circ\text{МДж/кг}$ . При аварійному режимі роботи маслонаповненого електроустаткування може статися вилив розігрітого вище температури спалаху трансформаторного масла, яке може зайнятися та сприяти розвитку та поширенню пожежі. Вважається, що пожежі за участю викиду ізоляційних рідин класу O1 [113, 108] приносять найбільші матеріальні збитки.

Масло у таких установках використовується у якості охолоджувача, тобто у випадку аварійної ситуації або порушення регламенту технологічного процесу може виникнути перегрівання масла до температури більше  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , що призводить до його кипіння, підвищення тиску та може спричинити руйнування корпусу трансформатора із аварійним розливом масла з подальшим його займанням. Розливання киплячого трансформаторного масла та його горіння сприяє подальшому розвитку пожежі та спричиняє її поширення по всій площі захисної споруди, в якій встановлене трансформаторне обладнання. Зазначене зумовлює необхідність встановлення вимог до вогнестійкості огорожувальних будівельних конструкцій таких захисних споруд.

Для оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій при випробуваннях та розрахунках застосовують спеціальні нормовані (номінальні) температурні режими, що відображають різні сценарії умовних пожеж. Номінальний температурний режим – це традиційний температурний режим, що приймається для класифікації або перевірки вогнестійкості

Найпоширеніший температурний режим прийнято називати «стандартною кривою (залежністю) «температура/час» або стандартним температурним режимом, оскільки тривалий час цей режим був єдиним стандартизованим температурним режимом. Такий температурний режим моделює розвинулу пожежу в приміщенні та визначається за формулою:

$$\theta_g = 345 \log_{10} (8t + 1) + 20 \quad (4.1)$$

де  $\theta_g$  – температура газового середовища в протипожежному відсіку, °С;

$t$  – час, хв.

Умови створення такого режиму регламентовано у основоположних стандартах на методи випробувань будівельних конструкцій на вогнестійкість: у європейському стандарті та міжнародному стандартах, що прийняті як національні [31 та 114].

Однак, сьогодні випробування на вогнестійкість проводять і за іншими стандартизованими температурними режимами. Ці режими визначено за тими самими принципами, що і стандартизований режим, встановлено у стандарті [43]. Відповідно до [43] ці режими називають “*додатковими та альтернативними*” стандартизованими температурними режимами. До додаткових та/або альтернативних температурних режимів відносять:

- режим вуглеводневої пожежі;
- режим зовнішньої пожежі.

Додатково до регламентованих режимів розвитку пожежі відносять: температурний режим повільно-розвиваючої пожежі - модифікованої температурно-часової залежності розвитку вуглеводневої пожежі.

Температурний режим зовнішньої пожежі, який є менш інтенсивним, ніж стандартний температурний режим, використовують для зовнішніх конструкцій будівель, компонентами яких можуть бути сталеві конструкції. Цей температурний режим моделює вплив на зовнішню конструкцію вогню, що може виходити з вікна будівлі, або від пожежі ззовні, що відбувається в режимі вільного горіння.

Температурний режим зовнішньої пожежі визначається за формулою:

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{0,32t} - 0,313e^{3,8t}) + 20 \quad (4.2)$$

де

$\theta_g$  – температура газового середовища навколо конструкції, °С;

$t$  – час, хв.

Вуглеводневий температурний режим є найбільш жорстким і стосується пожеж на нафтопереробних підприємствах або у транспортних тунелях, де наявність великої кількості горючих рідин призводить до різкого зростання температури газового середовища вже у перші хвилини пожежі

Температурний режим вуглеводневої пожежі визначається за формулою:

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (4.3)$$

де

$\theta_g$  – температура газового середовища навколо конструкції, °С;

$t$  – час, хв.

Додаткові температурні режими застосовують як доповнення до стандартного температурного режиму з метою оцінювання вогнестійкості конструкції з урахуванням того, що вогнестійкість у цих режимах може бути менша ніж за стандартним. Альтернативні температурні режими застосовують на заміну стандартного із урахуванням того, що оцінювання вогнестійкості має проводитися за температурним режимом, якомога наближеного до режиму реальної пожежі.

В таблиці 4.1 наведені значення температур газового середовища для номінальних температурних режимів залежно від тривалості пожежі

На рисунку 4.1 наведено графічні зображення закономірності зростання температури газового середовища номінальних температурних режимів.

Таблиця 4.1 – Температура газового середовища для деяких номінальних температурних режимів залежно від тривалості пожежі

Тривалість номінальної пожежі $t$ , хв	Температура газового середовища $\theta_g$ (°C) для:		
	стандартного температурного режиму	режиму вуглеводневої пожежі	режиму зовнішньої пожежі
0	20	20	20
5	576	948	588
10	678	1034	662
15	739	1071	676
30	842	1098	680
45	902	1100	680
60	945	1100	680
90	1006	1100	680
120	1049	1100	680
150	1082	1100	680
180	1110	1100	680
240	1153	1100	680

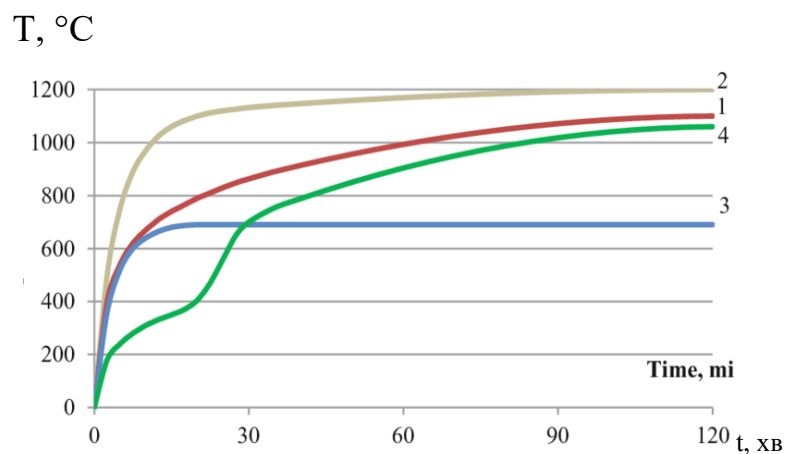


Рисунок 4.1 – Графічні зображення закономірності зростання температури газового середовища номінальних температурних режимів: 1 – стандартний температурний режим; 2 – температурний режим вуглеводневої пожежі; 3 – температурний режим зовнішньої пожежі; 4 – температурний режим пожежі, яка повільно розвивається

Як правило в більшості випадків для проектування будівельних конструкцій застосовують номінальні температурні режими пожежі. Так згідно із Типовими рішеннями з інженерного захисту критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури України від ураження засобами повітряного нападу противника в рамках реалізації Концепції «Країна-фортеця» [4] несучі конструкції каркасу та перекриття захисної споруди слід виконувати з класом вогнестійкості не нижче ніж REI 90 за умов впливу температурного режиму вуглеводневої пожежі (найжорсткішого номінального температурного режиму). Слід зазначити, що вплив на будівельні конструкції температурного режиму вуглеводневої пожежі є досить жорстким режимом теплового впливу, особливо якщо врахувати фактично наявність замкнутого простору із обмеженим притоком свіжого повітря (окисника реакції горіння), що негативно впливає на економічній складовій реалізації проектів будівництва захисних споруд, в яких розташовують автотрансформатори.

Слід зазначити, що окрім номінальних температурних режимів, для розроблення заходів з протипожежного захисту будівель та споруд можуть застосовуватися методи моделювання реальної (параметричної) пожежі.

Параметричний температурний режим – це режим, що встановлений, ґрунтуючись на моделі пожежі та питомих фізичних параметрах, що визначають умови в протипожежному відсіку.

Так, параметричний режим пожежі (який є модифікованим вуглеводневим режимом) для силового трансформатора, розташованого в захисній споруді, що обґрунтовано результатами досліджень, наведених в розділах 2 та 3, описується виразом 4.4 та графічно описано на рисунку 4.2:

$$\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0, \quad (4.4)$$

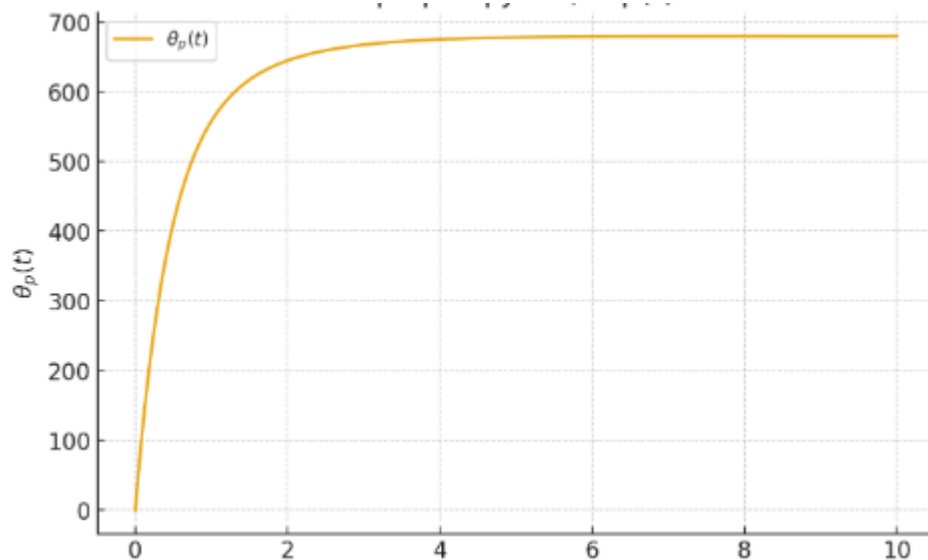


Рисунок 4.2 – Параметричний режим пожежі (модифікований вуглеводневий режим) для силового трансформатора, розташованого в захисній споруді

З урахуванням вищенаведеного, сформовано пропозицію стосовно внесення змін до Типового рішення з інженерного захисту критичних елементів об'єктів критичної інфраструктури України від ураження засобами повітряного нападу противника в рамках реалізації Концепції «Країна-фортеця» [4], а саме:

- третій абзац Типового рішення п.4.2 викласти в наступній редакції: «несучі конструкції каркасу та перекриття захисної конструкції типу «Шелтер» виконати з класом вогнестійкості не нижче REI 90, за умову впливу параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для силового трансформатора, розташованого в захисній споруді, що характеризується рівнянням:

$$\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0,» \quad (4.5)$$

#### **4.2. Економічна ефективність використання запропонованого параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для оцінки вогнестійкості конструкцій захисної споруди автотрансформатора**

Економічна ефективність використання запропонованого параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для оцінки

вогнестійкості конструкцій захисної споруди автотрансформатора проведемо шляхом порівняння затрат на виготовлення будівельної конструкцію, яка забезпечить клас вогнестійкості REI 90-НС за температурним режимом вуглеводневої пожежі із затратами на виготовлення будівельної конструкцію, яка забезпечить клас вогнестійкості REI 90 за запропонованим параметричним температурним режимом пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі).

Для оцінки вогнестійкості конструкцій розроблена методика оцінки класу вогнестійкості сталевих балок із вогнезахисним покриттям в умовах впливу вуглеводневого температурного режиму пожежі та запропонованого параметричного температурного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі).

Розроблена методика базується на стандартах, гармонізованих із відповідною методичною та нормативною базою об'єднаної Європи, а також узгоджується із результатами досліджень вітчизняних та закордонних авторів, які апробовані, обговорені та визнані науковою спільнотою і входять у основну базу літературних посилань та цитування фахівцями даної галузі. В методиці в якості основного підходу передбачено оцінку вогнестійкості сталевих балок за умов вуглеводневого температурного режиму пожежі. Даний вплив враховують у розрахунку міцності та стійкості балок із застосуванням розрахункових методик [115], імплементованих в Україні, та використання яких рекомендоване [14].

Згідно із [116] потрібно використати спрощений підхід де у загальному випадку розрахункове значення навантаження, що діє під час пожежі визначається за формулою:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d, \quad (4.6)$$

де  $E_d$  розрахункове значення відповідного зусилля чи моменту при нормальних температурах;

$\eta_{fi}$  - коефіцієнт зниження, що визначає рівень навантаження при пожежі.

Коефіцієнт зниження  $\eta_{fi}$  для сполучення навантажень (6.10) в [117] має визначатись за:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (4.7)$$

де

$Q_{k,1}$  - головне змінне навантаження;

$G_k$  - характеристичне значення постійної дії;

$\gamma_G = 1.35$  - частковий коефіцієнт постійної дії;

$\gamma_{Q,1} = 1.5$  - частковий коефіцієнт змінної дії 1;

$\Psi_{fi}$  - частковий коефіцієнт сполучень для циклічних та квазіпостійних значень.

Як спрощення для розрахунків можна прийняти  $\eta_{fi} = 0.7$ .

Розрахункова оцінка вогнестійкості, будівельних конструкцій об'єкту має проводитися у такій послідовності.

1. Визначається будівельна конструкція із найбільш небезпечним сполученням геометричних розмірів та навантаження.

2. Шляхом розв'язку задачі теплопровідності визначаються температурні показники у перерізі досліджуваної конструкції у момент часу розвитку пожежі за необхідним класом вогнестійкості.

3. За отриманими температурними показниками у перерізах балок у мінімальний час, обумовлений класом вогнестійкості, визначається можливість настання граничного стану втрати несучої здатності за цей час. За отриманими даними щодо часу настання зазначеного граничного стану визначається клас вогнестійкості елемента конструкції.

4. Для оцінки класу вогнестійкості як основний використовується спрощений метод відповідний до [29, 115].

5. У випадку коли фактичний клас вогнестійкості досліджуваних елементів є меншим за необхідний, виконується розрахункове обґрунтування проектних технічних вимог щодо системи вогнезахисту даних елементів.

Для розрахунку використовуємо вуглеводневий температурний режим пожежі та запропонований параметричний режим пожежі (модифікований вуглеводневий режим пожежі), що характеризуються рівнянням:

$$\theta_p(t) = 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0, \quad (4.8)$$

$$\theta_p(t) = 680 (1 - 0,325 e^{-0,967t} - 0,675 e^{-2,5t}) + \theta_0, \quad (4.9)$$

де:  $t$  – час стандартного вогневого випробування, с;

$\theta_0$  – початкова температура середовища, °С;  $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$ ;

$\theta_p(t)$  – температура у приміщенні із пожежею, °С.

Для визначення температури нагріву незахищених сталевих балок застосовується основна методика, яка базується на використанні формули, яка визначає підвищення температури  $\Delta\theta_{a,t}$  за проміжок часу  $\Delta t$ :

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m}{V c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net} \Delta t \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0), \quad (4.10)$$

тут  $k_{sh}$  — поправочний коефіцієнт для врахування впливу тіньового ефекту;

$A_m / V$  — коефіцієнт перерізу для незахищених сталевих конструкцій (1/м);

$A_m$  — площа поверхні конструкції на одиницю довжини (м<sup>2</sup>/м);

$V$  — об'єм конструкції на одиницю довжини (м<sup>3</sup>/м);

$c_a$  — питома теплоємність сталі, (Дж/(кг · К));

$\dot{h}_{net}$  — розрахункове значення результуючого питомого теплового потоку

на одиницю площі (Вт/м<sup>2</sup>);

$\Delta t$  — проміжок часу (с);

$\rho_a$  — густина сталі, (кг/м<sup>3</sup>).

Для визначення температури нагріву вогнезахисчених сталевих конструкцій застосовується основна методика, яка базується на використанні формули, яка визначає підвищення температури  $\Delta\theta_{a,t}$  за проміжок часу  $\Delta t$ :

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p}{V d_p c_a \rho_a} \cdot \frac{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{(1 + \phi/3)} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g,t} \quad (\Delta\theta_{a,t} \geq 0 \text{ при } \Delta\theta_{g,t} > 0), \quad (4.11)$$

$$\text{де } \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p A_p / V,$$

тут  $A_p / V$  – коефіцієнт перерізу для сталевих конструкцій, ізольованих вогнезахисним матеріалом;

$A_p$  — відповідна площа поверхні вогнезахисного матеріалу на одиницю довжини конструкції ( $\text{м}^2/\text{м}$ );

$V$  — об'єм одиниці довжини конструкції ( $\text{м}^3/\text{м}$ );

$c_a$  — питома теплоємність сталі, залежна від температури ( $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ );

$c_p$  — питома теплоємність вогнезахисного матеріалу, не залежна від температури ( $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ );

$d_p$  — товщина вогнезахисного матеріалу ( $\text{м}$ );

$\Delta t$  — проміжок часу не повинно бути більшим за 30 с ( $\text{с}$ );

$\theta_{a,t}$  — температура сталі у момент часу  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\theta_{g,t}$  — температура оточуючого газу у момент часу  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta\theta_{g,t}$  — підвищення температури оточуючого газу за проміжок часу  $\Delta t$  ( $\text{К}$ );

$\lambda_p$  — коефіцієнт теплопровідності вогнезахисної системи ( $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ );

$\rho_a$  — густина сталі ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );

$\rho_p$  — густина вогнезахисного матеріалу ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

Площа вогнезахисного матеріалу  $A_p$ , як правило, має прийматися як площа його внутрішньої поверхні, однак для порожнистих облицювань із зазорами

навколо захищеної сталевій конструкції може бути використане значення площі для порожнистих облицювань без зазорів.

При встановленні граничних умов важливим є завдання коефіцієнту теплообміну. Нормативами визначено коефіцієнт теплообміну визначати через дві складові – променисту і конвекційну. Промениста складова визначається за законом Стефана-Больцмана:

$$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{(\theta_p + 273)^4 - (\theta_w + 273)^4}{\theta_p - \theta_w}, \quad (4.12)$$

де  $\varepsilon$  - ступінь чорноти поверхні бетону;

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$  – константа Стефана-Больцмана

Згідно із прийнятими припущеннями маємо граничні умови III роду на границях розрахункової області відповідно до вимог [29, 116-118] встановлені параметри даних граничних умов, які наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри граничних умов для стін

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	$\alpha_c$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	25	[29]
Ступінь чорноти	$\varepsilon$		0.8	[29]
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	$\alpha$	Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	9	[29]

Для розв'язку рівняння теплопровідності потрібно задати температурні залежності теплофізичних характеристик матеріалів балок. В таблиці 4.3 подані теплофізичні характеристики матеріалів, необхідних для здійснення розрахунку.

Таблиця 4.3 – Теплофізичні характеристики матеріалів сталі

Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda(\theta)$ , Вт/(м·°С)	Об'ємна питома теплоємність, $c_p(\theta) \cdot \rho$ , Дж/(м <sup>3</sup> ·°С)	Густина, кг/м <sup>3</sup>
Сталь [115]		
54 – 3,33·10 <sup>-2</sup> θ при 20 °С ≤ θ ≤ 800 °С, 27,3 при θ > 800 °С.	425+0,773θ - 1,69 10 <sup>-2</sup> θ <sup>2</sup> +2,22 10 <sup>-6</sup> θ <sup>3</sup> при 20 °С ≤ θ ≤ 600 °С, 666–13002/(θ-738) при 600°С < θ ≤ 735°С, 545+17820/(θ-731) при 735°С < θ ≤ 900°С, 650 при 900°С < θ ≤ 1200°С	7850

Для встановлення коефіцієнту теплопровідності можна використати дані сертифікаційних випробувань вогнезахисного покриття [119], що отримані згідно із вимогами стандартів, чинних в Україні, для розрахунку повинен бути використаний стандартний температурний режим пожежі, який визначається формулою:

$$\theta_p(t) = 345 \cdot \lg(8t/60 + 1) + \theta_0, \quad (4.13)$$

де:  $t$  – час стандартного вогневого випробування, с;

$\theta_0$  – початкова температура середовища, °С;  $\theta_0 \approx 20^\circ\text{C}$ ;

$\theta_p(t)$  - температура у просторі приміщення із пожежею.

Температурна крива, за якою змінюється температура сталевого елемента під вогнезахисним покриттям від 20 °С до 500 °С, визначається за схемою, що наведена на рисунку 4.3. Дана крива виражає фізичний феномен, який полягає у початку процесу спучування покриття при досягненні температури ~ 250°С. При цьому ця температура слабо залежить від товщини покриття, оскільки на початковому етапі товщина є дуже малою у порівнянні із товщиною спученого покриття. Як було узагальнено за багатьма спостереженнями, температура після процесу спучування зростає майже лінійно.

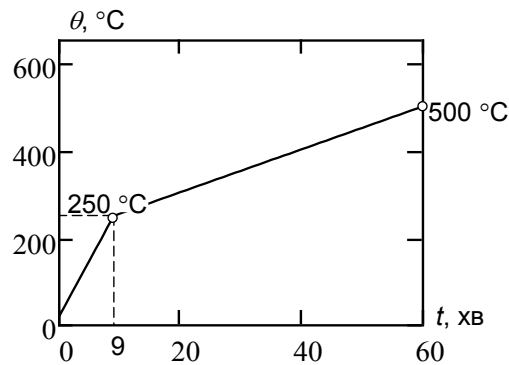


Рисунок – 4.3 Схема побудування температурної кривої, за якою змінюється температура сталевого елемента під вогнезахисним покриттям від 20 °С до 500 °С

За таких умов температура нагріву сталевого елемента під вогнезахисним покриттям визначається за формулою:

$$\theta_s(t) = 20 + 25.556t \text{ при } 20 \text{ °С} \leq t \leq 250 \text{ °С} \quad (4.14)$$

$$\theta_s(t) = 250 + 250(t - 9)/(t_{max} - 9) \text{ при } 250 \text{ °С} \leq t \leq 500 \text{ °С.}$$

тут  $t_{max}=90$  хв, відповідно до класу вогнестійкості R 90

Для визначення коефіцієнту теплопровідності вогнезахисного покриття сталевих конструкцій застосовується формула згідно із додатком Д [120]:

$$\lambda_{p,t} = \left[ d_p \frac{V}{A_p} c_{a,t} \rho_a (1 + \phi/3) \frac{1}{(\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t} \right] [\theta_{a,t} + (e^{\phi/10} - 1) \Delta \theta_{g,t}] \quad (4.15)$$

За умов застосування методу додатку Д [120] теплоємність вважається сталою і рівна  $c_p = 1000$  кДж/(кг·К). Густина вогнезахисного покриття також вважається сталою і дорівнює  $\rho_p = 100$  кг/м<sup>3</sup>.

Числова залежність коефіцієнту теплопровідності від часу для кожної короткої колони перетворюється на залежність від температури та усереднюються для кожних 50 °С для всіх колон. Для визначення коефіцієнту теплопровідності для певного значення температури використовується лінійна інтерполяція.

Після цього перевіряються критерії адекватності (прийнятності) за рекомендаціями п. 2.6.1 [120]:

- час досягнення проектної температури для кожної проектної температури не має перевищувати реальний час, отриманий при випробуванні, більше як на 30 %;
- середнє значення відхилення розрахункового та експериментального часу досягнення проектної температури має бути менше за нуль;
- максимум 20 % окремих розбіжностей має бути більшим за нуль.

Використовуючи дані, що були визначені залежності коефіцієнта теплопровідності від часу, які потім були перераховані у залежності від температури. Числові дані щодо залежності коефіцієнта теплопровідності від час наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнту теплопровідності у залежності від температури

t, °C	Коефіцієнт теплопровідності при випробуваннях, $\lambda_{p,t}$ , Вт/(м·°C)											
	№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	№11	№12
20	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5	0.55	0.3	0.3	0.66	0.55	0.5	0.1
50	0.391	0.483	0.398	0.378	0.504	0.555	0.292	0.289	0.661	0.555	0.504	0.101
100	0.376	0.454	0.394	0.342	0.511	0.563	0.277	0.272	0.661	0.563	0.509	0.103
150	0.287	0.344	0.301	0.255	0.395	0.43	0.209	0.202	0.509	0.432	0.388	0.079
200	0.188	0.222	0.192	0.162	0.258	0.274	0.132	0.124	0.332	0.277	0.245	0.051
250	0.162	0.192	0.166	0.139	0.223	0.236	0.113	0.106	0.287	0.239	0.211	0.044
300	0.15	0.177	0.153	0.128	0.207	0.217	0.104	0.097	0.266	0.221	0.194	0.041
350	0.149	0.175	0.151	0.126	0.205	0.215	0.103	0.095	0.263	0.218	0.191	0.04
400	0.153	0.181	0.156	0.13	0.212	0.221	0.106	0.098	0.272	0.225	0.197	0.041
450	0.101	0.12	0.105	0.088	0.14	0.146	0.071	0.066	0.183	0.152	0.133	0.031
500	0.008	0.01	0.013	0.011	0.011	0.012	0.009	0.008	0.023	0.019	0.017	0.012
550	0.007	0.009	0.012	0.01	0.01	0.011	0.008	0.008	0.021	0.017	0.015	0.012
600	0.007	0.008	0.011	0.01	0.009	0.01	0.008	0.007	0.02	0.016	0.014	0.012
650	0.007	0.008	0.011	0.009	0.009	0.01	0.008	0.007	0.02	0.016	0.014	0.013
700	0.007	0.008	0.012	0.01	0.009	0.01	0.008	0.007	0.021	0.017	0.015	0.013
750	0.007	0.008	0.013	0.011	0.01	0.01	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
800	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
850	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
900	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
950	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
1000	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
1050	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
1100	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013
1200	0.008	0.009	0.013	0.011	0.011	0.011	0.009	0.008	0.022	0.019	0.016	0.013

\*Значення температур обмеженні часом 30 хв, хоча для розрахунку використовується час у всьому діапазоні тривалості розрахунку

Усереднена крива коефіцієнта теплопровідності наведені на рисунку 4.4.

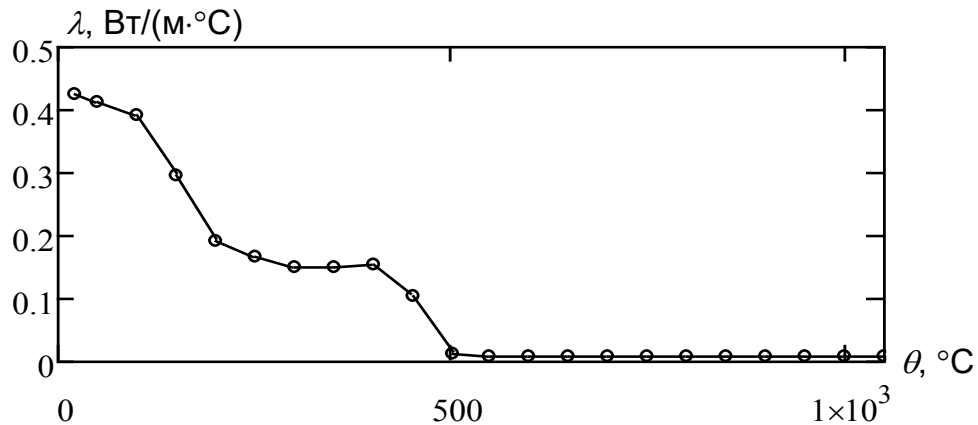


Рисунок 4.4 – Залежність усередненого значення коефіцієнту теплопровідності від температури зразків балок із вогнезахисним покриттям

У загальному випадку розрахунок міцності елементу конструкції під впливом пожежі відбувається у три етапи. Перший етап полягає у встановленні мінімальних меж вогнестійкості, що визначається вимагаємим класом вогнестійкості елементу. На другому етапі виконується сполучення навантажень на елемент під час пожежі за діючими навантаженнями на елемент у нормальному стані. На третьому етапі визначається відповідність конструктивних параметрів елементу вимогам щодо міцності у даний контрольний момент часу дії пожежі.

Відповідність заданим вимогам щодо вогнестійкості за несучою здатністю встановлюється порівнянням максимального навантаження, що здатний витримувати досліджуваний елемент конструкції із діючим навантаженням у даний контрольний момент часу. Якщо діюче навантаження більше за максимально можливе в цьому випадку вважається що стан втрати несучої спроможності настав. Тобто для збереження відповідним елементом несучої здатності повинна виконуватися умова:

$$E_{d,fi}/R_{d,fi} \leq 1,0 \quad (4.16)$$

де  $E_{d,fi}$  - розрахунковий результат дії при пожежі

$R_{d,fi}$  - розрахункова несуча здатність при пожежі

Для врахування зниження міцності арматурної сталі під час її нагрівання механічні характеристики помножуються на коефіцієнт зниження міцності. Відповідні коефіцієнти наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Понижуючі коефіцієнти для механічних характеристик конструкційних сталей

Температура сталі $\theta_a$ , °C	Понижуючі коефіцієнти за температури $\theta_a$ відносно значень $f_y$ і $E_a$ при 20 °C		
	Коефіцієнт зниження розрахункової границі текучості $k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$	Коефіцієнт зниження розрахункової границі пружності $k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}$	Коефіцієнт зниження модуля пружності $k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

*Примітка* — Значення коефіцієнтів для проміжкових температур визначаються лінійною інтерполяцією.

Для визначення алгоритму розрахунку потрібно класифікувати переріз стійки за параметром  $\epsilon$ , який визначається за формулою.

$$\varepsilon = 0,85 \cdot \left[ \frac{235}{f_y} \right]^{0,5}, \quad (4.17)$$

де  $f_y$  — межа текучості при 20 °С.

Клас перерізу стійки визначається згідно із п. 5.6 [121] за таблицею 4.5.

Якщо жоден переріз не відповідає умовам таблиці 4.5, тоді вважається, що сталева стійка має переріз 4 класу.

Розрахунковий опір боковому випучуванню  $N_{b,fi,t,Rd}$  стиснутої конструкції з поперечними перерізами 1, 2 або 3 класу при рівномірному розподіленні температури  $\theta_a$  у момент часу  $t$  визначається за формулою:

$$N_{b,fi,t,Rd} = \frac{\chi_{fi} A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}}, \quad (4.18)$$

де  $\chi_{fi}$  — знижувальний коефіцієнт у випадку втрати стійкості при згині для розрахункової пожежі;

$k_{y,\theta}$  — коефіцієнт зниження межі текучості сталі при температурі  $\theta_a$ , що досягається у момент часу  $t$ .

Значення  $\chi_{fi}$  приймається меншим із значень  $\chi_{y,fi}$  та  $\chi_{z,fi}$ , визначуваних за формулами:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}}, \quad (4.19)$$

де

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \cdot [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \lambda_\theta^2]; \quad \alpha = 0,65 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}.$$

Безрозмірна гнучкість  $\bar{\lambda}_\theta$  при температурі  $\theta_a$  визначається як:

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \cdot \left[ \frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5}, \quad (4.20)$$

де  $k_{E,\theta}$  — коефіцієнт зниження кута нахилу прямолінійної ділянки пружних деформацій області діаграми деформування сталі при досягненні температури  $\theta_a$  в момент часу  $t$ .

Таблиця 4.6 – Максимальні відношення товщини до ширини сталевих балок

Стиснуті внутрішні частини			

при нормальній температурі. Однак у в'язевому каркасі довжина зони бічного випучування конструкції  $l_{fi}$  може бути визначена з врахуванням того, що конструкція закріплена в напрямку нерозрізних або частково нерозрізних з'єднань по довжині в межах пожежного відсіку (секції) вище й нижче, таким чином, що забезпечується межа вогнестійкості конструкцій будинку, що виділяють ці пожежні відсіки (секції), не менш межі вогнестійкості стійки.

При проектуванні для умов стандартного впливу пожежі, розрахунковий опір  $N_{b,fi,t,Rd}$  конструкції стиску при нерівномірному розподілі температури в момент часу  $t$  може бути прийняте рівним розрахунковому опору  $N_{b,fi,\theta,Rd}$  конструкції стиску при рівномірному розподілі температури сталі  $\theta_a$ , рівній максимальній температурі  $\theta_{a,max}$ , що досягається в момент часу  $t$ .

В якості альтернативної використовується методика п. 4.2.3.6 [115] критичної температури  $\theta_{a,cr}$  для випадку вуглецевої сталі в момент часу  $t$  може бути визначена на основі коефіцієнту використання несучої здатності  $\mu_0$  в момент часу  $t = 0$  с використанням формули:

$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \cdot \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482, \quad (4.21)$$

де  $\mu_0$  приймається не менш 0,013.

Коефіцієнт використання несучої здатності  $\mu_0$  може бути визначений за формулою:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}, \quad (4.22)$$

де  $R_{fi,d,0}$  — значення  $N_{b,fi,\theta,Rd}$  в момент часу  $t = 0$ ;

$E_{fi,d}$  - навантаження на конструкцію.

При належності перерізу конструкції до 4 класу для розрахунку при пожежі розрахункова межа текучості сталі приймається як 0,2 % умовної межі текучості.

Знижувальні коефіцієнти для розрахункової межі текучості сталей у відношенні до межі текучості при 20 °С визначаються за таблицею 4.7.

Таблиця 4.7 – Понижуючі коефіцієнти для розрахунку перерізів 4 класу з вуглецевої сталі при високих температурах

Температура сталі $\theta_a, ^\circ\text{C}$	Коефіцієнт зниження межі текучості сталі гарячекатаних елементів конструкцій с поперечними перерізами 4 класу $k_{p0,2,\theta} = \frac{f_{p0,2,\theta}}{f_y}$	Коефіцієнт зниження межі текучості сталі холодноформованих елементів конструкцій с поперечними перерізами 4 класу $k_{p0,2,\theta} = \frac{f_{p0,2,\theta}}{f_y}$
20		1,00
100		1,00
200		0,89
300		0,78
400		0,65
500		0,53
600		0,30
700		0,13
800		0,07
900		0,05
1000		0,03
1100		0,02
1200		0,00

Для даного типу перерізу визначається згинальний момент опору перерізу та сила опору зрізу для перерізів 1 та 2 типів за формулами:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (4.23)$$

де  $A$  — площа поперечного перерізу;

$B$  — ширина перерізу;

$H$  — висота перерізу;

$h_w$  — висота стінки;

$r$  — радіус спряження полки зі стінкою;

$t_f$  — товщина полки;

$t_w$  — товщина стінки.

Приведена площа поперечного перерізу становить:  $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$ ,

Розрахунковий опір  $N_{fi,\theta,Rd}$  конструкції розтягу при рівномірно розподіленій температурі  $\theta_a$  визначається за формулою.

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} \cdot \frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}}, \quad (4.24)$$

де  $k_{y,\theta}$  — коефіцієнт зниження границі текучості сталі при температурі  $\theta_a$ , що досягається в момент часу  $t$ ;

$N_{Rd}$  — розрахунковий опір поперечного перерізу  $N_{pl,Rd}$  при проектуванні для умов експлуатації при нормальній температурі, відповідно до EN 1993-1-1

Таким чином для забезпечення класу вогнестійкості REI 90-NC за температурним режимом вуглеводневої пожежі потрібні такі характеристики залізобетонної плити захисної споруди для автотрансформатора: товщина плити – 380 мм, клас бетону – В30, густина бетону – 2500 кг/м<sup>3</sup>, клас арматури – А500, діаметр арматури – 16 мм, товщина вогнезахисного шару бетону – 40 мм, товщина вогнезахисту – 3,291 мм. В той же час для забезпечення класу вогнестійкості REI 90 за запропонованим параметричним температурним режимом пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму пожежі) потрібні такі характеристики залізобетонної плити захисної споруди для автотрансформатора: товщина плити – 200 мм, клас бетону – В30, густина бетону – 2500 кг/м<sup>3</sup>, клас арматури – А500, діаметр арматури – 16 мм, товщина вогнезахисного шару бетону – 25 мм, товщина вогнезахисту – 1,038 мм.

Таким чином, можна зазначити, що економічна ефективність використання запропонованого параметричного режиму пожежі (модифікованого вуглеводневого режиму) для оцінки вогнестійкості конструкцій захисної споруди автотрансформатора, як мінімум, за такими показниками будівельних конструкцій, як: товщина плити, товщина вогнезахисного шару бетону та товщина вогнезахисту який у порівнянні із чинним підходом дає можливість досягти економічного ефекту в 2 рази.

### 4.3 Висновки за четвертим розділом

Розроблені пропозиції щодо внесення зміни до Постанови Кабінету Міністрів України від 26 квітня 2024 року № 471 «Концепція «Країна-фортеця», а саме:

«несучі конструкції каркасу та перекриття захисної споруди типу «Шелтер» виконати з класом вогнестійкості не менше ніж REI 90 за умов впливу модифікованого вуглеводневого температурного режиму пожежі під час горіння трансформатора, який розташований у захисній споруді, який визначається через залежність:

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

Запропоновано новий нормативний підхід щодо оцінювання класу вогнестійкості несучих конструкцій каркасу та перекриття захисної споруди для автотрансформатору типу «Шелтер», за рахунок реалізації запропонованого параметричного температурного режиму пожежі, який у порівнянні із чинним підходом дає можливість досягти економічного ефекту в 2 рази.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційного дослідження, що є завершеною науковою роботою, одержано рішення актуального науково-технічного завдання розкриття закономірностей зміни температури під час пожежі на захисній споруді для автотрансформатора, як наукового підґрунтя для удосконалення нормативної бази щодо оцінювання вогнестійкості огорожувальних конструкцій захисної споруди для автотрансформатора. Зокрема можна вказати на такі основні результати:

1. Проаналізовано сучасний стан досліджень в області використання стандартизованих температурних режимів пожежі під час оцінювання класів вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд. Встановлено, що сьогодення зумовлене використанням температурного режиму вуглеводневої пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд, в яких встановлено автотрансформатори, що є досить жорстким режимом теплового впливу, особливо якщо врахувати фактично наявність замкнутого простору із обмеженим притоком свіжого повітря. Встановлено відсутність науково обґрунтованого температурного режиму під час пожежі на автотрансформаторах із урахуванням реального пожежного навантаження та конструктивних рішень таких споруд. Доцільним є використання температурного режиму, що може врахувати параметри захисної споруди для автотрансформатора.

2. Розроблено математичну модель процесів тепломасопереносу, що виникають під час пожежі у захисній споруді автотрансформатора. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель комплексно враховує геометричні та конструктивні характеристики приміщення (об'єм, конфігурацію, матеріали огорожувальних конструкцій), параметри пожежного навантаження (тепловиділення, швидкість вигорання, склад горючих матеріалів), а також аеродинамічні особливості через наявність прорізів у зовнішніх стінах (їх площу, розташування та вплив на газообмін із зовнішнім середовищем), що дає змогу

дослідити зміни температурного режиму під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора.

3. Встановлено залежність зміни температурного режиму під час пожежі в захисній споруді автотрансформатора з урахуванням конструктивних особливостей приміщення, властивостей пожежного навантаження та параметрів прорізів у зовнішніх стінах, яка виражається залежністю

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

4. Розроблено методику експериментального дослідження температурних режимів у захисній споруді автотрансформатора, що забезпечує коректне масштабування результатів фізичного моделювання на основі законів подібності. Встановлено співвідношення для перерахунку параметрів:  $Q_m = 0,053 Q_p$  – для тепловиділення та  $t_m = 0,497 t_p$  – для часових характеристик, що підвищує достовірність прогнозування температурних процесів у реальних умовах. Математичні моделі є адекватними оскільки їх відносні та середньоквадратичні відхилення від експериментальних результатів становлять 35 % та 90 °C відповідно.

5. Запропоновано новий нормативний підхід щодо оцінювання класу вогнестійкості несучих конструкцій каркасу та перекриття захисної споруди для автотрансформатора, за рахунок реалізації запропонованого параметричного температурного режиму пожежі, який у порівнянні із чинним підходом дає можливість досягти економічного ефекту в 2 рази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Аналітичні довідки про пожежі та їх наслідки в Україні 2014–2024 рр. [Електронний ресурс] // Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України – Режим доступу: <https://indcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh> (дата звернення 10.10.2025).
2. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2009-2012 роки: Статистичний збірник аналітичних матеріалів. За загальною редакцією В.С. Кропивницького. К.: УкрНДЦЗ, 2018. 102 с.
3. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013-2016 роки: Статистичний збірник аналітичних матеріалів. За загальною редакцією В.С. Кропивницького. К.: УкрНДЦЗ, 2018. 100 с.
4. Деякі питання інженерного захисту критичної інфраструктури: Постанова Каб. Міністрів України від 26 квітня 2024 року № 471. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF/ed20221220#Text> (дата звернення 10.10.2025).
5. National Fire Protection Association (NFPA). *Fire Protection Handbook*, 20th edition, edited by A. Cote. Quincy, MA, USA: National Fire Protection Association, 2023. [Electronic resource]. Available at: <https://www.nfpa.org> (accessed January 15, 2025).
6. Климась Р.В., Ніжник В.В., Фещук Ю.Л., Стилик І.Г., Некора В.С., Несенюк Л.П. Щодо обмеження поширення пожеж під час аварій на трансформаторному обладнанні. Збірник наукових праць: Пожежна безпека. Львів: № 39, 2021. С. 85-93.
7. Guo Y., Chen T., Zhou B., Zhang P., Wang Y., Wang X., Hao D. Research on fire suppression characteristics of compressed air foams in full-scale 220 kV converter transformer. *Fire*. 2025. Vol. 8, No. 1. P. 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire8010012>.
8. 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*. 2021. Vol. 57. P. 461–481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01012-x>.

9. Zhang J., Zhou R., Zhang J., Yang R., та ін. Experimental study on the burning characteristics of transformer oil pool fires. *Energy & Fuels*. 2020. Vol. 34, No. 4. P. 4967-4976. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00175>.

10. Qiao X., Wang Y., Zhang Y., Yu L., Zhang D., Wang Z. The development of a converter transformer fire model based on the Fire Dynamics Simulator and the analysis of cooling mechanisms of spraying and coating. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 23. P. 11337. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142311337>.

11. Sharma A., Saha T. K., Ma H. Thermal hazard and fire risk evaluation of transformer oil. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2025. Vol. 82. P. 105605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105605>.

12. Zhou T., Wu C., Chen B., Liu Y., Liang P. Fire risk assessment and experimental study of transformer oil pool fire in open and confined spaces. *Journal of Fire Sciences*. 2022. Vol. 40, № 5. P. 465-484. DOI: <https://doi.org/10.1177/07349041221112740>.

13. **Пальчиков Р.**, Коваль Р. Аналіз пожежної безпеки трансформаторів на основі масивів статистичних даних. *Науковий збірник Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (20). Київ: 2025. С.73-81. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.73-81>.

14. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Чинний від 2016.10.31. Інформаційний бюлетень Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ: 2016. 35 с.

15. ДБН В.1.2-7:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. Чинний від 2022.09.01. Інформаційний бюлетень Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ: 2021. 12 с.

16. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. Зі Зміною №1. Чинний від 2019.11.01. Інформаційний бюлетень Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ: 2014. 124 с.

17. Про затвердження Правил улаштування електроустановок. Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. 9-те вид. Харків: Техноцентр, 2020. 712 с.

18. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-88:2013. Правила будови електроустановок. Пожежна безпека електроустановок. Інструкція (НАПБ В.01.056-2013/111). – [Чинний від 2013-07-01]. – К.: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2013. – 75 с.

19. НПАОП 40.1-1.32-01 Правила будівництва електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – Чинний від 01.01.2002. – Київ: Держнаглядохоронпраці, 2001. – 150 с.

20. Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України. Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики України від 26.09.2018 № 491. – [Чинний від 2018-09-26]. – К.: Міністерство палива та енергетики України, 2018. – 102 с.

21. ДСТУ 3429-96. Електрична частина електростанції та електричної мережі. Терміни та визначення. – Чинний від 1997-01-01. – К.: Держстандарт України, 1996. 35 с.

22. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного будівництва. Чинний від 2025.08.25. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 104 с.

23. ДСТУ EN ІЕС 61936-1:2022. Електроустановки понад 1 кВ змінного струму та 1,5 кВ постійного струму. Частина 1. Змінний струм (EN ІЕС 61936-1:2021, ІЕС 61936-1:2021, ІДТ). Чинний від 01.01.2022. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 124 с.

24. ВБН В.1.1-034-2003 (НАПБ 03.005-2002, ГНД 34.03.307-2004, ВБН В.1.1-034-03.307-2003). Протипожежні норми проектування атомних електростанцій з водо-водяними енергетичними реакторами. Чинний від 2003.12.29. Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2003. 124 с.

25. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила (у редакції наказу від 21.06.2019 № 271). Чинний від 2019.06.21. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2019. 356 с.
26. ДСТУ EN 60332-1-2:2017. Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Частина 1-2. Випробування на вертикальне поширення полум'я одиничного ізольованого проводу чи кабелю. Метод випробування полум'ям попередньо змішаного типу потужністю 1 кВт (EN 60332-1-2:2004; A1:2015; A11:2016, IDT; IEC 60332-1-2:2004; A1:2015, IDT). Чинний від 2018.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 14 с.
27. СНиП 2.09.02-85\*. Виробничі будівлі. Зі змінами. Чинний від 1985.01.01. 12 с.
28. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). Чинний від 2008.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2008. – 141 с.
29. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі. Зміна № 1 (EN 1991-1-2:2002, IDT+EN 1991-1-2:2002/AC:2013, IDT+NA:2013). Чинний від 2010.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2010. 148 с.
30. С. Трошкін, О. Мирошник, І. Шкарабура, Т. Юрга, Д. Трошкіна. Вдосконалення генератора піни високої кратності для гасіння пожеж в кабельних спорудах тунельного типу. Науковий вісник ЧПБ НУЦЗУ: «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». Черкаси, 2023. № 2(7). С.165-173.
31. ДСТУ EN 1363-1:2023. Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги. Чинний від 2023.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 54 с.
33. UNE EN 1991-1-2:2019. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire.
34. ISO 834. Fire-resistance tests – Elements of building construction 4. BS 476-20 : Fire Tests on Building Materials and Structures. Part 20: Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction (General Principles).
35. DIN 4102-1-1998. Fire behaviour of building materials and building components - Part 1: Building materials; concepts, requirements and tests.

36. AS 1530. Fire Test to Building Material – Standard. AS 1530: Methods for fire tests on building materials, components and structures.

37. BS 7436:1996. Specification for data transfer between agricultural tractors and attached machinery (data bus protocol).

38. VII.4 Fire resistance of structures.

39. Een duurzame brandstofvisie met LEF, Debelangrijke uitkomsten uit het SER-visietraject naar een duurzame brandstoffenmix in Nederland, SER, juni 2014.

40. Fires in Transport Tunnels; Report on Full-Scale Tests; EUREKA project EU 499 FIRETUN; editor: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Düsseldorf, November.1995.

41. Richtlinien für Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln RABT (Guidelines for Furnishing and Operating Road Tunnels). Ed.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

42. Luchian, S.-F.: Fire Tests in the Memorial Tunnel; paper presented at the SP International Conference on Fires in Tunnels, Boras, Sweden, October 10-11,1994

43. BS EN 1363-2:1999/ Fire resistance tests. Alternative and additional procedures.

44. Inter-ministry circular № 2000-63 of August 200.

45. Інформаційні матеріали Міненерго України стосовно стану пожежної та техногенної безпеки в паливно-енергетичному комплексі. [Електронний ресурс].  
Режим доступу: [http://www.mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat\\_id=245293181](http://www.mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=245293181).

46. Проектна документація на автотрансформатори класів АТ 750 кВ та АТ 330 кВ.

47. ДСТУ EN 60076-1:2016. Трансформатори силові. Частина 1. Загальні відомості (EN 60076-1:2011, IDT). Чинний від 2017.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 36 с.

48. ДСТУ 3429-96. Електрична частина електростанції та електричної мережі. Терміни та визначення. Чинний від 1997.01.01. Київ: Держстандарт України, 1996. 35 с.

49. Климась Р.В. Визначення безпечної величини температури трансформаторного масла. Scientific Collection «InterConf», (94): with the Proceedings of V International scientific and practical conference «Science, education, innovation: topical issues and modern aspects». Tallinn, Estonia: Üningu Teadus Juhatus, 2021. Pp. 574-578.

50. Яворський Б.М., Детлаф А.А. Курс фізики. Теплота. Київ: Вища школа, 2004. 512 с.

51. Климась Р.В., Ніжник В.В., Фещук Ю.Л., Стилик І.Г., Некора В.С., Несенюк Л.П. Щодо обмеження поширення пожеж під час аварій на трансформаторному обладнанні. Збірник наукових праць: Пожежна безпека. Львів: № 39, 2021. С. 85-93. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.39.2021.10>.

52. 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. Budapest, Hungary: vol. 1, № 79 (79), 2021. Pp. 36-44. DOI: <https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-1-36-44>.

53. Pozdieiev, S., Nekora, O., Kryshstal, T., Zazhoma, V., Sidnei, S. Method of the calculated estimation of the possibility of progressive destruction of buildings in result of fire (2018) MATEC Web of Conferences, 230, art. no. 02026.

54. Nekora O., Slovynsky V., Pozdieiev S. The research of bearing capacity of reinforced concrete beam with use combined experimental-computational method (2017) MATEC Web of Conferences, 116, art. no. 02024.

55. S. Troshkin, O. Kulitsa, S. Pozdieiev, T. Kostenko, O. Zemlianskyi, N. Zaika. Determination of heat transfer process in vertical cable tunnels of nuclear power plants under real fire conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. №5/10 (125). С.34-42.

56. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

57. Ларбі, Ель Мутассім, and Эль Мутассим Ларби. "Вогнестійкість монолітних залізобетонних конструкцій будівель". (2001).

58. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Набрання чинності 2014.01.01. Інформаційний бюлетень Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. Київ: 2013. 44 с.

59. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні. Наказ МВС від 30.12.2014 № 1417, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 05 березня 2015 р. за № 252/26697. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15#Text>.

60. **Пальчиков Р.В.**, Ніжник В.В. Аналіз температурного режиму пожежі в захисних конструкціях автотрансформаторів: проблематика та наукові підходи до оцінки вогнестійкості. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки» Київ: Київський інститут національної гвардії України, 2025. С. 423-424.

61. Skorobahatko T., Nizhnyk V., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D, Kovalyshyn V., **Palchykov R.**, Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. AD ALTA – Journal of Interdisciplinary Research. 2024/ Vol. 14(1). P. 245-249. ISSN: 2464-6733 (online).

62. 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. К.: № 11 (73), 2019. С. 47–51.

63. Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти: дис. доктора тех. Наук: 21.06.02. Ніжник Вадим Васильович. Київ, 2020. 409 с.

64. Kravchenko R., Illiuchenko P., Onyshchuk A., Zazymko O. (2021). Improvement of test methods and criteria for evaluation of resistance to flame propagation of long elements of the wiring system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10 (114), 57–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.249105>

65. Tsapko Y., Likhnyovskyi R., Tsapko A., Kovalenko V., Slutska O., Illiuchenko P., Kravchenko R., Sukhanevych M. (2023). Determining the thermal-

physical characteristics of a coke foam layer in the fire protection of cable articles with foaming coating. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10 (122), 22–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275550>.

66. **Пальчиков Р.** Обґрунтування параметричного температурного режиму в захисних спорудах трансформаторів. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»*. ISSN-2524-0226, №2 (42), 2025 С. 69-82. <https://doi.10.52363/2524-0226-2025-42-5>.

67. Benseghir H., et al. Modelling emergency evacuation from an industrial building under spreading fire using a social force model with fire dynamics. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 41: 38-42.

68. Clauser, C., & Huenges, E. (1995). Thermal conductivity of rocks and minerals. *Rock physics and phase relations: a handbook of physical constants*, 3, 105-126 с.

69. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model. K. McGrattan [et al.]. NIST Special Publication 1018-5. 2009. 94 p.

70. Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide / K. McGrattan [et al.]. NIST Special Publication 1019-5. 2009. 176.

71. Forney, G.P. Smokeview (Version 5): A Tool for Vizualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume 1: User's Guide. G.P. Forney. NIST Special Publication 1017-1, 2008. 142 p.

72. Величко Л.Д., Семерак М.М., Лозинський Р.Я. Термодинаміка і теплопередача в пожежній справі. Львів: ЛДУ БЖД, 2011. 504 с.

73. [Mdx.plm.automation.siemens.com](http://Mdx.plm.automation.siemens.com) [Електронний ресурс]: [Інтернет-портал]. Електронні дані. [5800 Granite Parkway, Suite 600, Plano, TX 75024 USA].

74. D.K. Lilly. A Proposed Modification of the Germano Subgrid-Scale Closure Method. *Physics of Fluids A*, 4(3): 633–635, 1992.

75. H.R. Baum and K.B. McGrattan. Simulation of Large Industrial Outdoor Fires. In *Fire Safety Science. Proceedings of the Sixth International Symposium*. International Association for Fire Safety Science, 2000.

76. Поздєєв С.В., Поклонський В.Г., Некора О.В., Поздєєв А.В. Дослідження ефективності математичних моделей для розв'язання теплотехнічної задачі при визначенні вогнестійкості залізобетонних конструкцій. Будівництво матеріалознавство, машинобудування: [зб. наук. праць]. Дніпропетровськ: ПГАСА, 2010. №52. С. 44-48.

77. С. Трошкін. Дослідження адекватності результатів математичного моделювання динаміки пожежі в приміщенні за допомогою програмного комплексу FDS. С. Сідней, Е. Тищенко, В. Некора. Науковий вісник АПБ ім. Героїв Чорнобиля: «Пожежна безпека: теорія і практика». Черкаси, 2015. №1 (20). С.104-109.

78. Климась Р. В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях: дис. канд. техн. наук: 21.06.02 Пожежна безпека. Климась Руслан Володимирович; Львівський державний університет безпеки життєдіяльності. Львів, 2022. 250 с. Іл.: 20. Табл.: 15. Бібліогр.: 120 назв.

79. Іллюченко, П. (2024). Щодо підвищення ефективності способу запобігання поширення пожежі під час аварійної розгерметизації маслонаповнених трансформаторів. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, (2 (18)), 90-100.

80. Поздєєв С. В., Шеверєв Є. Ю., Самченко Т. В. [та ін.]. Дослідження впливу пожежного навантаження на температурний режим пожежі у кабельному тунелі. Науковий вісник УкрНДПБ. Київ, 2018. С. 13–20.

81. Сохацький А. В. Неявна факторизована схема апроксимації рівнянь Нав'є-Стокса в змінних вихор-функція течії. Прикладні проблеми механіки рідини і газу. Севастополь: Сев. ГТУ, 1996. С. 51.

82. Васильєв В.В., Кузьмук В.В. мережі Петрі, Паралельні алгоритми і моделі мультипроцесорних систем. Київ: Наукова думка, 1990. 216 с.

83. Івахненко А.Г. Індуктивний метод самоорганізації моделей складних систем. Київ: Наукова думка, 1982. 296 с.

84. Кельтон В., Лоу А. Імітаційне моделювання. Класика CS. 3-тє видання. СПб.: Пітер; Київ: Видавнича група BHV, 2004. 847 с.
85. Ситник В.Ф., Орленко Н.С. Імітаційне моделювання: Навчальний посібник. Київ: КНЕУ, 1998. 230 с.
86. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделювання систем: Підручник для вишів. 1985. – 271 с.
87. Томашевський В.М., Жданова О.Г., Жолдакова О.О. Вирішення практичних завдань методами комп'ютерного моделювання: Навч. посібник. - К.:Корнійчук, 2001. – 267с.
88. Трошкін С.Е. Оцінка класу вогнестійкості несучої стіни з цегли. Отрош Ю.А. Матеріали III Всеукраїнсько студентського науково-практичного семінару «Досвід впровадження у навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій». Кропивницький. 2015. С.105-108.
89. Трошкін С.Е. Застосування комп'ютерних технологій для моделювання з'єднання стін. Ступак Д.О. Матеріали III Всеукраїнсько студентського науково-практичного семінару «Досвід впровадження у навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій». Кропивницький. 2015. С.84-87.
90. Климась Р.В. Визначення безпечної величини температури трансформаторного масла. Scientific Collection «InterConf», (94): with the Proceedings of V International scientific and practical conference «Science, education, innovation: topical issues and modern aspects». Tallinn, Estonia: Üningu Teadus Juhatus, 2021. Pp. 574-578.
91. Змага Я. В. Розрахунковий метод підвищеної точності для оцінки межі вогнестійкості дерев'яних балок з вогнезахисним просоченням: дис. кандидата техн. наук: 21.06.02. Змага Яна Василівна. Х., 2016. 134 с.
92. Інструкція з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки. УкрНІЦЗ. Київ. 2007.
93. Ніжник В.В. Наукові дослідження теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класу В на сусідні об'єкти / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, Я.В. Балло, С.Ю. Голікова. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з

міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси. 2019. С. 98-101.

94. Байдак Ю.В., Масарік Міхал, Матухно В.А. Моделювання процесу конвективного теплообміну маслом з поверхні розподільчого трансформатора. Журнал: Refrigeration Engineering and Technology. Одеса: № 53 (1), 2021. С. 44-53. DOI: <https://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i1.542>.

95. Заїка П.І., Заїка Н.П., Лукашів Т.В. Особливості пожежної небезпеки трансформаторів. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 176-178.

96. **Palchykov, R.**, Ballo, Y., Nizhnyk, V., Mykhailov, V., Gavryliuk, A., Loik, V., Synelnikov, O., Synelnikov, S., Stepanenko, V., & Nuianzin, O. (2024). Substantiating the parametric temperature mode during a fire on transformers placed inside protective structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10 (132)), 37–45. ISSN: 2812-9105 (online). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317332>.

97. В. Ніжник, Я. Балло, В. Михайлов, **Р. Пальчиков** Обґрунтування модифікованого вуглеводневого температурного режиму пожежі в трансформаторі, захищеного огорожувальними конструкціями. Екологічна безпека в умовах війни : збірник тез доповідей V Міжнародної науковопрактичної конференції, м. Львів, 21 листопада 2024 року. Львів: ЛДУБЖД, 2024. 193-195 с.

98. A. Karpelson. Приклад застосування: як теорія подібності використовується в ультразвуковому тестуванні бетону. Розглянуто  $\pi$ -групи, безрозмірні критерії та практичні методи приведення моделі до прототипу. *Theory of Similarity and Ultrasonic Testing*. 2024.

99. Louda Et Al. Сучасний науковий огляд, де викладено концепції теорії подібності як основу для аналізу складних явищ і моделювання. *The Theory of Similarity and Analysis of Dimensions*. 2022.

100. Encyclopedia of Mathematics - Similarity Theory. Вичерпне пояснення принципів подібності та розмірного аналізу.

101. Акмен Р. Г. Тепло- та масообмін. Текст лекцій і задачі з коментарями до розв'язання : для студентів спеціальностей 7.050601-01 «Теплоенергетика», 7.050601-02 «Енергетичний менеджмент». Р. Г. Акмен. Харків : НТУ "ХПІ", 2009. 148 с.

102. Тарахно О.В. Теоретичні основи пожежовивбухонебезпеки. Харків: АЦЗУ, 2006. 395 с.

103. ДСТУ EN 3-7:2014. Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих параметрів і методи випробування (EN 3-7:2004 + A1:2007, IDT). Чинний від 2014.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2014. 44 с.

104. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII : станом на 1 січ. 2022 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>.

105. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII // Відомості Верховної Ради України. – 1992. – № 49. – Ст. 668. – Статус: чинний, станом на 1 січ. 2022 р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.

106. Правила безпеки праці в органах і підрозділах ДСНС України: Наказ ДСНС України від 31.12.2025 № НС-1661. <https://kyiv.dsns.gov.ua/upload/2/5/3/4/9/1/2/pravila-bezpeki-praci-v-organax-ta-pidrozdilax-dsns.pdf>.

107. Інструкція з проведення міжлабораторних порівняльних випробувань у сфері пожежної безпеки. УкрНІЦЗ. Київ. 2007.

108. Іллюченко П., Ніжник В. Нікулін О. (2023). Методика експериментальних досліджень та обґрунтування параметрів теплообмінної системи для зниження температури трансформаторного масла нижче температури спалаху у маслоприймачі трансформаторної підстанції. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека, (1(15)), 116–127. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1\(15\).116-127](https://doi.org/10.33269/nvcz.2023.1(15).116-127).

109. Ніжник В.В. Наукові дослідження теплового впливу факелу модельного вогнища пожежі класа В на сусідні об'єкти / В.В. Ніжник, Ю.Л. Фещук, Я.В. Балло,

С.Ю. Голікова. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». Черкаси. 2019. С. 98-101.

110. **Пальчиков Р.**, Ніжник В. Дослідження температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора. Комунальне господарство міст. Том 6. Випуск 194 (2025): Серія: Технічні науки та архітектура. С. 347-352.

111. Коваль М.В., Коваль В.В., Коцюрuba В.І., Білик А.С. (2023). Організаційно-технічні засади побудови системи інженерного захисту об'єктів критичної інфраструктури енергетичної галузі України. Наука і оборона. Київ, Вип. 3-4, 11-16.

112. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Мінрегіон України, УкрНДІпроектстальконструкція. К. Укрархбудінформ, 2018. 30 с.

113. IEC 60695-1-40:2013. Fire hazard testing. Part 1-40: Guidance for assessing the fire hazard of electrotechnical products. Insulating liquids. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2013. 34 p.

114. ДСТУ ISO 834-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Елементи будівельних конструкцій. Частина 1. Загальні вимоги (ISO 834-1:1999, IDT). Чинний від 2023.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2023. 64 с.

115. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). Чинний від 2010.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2010. 84 с.

116. EN 1992-1-2 (2004) (English): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design.

117. European Committee for Standardization. (2002). Eurocode 0: Basis of structural design (EN 1990:2002 + A1:2005). CEN.

118. ДСТУ-Н Б EN 1996-1-2:2010. «Єврокод 6. Проектування кам'яних конструкцій. Частина 1-2. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1996-1-2:2005, IDT)». Чинний від 2010.01.01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2010. 104 с.

119. Kirby, B. (1999), The Behaviour of Multi-Storey Steel Framed Buildings in Fires, A European Joint Research Program, U.K.: British Steel Swinden Technology Centre.

120. ДСТУ Б В.1.1-7:2017. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2017). Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих впливів і пожеж. Основні положення проектування. Київ. Чинний від 2017.01.01. Київ: 2017. 47 с.

121. European Committee for Standardization. (2004). Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1994-1-1:2004). CEN.

## **ДОДАТОК А**

Список публікацій за темою дисертації

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **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. ISSN: 2812-9105 (online). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.317332>.

*Особистий внесок – здобувач здійснив вибір сценарію дослідження, провів аналітичні дослідження, сформував висновки та пропозиції.*

2. **Пальчиков Р.**, Коваль Р. Аналіз пожежної безпеки трансформаторів на основі масивів статистичних даних. *Науковий збірник Науковий вісник: цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (20). Київ: 2025. С. 73-81. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.73-81>.

*Особистий внесок – здобувач здійснив систематизацію та опрацювання масивів статистичної інформації щодо пожеж, які виникали на трансформаторах, проаналізував динаміку змін частоти пожеж за останні роки, визначив найбільш поширені причини займання та фактори, що впливають на поширення пожежі, побудував статистичні моделі оцінки небезпеки, що дозволяють прогнозувати ймовірність виникнення пожеж залежно від групи факторів ризику.*

3. **Пальчиков Р.** Обґрунтування параметричного температурного режиму в захисних спорудах трансформаторів. *Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій»* ISSN-2524-0226, №2 (42), 2025 С. 69-82. <https://doi.10.52363/2524-0226-2025-42-5>.

*Особистий внесок – є одноосібною роботою.*

4. **Пальчиков Р.**, Ніжник В. Дослідження температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора. *Комунальне господарство міст*. Том 6. Випуск 194 (2025): Серія: Технічні науки та архітектура. С. 347-352.

*Особистий внесок – здобувач здійснив аналіз температурного режиму пожежі в захисній споруді для автотрансформатора, розглянув вплив різних джерел тепла та матеріалів конструкції на формування температурних полів, встановив закономірності зміни температури у часі та просторовому розподілі, запропонував методик оцінки безпечного часу перебування персоналу в споруді.*

5. Skorobahatko T., Nizhnyk V., Mykhailov V., Ballo Y., Sereda D, Kovalyshyn B., **Palchykov R.**, Demkiv A., Otrosh V., Shcholokov E. Current state of research and normative framework regarding assessment of fire alarm systems suitability for operation. AD ALTA – Journal of Interdisciplinary Research. 2024/ Vol. 14(1). P. 245-249. ISSN: 2464-6733 (online), **Web of Science**.

*Особистий внесок – здобувач здійснив розгляд застосування стандартизованих температурних режимів при оцінюванні в сучасних умовах класів вогнестійкості будівельних захисних конструкцій, в яких розміщуються трансформатори, проаналізував сучасний стан щодо визначення температурного впливу пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості огорожувальних захисних конструкцій, в яких розташовують трансформатори, показав необґрунтованість існуючого підходу щодо використання температурного режиму вуглеводневої пожежі під час оцінювання класу вогнестійкості огорожувальних захисних конструкцій, в яких розташовують трансформатори.*

6. В. Ніжник, Я. Балло, В. Михайлов, **Р. Пальчиков** Обґрунтування модифікованого вуглеводневого температурного режиму пожежі в трансформаторі, захищеного огорожувальними конструкціями. Екологічна безпека в умовах війни : збірник тез доповідей V Міжнародної науковопрактичної конференції, м. Львів, 21 листопада 2024 року. Львів: ЛДУБЖД, 2024. 193-195 с.

*Особистий внесок – здобувачу особисто належить обґрунтування актуальності проведення наукових досліджень*

7. **Пальчиков Р.В.**, Ніжник В.В. Аналіз температурного режиму пожежі в захисних конструкціях автотрансформаторів: проблематика та наукові підходи до оцінки вогнестійкості. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми забезпечення державної безпеки» Київ: Київський інститут національної гвардії України, 2025. С. 423-424.

*Особистий внесок – здобувачу особисто належить обґрунтування розрахункових сценарії, проведення розрахунків, узагальнення результатів розрахунків та формування висновків щодо температурного режиму пожежі.*

**ДОДАТОК Б**

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



## МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

пр-т Берестейський, 14, м. Київ, 01135,  
 тел.: (044) 351-40-96, (044) 351-40-35, (044) 351-40-01,  
 E-mail: miu@mtu.gov.ua, сайт: www.mtu.gov.ua, код згідно з ЄДРПОУ 37472062

від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Національний університет  
 цивільного захисту України

### Довідка про впровадження

Результати дисертаційної роботи Пальчикова Романа Володимировича за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах» використовуються Міністерством під час удосконалення чинної нормативної та нормативно-правової бази у будівництві, зокрема в частині нормування навантажень на будівельні конструкції від пожежі, а також встановлення вимог до огорожувальних конструкцій захисних споруд трансформаторів.

Заступник Міністра

Наталія КОЗЛОВСЬКА



ДОКУМЕНТ СЕД

Підписувач Козловська Наталія Вікторівна  
 Сертифікат 6FA97849F1B2570D0400000095C701005E030600  
 Дійсний з 03.02.2025 12:33:58 по 03.02.2026 12:33:58

Міністерство розвитку громад  
 та територій України



37116/26/14-25 від 16.12.2025

Вих. № 350/12  
від 09 грудня 2025 р.

**АКТ**  
**впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**ПАЛЬЧИКОВА Романа Володимировича**  
**за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на**  
**автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах»**

Даний акт складено про те, що в практичну діяльність членів Конфедерації будівельників України впроваджено результати дисертаційної роботи Пальчикова Р.В. за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах» в частині використання запропонованого модифікованого температурного режиму вуглеводневої пожежі під час проєктування вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів.

Генеральний директор



Олександр ЧЕРВАК

## АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

ПАЛЬЧИКОВА Романа Володимировича

за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на  
автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах»

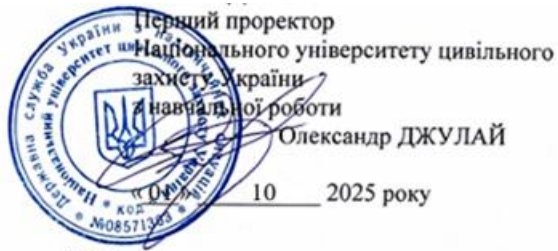
Даний акт складено про те, що в ТОВ «УКРАГРОІНДУСТРІЯ» впроваджено в практичну діяльність компанії (асоціації) результати дисертаційної роботи Пальчикова Р.В. за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах» в частині використання запропонованого модифікованого температурного режиму вуглеводневої пожежі під час проектування вогнестійкості будівельних конструкцій захисних споруд для автотрансформаторів.

Директор

24.12.2025



В`ячеслав ПІСКУН



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах» автора **Пальчикова Романа Володимировича**

Комісія у складі:

голови – начальника навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидата технічних наук, доцента Мельника В.П.

та членів – доцента кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України, кандидата технічних наук, доцента Миргород О.В.;

старшого викладача кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України Майбороди Р.І.

склали акт, який підтверджує, що результати дисертаційної роботи за темою «Обґрунтування температурного режиму пожежі на автотрансформаторах, що встановлюються в захисних спорудах» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу. Запропонований модифікований температурний режим вуглеводневої пожежі під час оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки Національного університету цивільного захисту України в навчальній дисципліні «Системи забезпечення пожежної безпеки об'єктів» при підготовці здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 261 «Пожежна безпека». Впровадження результатів досліджень даної дисертаційної роботи дозволить підвищити якість провадження лекційних та практичних занять шляхом розширення знань здобувачів за рахунок практичного застосування нових наукових даних.

Голова комісії:

начальник навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки, кандидата технічних наук, доцента

Валентин МЕЛЬНИК

Члени комісії:

доцент кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки НУЦЗ України, кандидат технічних наук, доцент

Оксана МИРГОРОД

старший викладач кафедри державного нагляду у сфері пожежної та техногенної безпеки НУЦЗ України

Роман МАЙБОРОДА