

ІНСТИТУТ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ  
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

КЛИМАСЬ РУСЛАН ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 614.841.3:621.314

## ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРИПИНЕННЯ ТА  
ПОШИРЕННЯ ГОРІННЯ СИСТЕМОЮ ВОГНЕПЕРЕШКОДЖАННЯ  
НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ**

21.06.02 – пожежна безпека  
(261 – пожежна безпека)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
(доктора філософії)

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

 Руслан КЛИМАСЬ

Науковий керівник:  
НІЖНИК Вадим Васильович  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

Перший примірник дисертації є  
ідентичним за змістом з усіма іншими  
примірниками дисертації

Учений секретар

к.т.н. Дмитро КОБИЛКІН

Київ-2022



## АНОТАЦІЯ

*Климась Р.В.* Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 «Пожежна безпека» (261 – Пожежна безпека). – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту ДСНС, Київ, 2022.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, її зв'язок з науковими програмами та планами, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет досліджень, сформульовано наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів, наведено відомості про апробацію та публікацію результатів досліджень.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання у сфері пожежної безпеки – розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла від параметрів гравійної засипки маслоприймача, як наукового підґрунтя для підвищення ефективності системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі.

**Мета дослідження.** Метою дисертаційної роботи є виявлення закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення наявних конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають виконувати функцію припинення горіння та забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху.

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан і підходи до обмеження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях, а також наведено статистичні дані про пожежі в енергетичній галузі, зокрема на

трансформаторному обладнанні, що, як правило, супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його загорянням.

Зазначено, що у роботах вчених, присвячених питанням запобігання виникненню пожеж та їх гасіння в електроустановках, недостатньо досліджені процеси тепломасообміну для забезпечення ефективного відведення тепла трансформаторного масла, що проходить через вогнезагороджувач під час аварії на трансформаторних підстанціях, і не виявлені закономірності зниження температури масла до нижчої за його температуру спалаху в залежності від геометричних параметрів гравійної засипки.

Виявлено недоліки нормативних вимог щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях, зокрема, нормативні підходи щодо засипки гравієм всієї площі маслоприймача не мають відповідного наукового обґрунтування та прийняті з використанням експертного методу. Встановлено необхідність проведення досліджень, спрямованих на розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

У **другому розділі** наведено теоретичні дослідження умов припинення й обмеження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях. Встановлено перелік параметрів, що впливають на зниження температури трансформаторного масла під час його проходження через вогнезагороджувач. Визначено перелік параметрів, що слід враховувати під час дослідження залежності зниження температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки, а саме: висота гравійної засипки, ширина гравійної засипки, ухил маслоприймача у бік маслозбірника. Критерієм оцінювання ефективності заходів припинення й обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях прийнято умову досягнення значення температури масла, що горить, меншого за температуру його спалаху у 150 °С.

Для теоретичного описання процесу тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою з метою обґрунтування її ширини та висоти у якості математичної моделі використано рівняння руху та рівняння нерозривності

поток, що описуються системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса. Основні рівняння доповнюються математичними моделями, що враховують сукупні явища; під час апроксимації диференціальних рівнянь використано метод кінцевих різниць із їх розв'язком за явною схемою «предиктор-коректор» інтегруванням по температурі.

Теоретичне визначення ефективного ухилу маслоприймача у бік маслозбірника проводилося за адаптивною формулою для прямокутних каналів.

Обґрунтування показника прийнятого критерію оцінювання ефективності системи обмеження поширення пожежі (температури спалаху трансформаторного масла) проводилося за одним із стандартизованих методів, встановлених ДСТУ 8829:2019 *Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація.*

У **третьому розділі** наведено результати математичного моделювання процесу тепломасообміну між трансформаторним маслом і гравійною засипкою маслоприймача, а також зниження його температури від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

Під час математичного моделювання розрахунок процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач проводився у 2 етапи. На I етапі визначалася геометрична форма потоку масла крізь гравійну засипку. На II етапі проводився розрахунок температурного розподілу у потоці масла крізь щєбінь. Було прийнято, що щєбінь має однотипний розмір у ширину  $\approx 35$  мм та варіативний повздовжній розмір в інтервалі 35-70 мм. За результатами математичного моделювання встановлено, що трансформаторне масло температурою у  $250$  °С на вході в шар гравійної засипки маслоприймача при проходженні через вогнезагороджувач з геометричними розмірами  $1500$  мм $\times$  $250$  мм охолоджується до температури  $148$  °С.

Враховуючи геометричні параметри маслоприймача, визначено мінімально необхідний його ухил, що варіює у межах від  $0,045$  м/м до  $0,05$  м/м. Такий ухил забезпечує ефективне відведення масла в аварійну ємкість упродовж нормованого часу, а також забезпечує зменшення площі можливої пожежі у  $2,5$  рази за даних

умов моделювання. Результатами проведених розрахунків підтверджено, що ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника має становити 0,05 м/м.

З використанням запропонованих математичних моделей проведено повний факторний обчислювальний експеримент для попередньо визначених параметрів, у результаті чого отримано залежність зниження температури трансформаторного масла у маслоприймачі від його ухилу, ширини та висоти гравійної засипки.

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень з обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції, проведених за попередньо розробленою методикою, сутність яких полягала у виявленні закономірностей зниження температури трансформаторного масла, що горить, до температури нижче температури його спалаху в залежності від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача під час зливання в аварійну ємкість.

Експериментальні дослідження проводилися на спеціально створеному дослідному стенді. Експеримент імітував аварійну ситуацію у трансформаторі за підвищення температури масла до аварійного значення ( $T_{\text{самозаймання}} \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), його розгерметизацію з подальшим виливом масла у маслоприймач із наступним загорянням масла. Під час проведення експерименту використовувалося трансформаторне масло типу Nyro 11GX виробництва шведської компанії Nynas AB, визначення показників пожежної небезпеки якого за методами, встановленими ДСТУ 8829:2019, дозволило встановити діапазон зниження його температури від аварійного значення до нижчої за  $T_{\text{спалаху}}$  у  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , що і стало критерієм оцінювання ефективності системи вогнеперешкоджання на маслonaповнених трансформаторних підстанціях в умовах пожежі. Принципами проведення експериментальних досліджень визначили наступне: над гравійною засипкою не повинно бути полуменевого горіння парів масла; температура масла у місці отвору його зливу в аварійну ємкість (маслозбірник) не повинна перевищувати  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Експеримент повторювали шість разів. Полуменеве горіння парів масла над гравійною засипкою спостерігалось при її ширині менше ніж 1200 мм. При

ширині гравійної засипки 1500 мм горіння парів масла над її поверхнею припинялося.

За результатами експериментальних досліджень встановлено залежність зниження температури трансформаторного масла від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача.

У **п'ятому розділі** розроблено пропозиції щодо вдосконалення наявних конструктивних рішень по обмеженню поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях. На основі отриманих результатів досліджень розроблено методичну базу, що є підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача, зокрема, сформульовано пропозиції щодо внесення змін до *Правил улаштування електроустановок*.

Економічний ефект від запропонованих технічних рішень порівняно з існуючими підходами за розрахунком техніко-економічного обґрунтування параметрів гравійної засипки у маслоприймачах маслонаповнених трансформаторних підстанцій на прикладі довготривалої експлуатації для міста Києва, з урахуванням зменшення кількості гравію й експлуатаційних витрат, складає до 72 %.

Таким чином, на основі виявлених закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла обґрунтовано параметри гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, за яких температура трансформаторного масла знижується до безпечної величини (від 250 °С до 150 °С), а саме: мінімальні розміри гравійної засипки: ширина 1500 мм, висота 250 мм, ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника 0,05 м/м.

У **додатках** представлений допоміжний матеріал, необхідний для повного розуміння предмету дослідження, а також акти впровадження результатів дисертаційного дослідження у практичну діяльність і освітній процес.

**Ключові слова:** гравійна засипка, маслонаповнені трансформатори, маслоприймач, охолодження масла, пожежа, припинення горіння, трансформаторна підстанція, трансформаторне масло.

## ABSTRACT

*Klymas R.V.* Improving the method of predicting the cessation and spread of combustion fire prevention system at oil-filled transformer substations – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Ph.D., specialty 21.06.02 – «Fire safety» (261 – Fire safety). – Institute of Public Administration and Research in Civil Protection, Kyiv, 2022.

In the **introduction** substantiates the relevance of the dissertation, its connection with scientific programs and plans, defines the purpose, objectives, object and subject of research, formulates scientific novelty and practical significance of the results, and provides information on testing and publication of the research results.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific problem in the sphere of fire safety – revealing the patterns of cooling and stopping the burning of transformer oil depending on the parameters of oil receiver gravel backfill as a scientific basis for the improving of the efficiency of fire prevention system of oil-filled transformer substations under fire conditions.

**The purpose of research.** The purpose of the dissertation is to reveal the laws of cooling and stopping the burning of transformer oil depending on the parameters of the gravel backfill of the fire protection system of the transformer substation, as a basis for improving existing structural solutions during the design of oil receivers of transformer substations, which should perform the function of stopping burning and ensuring oil cooling below the flash point.

In the **first section** analyzes the current state and approaches to limiting the spread of fire at oil-filled transformer substations as well as statistics on fires in the energy sector, in particular on transformer equipment, which are usually accompanied by emergency oil spills from the transformer and its ignition.

It is noted that the papers prepared by some scientists on fire prevention and extinguishing in electrical installations studied insufficiently the processes of heat and mass transfer to ensure effective heat dissipation of transformer oil passing through the flame barrier during accidents at transformer substations, and no patterns of lowering oil

temperature to some value lower than its flash point depending on the geometric parameters of the gravel backfill were revealed.

A number of shortcomings of regulatory requirements to limit the spread of fire during accidents at oil-filled transformer substations were revealed, in particular, regulatory approaches to gravel filling of the entire area of the oil receiver have no appropriate scientific basis and have been adopted using the expert method. The necessity of researches aimed at revealing the patterns of cooling and stopping the burning of transformer oil depending on geometrical parameters of gravel backfill of oil receiver was established.

In the **second section** presents theoretical studies of the conditions for stopping and limit the spread of fire at oil-filled transformer substations. The list of parameters influencing the decrease in the temperature of transformer oil during its passage through the fire barrier was established. The list of parameters to be taken into account when studying dependency of the transformer oil temperature decrease upon geometric parameters of gravel backfill was determined, namely: height of the gravel backfill, width of the gravel backfill, and slope of oil receiver towards the oil collector. The criterion for evaluating the effectiveness of the measures to stop and limit the spread of fire in case of accidents at oil-filled transformer substations was the condition of achieving a value of burning oil temperature less than its flash point by 150 °C.

To describe theoretically the process of heat and mass transfer between oil and gravel backfill in order to justify its width and height as a mathematical model equation of motion and the equation of flow continuity, described by the system of Navier-Stokes differential equations was used. The basic equations are supplemented by mathematical models that take into account aggregate phenomena; during the approximation of differential equations, the method of finite differences was used with their solution according to the explicit “predictor-corrector” scheme by integration by temperature.

The theoretical determination of the effective slope of the oil receiver in the direction of the oil collector was carried out according to the adaptive formula for rectangular channels.



Substantiation of the indicator of the accepted criterion for evaluating the effectiveness of the fire control system (transformer oil flash point) was carried out according to one of the standardized methods established by DSTU 8829:2019 *Fire and explosion hazard of substances and materials – Nomenclature of indicators and methods of their definition – Classification*.

In the **third section** presents the results of mathematical modelling of the process of heat and mass transfer between transformer oil and gravel backfill of the oil receiver as well as reducing its temperature depending on the geometric parameters of the gravel backfill of the oil receiver.

During mathematical modelling, the calculation of the process of passing transformer oil through the fire barrier was performed in 2 stages. At I stage the geometric shape of the oil flow through the gravel backfill was determined. At II stage, the calculation of the temperature distribution in the oil flow through the crushed stone was performed. It was assumed that the crushed stone had the same size in width  $\approx 35$  mm and a variable longitudinal size in the range of 35 to 70 mm. According to the results of the mathematical modelling it was found that transformer oil at a temperature of  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  at the entrance to the gravel layer of the oil receiver when passing through a fire barrier with geometric dimensions of  $1,500\text{ mm} \times 250\text{ mm}$  has been getting cooled to  $148\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Taking into account the geometric parameters of the oil receiver the minimum required slope was determined, which varied from  $0,045\text{ m/m}$  to  $0,05\text{ m/m}$ . This slope ensured efficient drainage of oil into the emergency tank within the specified time and also reduced the area of possible fire by 2,5 times under these simulation conditions. The results of the calculations confirmed that the effective slope of the oil pan in the direction of the oil pan had to be  $0,05\text{ m/m}$ .

Using the proposed mathematical models, a complete factor computational experiment was performed for predetermined parameters resulting in the derivation of the dependency of the decrease in the temperature of transformer oil in the oil receiver upon its slope, width and height of gravel backfill.

In the **fourth section** presents the results of experimental studies to substantiate the minimum geometric parameters of the gravel backfill of the transformer substation oil receiver conducted according to the previously developed methodology, the essence of which was to identify patterns of decreasing the burning transformer oil temperature to that being lower than its flash point depending on the parameters of the gravel backfill of the oil receiver during draining of oil into the emergency tank.

Experimental studies were conducted on a specially designed research bench. The experiment simulated an emergency situation in a transformer with an increase in oil temperature to the emergency value ( $T_{self-ignition} \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), and its depressurization with subsequent oil spill into the oil receiver with subsequent oil ignition. During the experiment, Nytro 11GX transformer oil manufactured by the Swedish Company of Nynas AB was used, and determination of its fire hazard performance by method established by DSTU 8829:2019 allowed establishing the range of decreasing its temperature from the emergency value to another one below the  $T_{flash}$  of  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , and this became criterion for the assessment of efficiency of the fire prevention system at oil filled transformer substations under fire conditions. The following ones were assumed principles of the experimental research: there shall be no flame burning oil vapour above the gravel backfill; the temperature of the oil at the place of the opening of its drain into the emergency tank (oil receiver) should not exceed  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

The experiment was repeated six times. Flame burning of oil vapour over the gravel backfill was observed at its width less than 1,200 mm. At a gravel backfill width of 1,500 mm, the combustion of oil vapour above its surface stopped.

According to the results of experimental research, the dependence of the temperature reduction of transformer oil on the distance of its passage through the gravel backfill of the oil receiver has been established.

In the **fifth section** some proposals are developed to improve the existing design solutions to limit the spread of fire in the event of accidents at oil-filled transformer substations. Based on the obtained research results, a methodological basis has been developed which is the basis for creating regulations to determine the minimum

parameters of gravel backfill oil receiver, in particular, formulated proposals for amendments to the *Rules of Arrangement of Electrical Installations*.

Economic effect of the proposed technical solutions compared to existing approaches based on feasibility study of gravel backfill parameters in oil receivers of oil-filled transformer substations on the example of long-term operation, for the city of Kyiv, taking into account reduction of the gravel amount and operational costs up to 72 %.

Thus, based on the identified patterns of cooling and cessation of burning of the transformer oil, the parameters of gravel backfill of the fire prevention system of the transformer substation were substantiated at which the temperature of transformer oil reduced to a safe value (from 250 °C to 150 °C), namely: minimum gravel backfill as follows: 1,500 mm wide, 250 mm high, effective slope of the oil receiver in the direction of the oil collector is 0,05 m/m.

In the **appendices** present supporting material necessary for a full understanding of the subject of research, as well as acts of implementing of the results of dissertation research into practical activities and the educational process.

**Keywords:** gravel backfill, oil-filled transformers, oil receiver, oil cooling, fire, cessation of combustion, transformer equipment, transformer oil.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті, що індексуються в міжнародних наукометричних базах (МНБ):*

1. **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. **Видання включено до МНБ – Index Copernicus, Google Scholar, Scientific Indexing Service.**

### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

2. **Климась Р.В.**, Михайлова А.В., Матвійчук Д.Я. Результати розрахунків імовірності виникнення пожеж у будівлях і спорудах різного призначення. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 2 (22), 2010. С. 173-176.

3. Антонов А.В., Якименко О.П., **Климась Р.В.** Аналізування ефективності виконання функцій системами протипожежного захисту на основі даних досліджень особливо великих пожеж. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 1 (29), 2014. С. 4-10.

4. **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.

5. **Климась Р.В.**, Ніжник В.В., Балло Я.В., Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б., Ільченко Н.М. Методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. *Науково-технічний збірник: Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура*. Харків: т. 4, вип. 164, 2021. С. 158-165.

6. **Климась Р.В.**, Ніжник В.В., Нікулін О.Ф., Крикун О.М., Серета Д.В., Цимбалістий С.З. Експериментальні дослідження встановлення закономірності зниження температури і припинення горіння трансформаторного масла залежно

від параметрів гравійної засипки маслоприймача. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (12), 2021. С. 101-110.

***Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

7. **Климась Р.В.**, Балло Я.В. До питань підвищення ефективності запобігання поширення пожежі під час пошкодження маслonaповнених трансформаторів. International scientific and practical conference «*Technical sciences: the analysis of trends and development prospects*»: conference proceedings. Prague: «Baltija Publishing», 2021. Pp. 47-50.

8. **Климась Р.В.**, Ніжник В.В. Дослідження існуючих підходів до обмеження поширення пожеж на трансформаторних підстанціях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 31-33.

9. **Климась Р.В.**, Ніжник В.В., Балло Я.В. Методика та обладнання експериментальних досліджень щодо обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*: Тези доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 123-124.

10. **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.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 16 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРИПИНЕННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ.....               | 24 |
| 1.1. Статистичні дані про пожежі на трансформаторних підстанціях.....  | 24 |
| 1.2. Аналіз літературних джерел щодо припинення та обмеження поширення пожеж під час аварій на трансформаторних підстанціях.....             | 33 |
| 1.3. Аналіз нормативних документів щодо припинення та обмеження поширення пожеж під час аварій на трансформаторних підстанціях.....          | 41 |
| 1.4. Висновки за першим розділом.....  | 46 |
| РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ПРИПИНЕННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ.....          | 48 |
| 2.1. Теоретичні підходи до дослідження умов припинення та обмеження поширення пожежі вогнезагороджувачем.....                                | 48 |
| 2.2. Обґрунтування критеріїв по дослідженню залежності температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик маслоприймача..... | 53 |
| 2.3. Теоретичне описання процесу тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою маслоприймача.....   | 55 |
| 2.4. Теоретичне визначення ефективного ухилу маслоприймача.....  | 59 |
| 2.5. Теоретичне визначення безпечної величини температури трансформаторного масла.....   | 63 |
| 2.6. Висновки за другим розділом.....  | 69 |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ВІД ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛОПРИЙМАЧА.....                            | 70 |
| 3.1. Розроблення комп'ютерної моделі гравійної засипки маслоприймача   | 70 |
| 3.2. Результати розрахунків щодо зміни температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик маслоприймача.....                 | 75 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.3. Визначення залежності зниження температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки.....   | 78  |
| 3.4. Визначення ефективного ухилу маслоприймача.....   | 82  |
| 3.5. Висновки за третім розділом.....  | 87  |
| РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МІНІМАЛЬНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРАВІЙНОЇ ЗАСИПКИ МАСЛОПРИЙМАЧА.....                                      | 88  |
| 4.1. Розроблення методики експериментальних досліджень.....  | 88  |
| 4.2. Результати експериментального визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла.....   | 99  |
| 4.3. Результати експериментальних досліджень параметрів гравійної засипки.....   | 105 |
| 4.4. Оцінювання результатів експериментальних досліджень.....  | 111 |
| 4.5. Висновки за четвертим розділом.....   | 121 |
| РОЗДІЛ 5. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ НАЯВНИХ РІШЕНЬ ПО ОБМЕЖЕННЮ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ..... | 123 |
| 5.1. Економічна ефективність зміни параметрів гравійної засипки маслоприймачів на прикладі трансформаторних підстанцій міста Києва..                               | 123 |
| 5.2. Встановлення мінімально-необхідних параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій.....                   | 126 |
| 5.3. Висновки за п'ятим розділом.....  | 131 |
| ВИСНОВКИ.....  | 132 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....  | 135 |
| ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації.....   | 152 |
| ДОДАТОК Б Відомості про апробацію результатів дисертації.....  | 154 |
| ДОДАТОК В Акти впровадження результатів дисертації.....  | 155 |
| ДОДАТОК Г Протокол випробувань трансформаторного масла.....  | 159 |
| ДОДАТОК Д Пропозиції до Правил улаштування електроустановок.....   | 167 |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Аналіз інформаційно-аналітичних матеріалів Міністерства енергетики України за останні п'ять років вказує, що кожного року близько 47 % пожеж виникає на підприємствах електричних мереж. Статистичні дані про пожежі свідчать, що 50 % пожеж в енергетичній галузі припадає на трансформаторне обладнання (загалом виникло 963 пожежі, прямі збитки від яких склали більше 32 млн гривень). Як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його загорянням.

Трансформатори, як один із найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на будь-якій електропідстанції, можуть містити від 200 л до 60 000 л мінерального масла, що є горючою речовиною із густиною в діапазоні  $(0,80-0,89) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . 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  $250^\circ\text{C}$ , 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 територією підприємства та на суміжні об'єкти.

Припинення й обмеження поширення горіння трансформаторного масла досягається застосуванням системи вогнеперешкоджання, що складається з маслоприймача, масловідводів і вогнезагороджувача, в якості якого використовується маслосбірник із металевою решіткою, поверх якої улаштовано гравійну засипку.

Найбільш поширеним і застосовуваним на практиці унормованим заходом щодо попередження розвитку таких пожеж є встановлення маслосбірників у маслоприймачі. Дно маслоприймача повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приймка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм; товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м; верхній



рівень гравію повинен бути не менше ніж на 7,5 см нижче від верхнього краю борта або рівня навколишнього планування. Дозволено не засипати дно маслоприймачів по всій площі гравієм, що на сьогоднішній день немає відповідного наукового обґрунтування. Це встановлює необхідність наукового обґрунтування оптимальних параметрів гравійної засипки маслоприймачів, як підґрунтя для припинення горіння трансформаторного масла та його охолодження нижче температури спалаху.

Питаннями запобігання виникненню пожеж та їх гасіння в електроустановках, зокрема на маслonaповнених трансформаторах, займалися такі вітчизняні та зарубіжні вчені як: Булгаков А.Б., Варнакова Д.А., Душкін А.Л., Зозуля Д.В., Кашолкін Б.І., Мешалкін Є.О., Лінчевський Є.А., Marc Foata. Питанням обмеження поширення пожеж на суміжні споруди, оцінювання ризиків виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях присвячені роботи Антонова А.В., Ніжника В.В., Соколова В.В., Поздєєва С.В., Філяновича Л.П., Хісматулліна А.С., Черкасова В.М., Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze та інших. Однак, у цих працях недостатньо досліджені процеси тепломасообміну для забезпечення ефективного відведення тепла трансформаторного масла, що проходить через вогнезагороджувач під час аварії на трансформаторних підстанціях, і не виявлені закономірності зниження температури масла до нижчої за його температуру спалаху в залежності від геометричних параметрів гравійної засипки.

З урахуванням викладеного, проведення досліджень, спрямованих на розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача, стане підґрунтям для підвищення ефективності системи вогнеперешкоджання маслonaповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі, що є **актуальним науковим завданням**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано відповідно до основних напрямів наукової діяльності ІДУ НД ЦЗ в рамках Плану розвитку розподільних електричних мереж на 2016-2025 роки, розробленого у контексті заходів щодо реалізації положень

Закону України від 24.10.2013 № 663-VII «Про засади функціонування ринку електричної енергії України» на підставі «Порядку підготовки Системним оператором плану розвитку Об'єднаної енергетичної системи України на наступні десять років», затвердженого наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 29.09.2014 № 680; Нової енергетичної стратегії України до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», спрямованої на реформування енергетичного комплексу України на період до 2020 року та формування стратегічних орієнтирів розвитку на довгострокову перспективу – до 2035 року; та науково-дослідної роботи: «Обґрунтувати мінімальні геометричні параметри (висота та периметр) засипки гравію у маслоприймачі над маслоприймальним каналом, яка повинна виконувати функцію вогнезагороджувача та охолодження мастила до температури спалаху 150 градусів Цельсія в рамках розробки робочої документації по об'єкту «Реконструкція ПС 330 кВ Броварська з установкою АТ-3» (державний реєстраційний № 0113U004330) за договором від 24.12.2020 № 205/69-2, укладеним з ТОВ «Проенерджі», в якій здобувач провів дослідження з визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла, що підтверджується відповідним протоколом випробувань.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає у виявленні закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення наявних конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають виконувати функцію припинення горіння та забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) проаналізувати сучасний стан заходів щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслonaповнених трансформаторних підстанціях;
- 2) обґрунтувати найбільш значущі параметри системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції та визначити критерій, що встановлює ефективність

охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції;

3) побудувати математичну модель процесу тепломасообміну у потоках трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції під час пожежі;

4) на основі створеної математичної моделі розробити методику та провести чисельний експеримент щодо виявлення залежності температури охолодження трансформаторного масла від параметрів маслоприймача;

5) розробити методику експериментальних досліджень та провести експеримент щодо охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції під час його аварійного зливання; встановити на основі порівняльного аналізу експериментальних і розрахункових даних адекватність запропонованих моделей; експериментально визначити показники небезпеки трансформаторного масла;

б) розробити методичні підходи до прогнозування ефективності системи перешкодження пожежі трансформаторних підстанцій.

**Об'єкт дослідження** – процеси тепломасообміну у потоках трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції під час його аварійного зливання.

**Предмет дослідження** – умови охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції під час пожежі.

**Методи дослідження.** В роботі використано комплексний метод досліджень, який включав: аналізування довідкових даних і нормативних документів, якими регламентовано методи тепломасообміну між речовинами та матеріалами; експериментальні дослідження з визначення зниження температури масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача; стандартизовані методи експериментального визначення температури спалаху у закритому та відкритому тиглях, температури займання, температури самозаймання рідин; математичне моделювання процесів тепломасообміну між маслом та гравійною

засипкою маслоприймача; метод дихотомії; метод аналізування на наявність викидів та квазівикидів у результатах досліджень (Граббса); метод виявлення розбіжностей між дисперсіями результатів досліджень (Фішера); метод планування експерименту (повний факторний експеримент); методи математичної статистики для оброблення результатів експериментальних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у розкритті закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, що є обґрунтованою теоретичною базою для створення передумов удосконалення методу прогнозування ефективності таких систем на маслонаповнених трансформаторних підстанціях.

При цьому *уперше*:

- встановлено, що залежність температури охолодження трансформаторного масла, що горить, у маслоприймачі від ширини ( $d$ ), висоти ( $h$ ) гравійної засипки та ухилу ( $i$ ) має вигляд:

$$\theta = 333,8 - 0,16d - 0,21h - 847,8i + 0,00039dh + 2,52di - 0,1hi - 0,0084dhi$$

- встановлено, що зниження температури трансформаторного масла, що горить, залежно від відстані (ширини  $d$ ), яку воно проходить від входу у гравійну засипку маслоприймача до маслозбірника, описується поліноміальною залежністю 3-го порядку, що має вигляд:

$$\Delta\theta = 263,16 - 39,1d + 2,7d^2 - 0,005d^3$$

- обґрунтовано геометричні параметри гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції, за яких температура трансформаторного масла знижується до безпечної величини (від 250 °С до 150 °С), а саме: мінімальні розміри гравійної засипки: ширина 1500 мм, висота 250 мм, ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника 0,05 м/м.

*Удосконалено*:

- теоретичні підходи оцінювання умов охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій.

*Дістали подальшого розвитку:*

- параметричні методи нормування у будівництві в частині зниження температури трансформаторного масла від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій для підвищення її ефективності в умовах пожежі.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практична цінність досліджень полягає у розробленні методичної й експериментальної бази методів прогнозування ефективності системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі, як наукового підґрунтя їх проектування. Частина розроблених методик може бути урахована при внесенні змін до *Правил улаштування електроустановок (ПУЕ)*.

Результати проведених досліджень впроваджені (додаток В) у практичну діяльність компанії ТОВ «Проенерджі», головним напрямом якої є проектування повітряних ліній електропередачі, підстанцій та інших об'єктів електромереж напругою 35-750 кВ (акт від 01.09.2021), а також науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ у сфері проведення випробувань на пожежну небезпеку (акт від 20.09.2021). Результати проведених досліджень також впроваджені у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям ДСНС (акт від 30.12.2021), та в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України за освітньо-науковою програмою «Пожежна безпека» підготовки здобувачів третього рівня вищої освіти (доктор філософії) під час вивчення дисциплін «Моделювання процесів горіння» (акт від 15.06.2022).

Під час виконання роботи створено експериментальний стенд для дослідження процесу тепломасообміну трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкоджання маслонаповненої трансформаторної підстанції.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих висновків** підтверджується результатами аналізу літературних джерел; відповідністю методів дослідження поставленим в роботі меті та завданням; застосуванням аналітичних методів досліджень; необхідним об'ємом

експериментального матеріалу, отриманого з використанням верифікованого обладнання та каліброваних засобів вимірювальної техніки; задовільною збіжністю результатів теоретичних та експериментальних досліджень, а також апробацією з практичним впровадженням результатів роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, теоретичні та практичні результати, що винесені на захист і наведені в дисертації, одержано здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем особисто: в [10] на основі статистичної інформації та проведених розрахунків отримано значення ймовірності виникнення пожеж на об'єктах суб'єктів господарської діяльності за різними галузями економіки, у т. ч. на спорудах виробничого призначення; в [116] за результатами вивчення процесів виникнення, перебігу та гасіння пожежі, що сталася 29.03.2013 у м. Світлодарськ Донецької області на Вуглегірській тепловій електростанції ПАТ «Центрэнерго», визначено причини неспрацювання системи пінного пожежогасіння, що захищала маслобаки та кабельні канали машинного залу КТЦ № 1; у [67] проведено аналіз статистичних даних про пожежі на трансформаторному обладнанні, а також причин і передумов їх виникнення; в [143] розроблено методику експериментальних досліджень з обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції; в [85] встановлено залежності температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції; в [146] проведено оцінювання результатів експериментальних досліджень, що дозволили обґрунтувати мінімальні геометричні параметри гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції; в [63] проаналізовано конструктивні параметри маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що негативно впливають на ефективність обмеження поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених трансформаторів; у [66] досліджено існуючі підходи до обмеження поширення пожежі під час аварій на трансформаторних підстанціях; визначено шляхи щодо підвищення ефективності системи обмеження поширення пожежі на таких об'єктах; у [139] розроблено

методику з обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції, що дає змогу визначати зміну температури трансформаторного масла та параметри гравійної засипки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідалися, обговорювалися й отримали позитивне схвалення на 4 міжнародних і національних наукових конференціях (додаток Б), а саме:

- Міжнародній науково-практичній конференції «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects» (Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 02-03 липня 2021 р.);

- XI Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 28-29 жовтня 2021 р.);

- IX Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (м. Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 17-19 листопада 2021 р.);

- V Міжнародній науково-практичній конференції «Science, education, innovation: topical issues and modern aspects» (Tallin, Estonia: Ühingu Teadus Juhatus, 25-26 грудня 2021 р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи знайшли відображення у 10 наукових працях, із них: статей, що індексуються в міжнародних наукометричних базах (МНБ) Index Copernicus, Google Scholar, Scientific Indexing Service – 1, статей у спеціалізованих наукових фахових виданнях України – 5, публікацій за матеріалами конференцій – 4 (додаток А).

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел (157 найменувань) і 5 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 169 сторінок, із них 119 сторінок основного тексту, 43 рисунки та 17 таблиць.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРИПИНЕННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

### 1.1. Статистичні дані про пожежі на трансформаторних підстанціях

У 2017 році в Україні ухвалили закон «Про ринок електричної енергії» [1], прийняття якого означає масштабну трансформацію енергетичного сектору; його реалізація дає змогу реформувати галузь і створити ринок за європейською моделлю. Прийняттю закону передував План розвитку розподільних електричних мереж на 2016-2025 роки, розроблений у контексті заходів щодо реалізації положень Закону України «Про засади функціонування ринку електричної енергії України» [2] на підставі «Порядку підготовки Системним оператором плану розвитку Об'єднаної енергетичної системи України на наступні десять років» [3].

Розроблений Національною енергетичною компанією «Укренерго» у кінцевому вигляді «План розвитку Об'єднаної енергетичної системи України на 2016-2025 роки» [4] визначав, що основні генеруючі потужності Об'єднаної енергетичної системи України зосереджені в:

- п'яти енергогенеруючих компаніях: ПАТ «ДТЕК Дніпроенерго», ПАТ «Донбасенерго», ПАТ «Центренерго», ПАТ «ДТЕК Західенерго», ПАТ «ДТЕК Східенерго», що загалом експлуатують 14 ТЕС із блоками одиничною потужністю 150, 200, 300 і 800 МВт, та на 3 потужних ТЕЦ (Харківська ТЕЦ-5, Київські ТЕЦ-5 і ТЕЦ-6) з енергоблоками 100 (120) МВт і 250 (300) МВт інших компаній (загальне число енергоблоків на ТЕС і ТЕЦ становить 106 одиниць, у т. ч. потужністю: 100 (120) МВт – 4, 150 МВт – 6, 200 МВт – 42, 250 МВт – 5, 300 МВт – 42, 800 МВт – 7 одиниць;

- ДП «НАЕК «Енергоатом», на 4 АЕС якого перебуває в експлуатації 15 енергоблоків, з яких 13 – з реакторами ВВЕР-1000 потужністю по 1000 МВт і 2 – з реакторами ВВЕР-440 потужністю 415 та 420 МВт; крім того, на балансі компанії знаходиться Ташлицька ГАЕС, що наразі експлуатує 2 гідроагрегати, й Олександрівська ГЕС (2 гідроагрегати);



- ПАТ «Укргідроенерго», що має у своєму складі каскади гідроелектростанцій на річках Дніпро та Дністер із загальним числом гідроагрегатів – 103 одиниці.

Магістральні та міждержавні електричні мережі Об'єднаної енергетичної системи України нараховують 23,0 тис. км, із них 4,9 тис. км припадає на мережі з напругою 400-800 кВ, 13,4 тис. км – напругою 330 кВ, 4,0 тис. км – напругою 220 кВ і 0,7 тис. км – напругою 35-110 кВ, а також 137 підстанцій загальною трансформаторною потужністю 78,6 тис. МВА.

Розподільчі електричні мережі нараховують близько 1 млн км повітряних і кабельних ліній електропередачі напругою 0,4-150 кВ і близько 200 тис. трансформаторних підстанцій напругою 6-150 кВ.

Наразі, метою нової Енергетичної стратегії України «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [5], спрямованої на формування стратегічних орієнтирів розвитку на довгострокову перспективу – до 2035 року, є забезпечення потреб суспільства та економіки в паливно-енергетичних ресурсах у технічно надійний, безпечний, економічно ефективний та екологічно прийнятний спосіб для гарантування поліпшення умов життєдіяльності суспільства. Одним із головних напрямів підвищення енергетичної ефективності економіки України є її покращення в секторі виробництва і трансформації енергії шляхом технічної та технологічної модернізації. Водночас, реалізація цього напрямку пов'язана з надійною й якісною експлуатацією високовольтних трансформаторів струму.

До прикладу, групою ДТЕК, що є лідером енергетичної галузі України, останніми роками на плановій основі проводиться заміна маслонаповненого обладнання на вакуумне, елегазове, із сухим діелектриком, а також на герметичні масляні трансформатори, що не потребують обслуговування; це дає змогу підвищити екологічну безпеку обладнання та виключити можливі розливи нафтопродуктів [6]. Зокрема, у 2020 році на підприємствах з розподілу електроенергії «ДТЕК Мережі» проведена заміна 682 одиниць маслонаповненого обладнання на герметичні масляні трансформатори, що не потребують обслуговування, або на вакуумне обладнання із сухим діелектриком [7].

Загально відомо, що трансформатори являють собою критично важливу ланку між потужностями, що забезпечують генерування електроенергії, а також розподільчими мережами та лініями електропередачі. Суттєва несправність у роботі трансформатору може призвести до припинення подавання електроенергії з відключенням численних будинків, промислових підприємств, об'єктів критичної інфраструктури, можливі наслідки якої дуже складно передбачити. Вихід трансформатора з ладу може статися з різних причин, масштаби інциденту також можуть бути різними.

Трансформатори є одними із найбільш пожежонебезпечних видів обладнання на маслonaповнених трансформаторних підстанціях. Трансформатори, що використовуються на електропідстанціях, можуть містити від 200 л до 60 000 л мінерального масла, що служить для ізоляції й охолодження, запобігання іскріння та інших небажаних явищ. Оскільки трансформаторне масло є горючою рідиною [8], то у разі виникнення несправностей на трансформаторних підстанціях воно, як пожежна навантага, може обумовити пожежу, а також сприяти її розвитку та поширенню на суміжні об'єкти та територією станції.

Статистичні дані про пожежі свідчать, що 50 % від пожеж в енергетичній галузі припадають на трансформаторне обладнання [9]. Основною причиною пожеж на трансформаторних підстанціях є коротке замикання або розгерметизація корпусу обладнання внаслідок корозії. Зокрема, виникнення електричної дуги під час короткого замикання призводить до неприпустимого збільшення тиску в масляному баку. В результаті цього відбувається закипання трансформаторного масла, підвищення тиску та температури, руйнування корпусу трансформатору, розлив горючого масла та його займання.

Результати розрахунків [10], проведених на основі узагальнення статистичної інформації про пожежі за довгостроковий період за різними галузями економіки, вказують, що значення ймовірності виникнення пожеж на спорудах виробничого призначення:  $7,94 \cdot 10^{-3}$  (з урахуванням об'єктів енергетики) порівняно з базовими величинами, рекомендованими Всесвітньою організацією охорони здоров'я [11], знаходяться в межах неприйнятної ризику ( $\geq 5 \cdot 10^{-4}$ ).

Нижче, за матеріалами офіційного сайту [12] Державної служби України з надзвичайних ситуацій (далі – ДСНС), наведемо декілька прикладів таких пожеж.

Так, 15 січня 2015 року о 22 год 04 хв від чергового персоналу ВП «Южно-Українська АЕС» надійшло повідомлення про спрацювання пожежної сигналізації на автотрансформаторі зв'язку 1АТ-330/150 кВ. По прибуттю чергового караулу ДСНС стало відомо, що виникла пожежа охолоджувача всередині трансформатора. Черговим персоналом станції було від'єднано трансформатор від електроживлення. Гасіння пожежі проводилося пінними, порошковими та водяними стволами (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Приклад пожежі на перепускнуому трансформаторі ВП «Южно-Українська АЕС»

О 23 год 40 хв пожежу було ліквідовано на площі 100 м<sup>2</sup>; участь у її гасінні брали 125 чоловік особового складу та 16 одиниць спеціальної техніки. За результатами радіаційної розвідки на промисловому майданчику АЕС та за її межами фон не перевищував норми. Причиною пожежі стало коротке замикання в електромережі системи охолодження перепускнуого трансформатору.

15 квітня 2019 року близько 13 год виникла масштабна пожежа на підстанції ПАТ «Запоріжобленерго», що розташована по вул. Діагональній Заводського району міста Запоріжжя. Прибувши на місце події, рятувальники встановили, що сталося коротке замикання трансформатора з послідуєчим горіння масла без виходу за межі маслоприймача (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Приклад пожежі на підстанції ПАТ «Запоріжобленерго»

Пожежні ліквідували горіння за допомогою генераторів піни середньої кратності та повітряно-пінними стволами. До гасіння залучалися 32 чоловіки особового складу та 7 одиниць техніки.

29 квітня 2019 року о 21 год 07 хв на відкритій території розподільчого пристрою 330/110 кВ на території ВП «Рівненська АЕС» сталося загорання трансформатора 7АТ, що передає електроенергію станції на зовнішні мережі. Під час пожежі відключилася перша система шин 330 кВ та енергоблок № 3 (ВВЕР-1000) (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Приклад пожежі на території ВП «Рівненська АЕС»

О 22 год 05 хв силами ДСНС пожежу було ліквідовано. Радіаційний фон знаходився у межах норми, жертв і постраждалих не було. До гасіння пожежі залучалось 36 чоловік особового складу та 10 одиниць техніки.

17 квітня 2017 року на одній із трансформаторних підстанцій по вул. Промисловій у м. Северодонецьку Луганської області виникло загоряння трансформатора, з якого стався розлив масла на площу 20 м<sup>2</sup> (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Приклад пожежі на трансформаторній підстанції у м. Северодонецьк Луганської області

Причиною пожежі стало коротке замикання, а її ліквідація потребувала залучення додаткових сил і засобів (загалом було залучено 28 вогнеборців і 8 одиниць техніки).

06 січня 2021 року в одній із трансформаторних підстанцій у смт Стара Ушиця Кам'янець-Подільського району Хмельницької області коротке замикання спричинило потужну (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Приклад пожежі на трансформаторній підстанції у смт Стара Ушиця Кам'янець-Подільського району Хмельницької області

Прибувши до місця виклику рятувальники відімкнули підстанцію від живлення, а в приміщенні знайшли обгорілі тіла двох чоловіків 1997 та 2001 р.н.

10 січня 2021 року виникла масштабна пожежа, що паралізувала роботу мексиканської підземки. Відомо про 1 жертву; щонайменше 30 людей отруїлися димом. Пожежа виникла вранці на електричній підстанції через технічну несправність у трансформаторах. Дим та полум'я від пожежі виднілися на кілька кілометрів довкола місця події [13].

Аналіз інформаційно-аналітичних матеріалів Міністерства енергетики України за останні п'ять років щодо стану пожежної та техногенної безпеки в паливно-енергетичному комплексі [14] вказує, що в середньому щороку близько 47 % пожеж виникає на підприємствах електричних мереж. Узагальнений розподіл кількості пожеж, що виникали на об'єктах паливно-енергетичного комплексу України за останні п'ять років, наведено на рисунку 1.6.

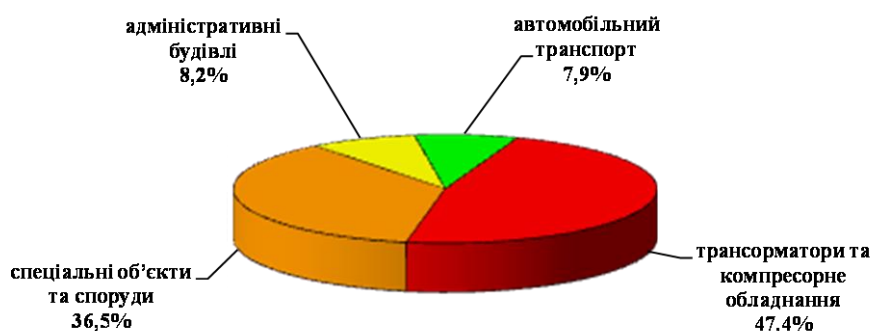


Рисунок 1.6 – Розподіл кількості пожеж у паливно-енергетичному комплексі України за видами об'єктів

Зокрема, аналіз матеріалів розслідування таких пожеж 2017 року свідчить, що 47,0 % пожеж виникло на трансформаторному та компресорному обладнанні, 35,3 % – на спеціальних об'єктах і спорудах, 11,8 % – в адміністративних будівлях, 5,9 % – на автомобільному транспорті.

Узагальнені дані за аналізуємий період свідчать, що об'єктами у понад 47 % випадках пожеж безпосередньо були трансформатори та компресорне обладнання.

Порівняльний аналіз кількості пожеж у паливно-енергетичному комплексі України останніх п'яти років, що реєструвалися в осінньо-зимові та весняно-літні періоди, наведено на рисунку 1.7.

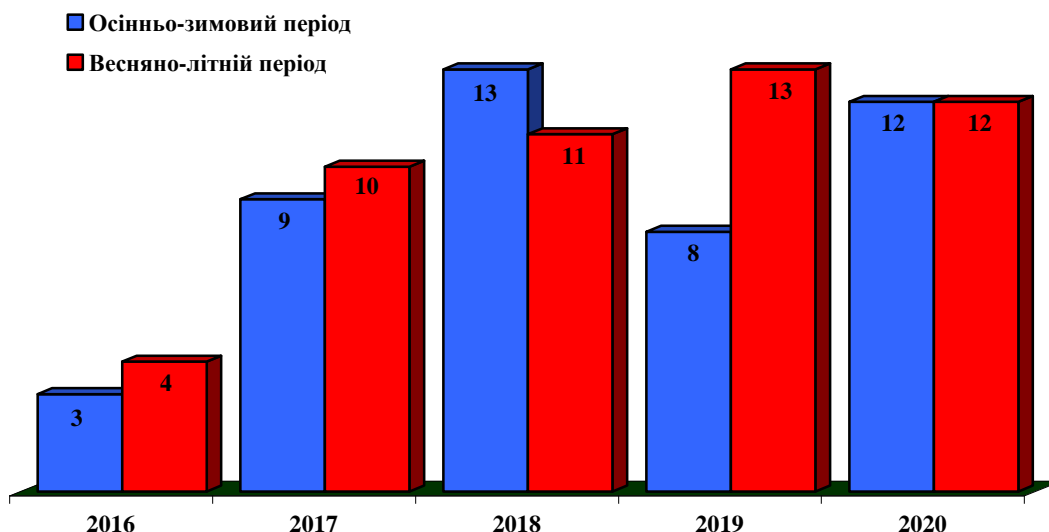


Рисунок 1.7 – Розподіл кількості пожеж у паливно-енергетичному комплексі України в осінньо-зимові та весняно-літні періоди

Проведений аналіз не виявив характерних тенденцій і залежностей щодо виникнення пожеж в осінньо-зимові та весняно-літні періоди, та вказує на відсутність впливу пори року на суттєву зміну кількості пожеж, що притаманне, наприклад, для лісових пожеж, пожеж в екосистемах та у побуті.

Так, 14 лютого 2017 року о 21 год 20 хв у м. Києві по вул. Колекторній, 1а, сталося загоряння на території трансформаторної підстанції «Бортничі», де розташовані 4 трансформатори. Під час пожежі стався викид масла з одного з трансформаторів потужністю 110 кВ із подальшим його займанням (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Приклад пожежі на трансформаторній підстанції «Бортничі» у м. Києві

Оскільки підстанція знаходилася під високою напругою, вогнеборцям довелося зачекати знеструмлення. Лише о 23 год 05 хв був отриманий допуск до гасіння від бригади ПАТ «Київенерго»; о 23 год 45 хв пожежу було ліквідовано. Жертв унаслідок пожежі не було. До гасіння пожежі залучалось 15 чоловік особового складу та 5 одиниць основної та спеціальної пожежної техніки.

Окрім цього, проведено аналіз статистичних даних за довгостроковий період [9, 15] та встановлено загальний розподіл кількості пожеж в Україні за електричними машинами та перетворювачами (таблиця 1.1), на яких (або від яких) вони виникали.

Таблиця 1.1 – Розподіл кількості пожеж в Україні за електричними машинами та перетворювачами, на яких (або від яких) вони виникли

| Електричні машини та перетворювачі      | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Трансформатор                           | 42   | 30   | 42   | 47   | 58   | 43   | 37   | 49   |
| Стабілізатор                            | 12   | 11   | 6    | 9    | 10   | 12   | 12   | 10   |
| Електродвигун                           | 4    | 6    | 6    | 18   | 21   | 29   | 18   | 14   |
| Генератор                               | 9    | 11   | 11   | 12   | 16   | 23   | 16   | 43   |
| Інші електричні машини та перетворювачі | 25   | 13   | 15   | 13   | 13   | 24   | 12   | 22   |

З таблиці 1.1 видно, що в середньому щороку реєструється 44 випадки пожеж трансформаторів. Загалом із 824 пожеж, що виникали або були спричинені електричними машинами чи перетворювачами, 348 або 42,2 % припадає саме на трансформатори.

Проаналізувавши статистичні дані за довгостроковий період [9, 15] за об'єктами виникнення пожеж на спорудах і зовнішніх установках (таблиця 1.2) по основним показникам, отримаємо, що середньорічна кількість таких пожеж складає 120. Загалом за аналізуємий період на трансформаторних підстанціях і трансформаторах виникло 963 пожежі, прями збитки від яких склали 32 млн 472 тис. грн, на пожежах загинуло 3 людини та 3 травмовано.



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

| Об'єкт пожежі                                | Кількість пожеж, од.<br>Прямий збиток, тис. грн<br>Загинуло внаслідок пожеж, люд.<br>Травмовано на пожежах, люд. |         |        |        |        |        |        |        |
|--|--|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | 2013   | 2014    | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   |
| Трансформаторна підстанція,<br>трансформатор | 120  | 113     | 113    | 98     | 95     | 112    | 149    | 163    |
|  | 321,6  | 13086,1 | 6692,4 | 1029,2 | 1662,8 | 1775,2 | 5492,5 | 2412,1 |
|  | 1  | 0       | 1      | 0      | 1      | 0      | 0      | 0      |
|  | 0  | 0       | 1      | 0      | 1      | 0      | 0      | 1      |

На основі аналізу статистичних даних про пожежі в Україні встановлено, що щороку в середньому близько 50 % від пожеж в енергетичній галузі виникає на силових трансформаторах, зокрема на маслонаповнених трансформаторах; як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним виливанням масла із трансформатора та його загорянням, що спричиняє значні матеріальні збитки, а у деяких випадках і загибель людей.

## 1.2. Аналіз літературних джерел щодо припинення та обмеження поширення пожеж під час аварій на трансформаторних підстанціях

Аналіз літературних джерел з досліджуваного питання показав наступне.

У 1831 році англійським фізиком Майклом Фарадеєм при проведенні ним основоположних досліджень було відкрите явище електромагнітної індукції, що лежить в основі принципу роботи електричного трансформатора. За загальним визначенням трансформатор (від лат. *transformo* – перетворювати) це пристрій для перетворення параметрів (амплітуд і фаз) напруг і струмів [16].

Трансформатор – статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше індуктивно зв'язані обмотки та призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або кількох систем (напруг) змінного струму в одну або декілька інших систем (напруг) змінного струму без зміни частоти системи (напруги) змінного струму. Трансформатори широко застосовуються в лініях електропередач, в розподільних і побутових пристроях.

При високій напрузі й малій силі струму передача електроенергії відбувається з меншими втратами. Тому, зазвичай лінії електропередач є високовольтними. Водночас побутові й промислові машини вимагають великої сили струму й малої напруги, тому перед споживанням електроенергії перетворюється в низьковольтну. Трансформатори знайшли застосування також у різних випрямних, підсилювальних, сигналізаційних та інших пристроях.

Коефіцієнт корисної дії сучасних трансформаторів, особливо підвищеної потужності, вельми високий і досягає значень 0,950...0,996 [17].

Силовий трансформатор це стаціонарний прилад з двома або більше обмотками, який за допомогою електромагнітної індукції перетворює систему змінної напруги та струму в іншу систему змінної напруги та струму, як правило, різних значень при тій же частоті з метою передачі електроенергії без зміни її потужності при передаванні [18].

Силовий трансформатор використовується для перетворення параметрів електричної енергії в електричних мережах і устаткуванні, що застосовуються для приймання та споживання електричної енергії. Силовий трансформатор застосовується у складі комплексних трансформаторних підстанцій для пониження напруги при подачі електроенергії населеним пунктам.

Термін «силовий» вказує на роботу даного виду трансформаторів з великими потужностями. Необхідність застосування силових трансформаторів зумовлена різною величиною робочих напруг ліній електропередач (35...750 кВ), міських електромереж (6...10 кВ), напруги що подається кінцевим споживачам (0,4 кВ, вони ж 380/220 В) та напруги, необхідної для роботи електромашин і електроприладів (у досить широкому діапазоні від одиниць В до сотень кВ).

Силкові трансформатори поділяються на *сухі*, найчастіше використовуються в електромережах і в джерелах живлення різних приладів, і *масляні*, що працюють при напругах від 6 кВ і вище. Масляні трансформатори відрізняються від сухих тим, що як ізоляційне й охолоджувальне середовище застосовується спеціальна трансформаторна олива (масло).

Приклад зовнішнього силового трансформатора типової трансформаторної підстанції наведено на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Зовнішній вид трифазного силового трансформатора трансформаторної підстанції відкритого типу

У сухих трансформаторів обмотки та сердечник охолоджуються повітрям. Ці трансформатори менш пожежонебезпечні, ніж масляні, так як у них горючим матеріалом є лише тверда ізоляція – паперово-бакелітові циліндри, а також паперова та бавовняна ізоляція обмоток, просочена лаками. Сучасні потужні трансформатори мають переважно масляне охолодження: природне чи штучне. З введенням у трансформатор мінерального масла збільшується пожежна небезпека, оскільки масло горить, а пари його в суміші з повітрям займаються під дією електричної дуги, іскор тощо [19].

Відтак, забезпечення пожежної безпеки під час експлуатації, а також протипожежного захисту силових трансформаторів – досить важливі питання. Протипожежний захист передбачає як раннє виявлення пожежі, так і її гасіння швидкодіючими засобами. Не менш важливими питаннями є визначення причин таких пожеж, їх розвиток, а також заходи по їх запобіганню та припиненню.

Ймовірність виходу трансформаторів з ладу значною мірою залежить від їх типу, будови, технологій виробництва та ряду інших чинників. Її величину, скажімо, в розвинених країнах Європи оцінюють у середньому в 1 % на один трансформатор за рік експлуатації. Це означає, що у разі експлуатації упродовж 40 років пожежі виникають на 3 % трансформаторів [20].

Під час пожеж на маслонаповнених трансформаторах горить переважно саме масло, а розгерметизація масляного бака всупереч розхожій думці – не головна причина пожеж, особливо за напруг до 300 кВ. За статистикою, несправності в прохідних ізоляторах, що містять просочений маслом папір, а також кабельних коробках з повітряною або масляною ізоляцією стають причиною 70...80 % пожеж. Перемикачі вихідних обмоток, що перебувають під навантаженням, стають «винуватцями» пожеж у 10...15 % випадків, і навіть серед решти відсотків частка випадків розгерметизації масляного бака, як причини пожежі, дуже мала, оскільки енергії, яку несуть іскри, зазвичай недостатньо для порушення його герметичності. Насправді розриви баків за рівнів напруги до 245 кВ трапляються нечасто, оскільки енергії електродугового розряду недостатньо для розриву бака [21].

Основними причинами, через які в прохідних ізоляторах виникають пожежі за наявності паперу, просоченого маслом, зазначеними в [20], є:

- витік (через дефектні ущільнювачі): 80 % випадків;
- погіршення стану електричної ізоляції: 13 % випадків;
- механічне пошкодження (тріщини у фарфоровому корпусі): 7 % випадків.

Пожежі на трансформаторах можуть швидко призвести до часткової або повної втрати всієї електричної підстанції. Так, через пожежу на трансформаторі у червні 2007 року на атомній електростанції в Крюммелі (Німеччина) цю, а також ще одну атомну електростанцію (у Брюнсбюттелі) довелося зупинити. Ремонтні роботи, які довелося проводити через цю подію, зумовили простій реактора в Крюммелі, найбільшого реактора цього типу в світі, що тривав два роки. Через декілька діб після того як електростанцію було запущено повторно у червні 2009 року, нові проблеми з трансформатором примусили знову її зупинити, внаслідок чого в усьому Гамбурзі мала місце нестача електроенергії. Після цього Фаттенвалл, власник електростанції, прийняв рішення замінити два основних трансформатори на електростанції в Крюммелі, що призвело до нового довготривалого простою [22].

Ще одним яскравим прикладом є системна аварія в Російській Федерації, що сталася внаслідок пожежі на підстанції № 510 «Чагіно» у Москві. Пожежа залишила без енергопостачання Підмосков'я, Тульську, Калузьку та Рязанську області. Було відключено Олексинську ТЕЦ, Новомосковську ГРЕС, Єфремівську ТЕЦ, Щокінську ГРЕС. У Московській області без електрики залишилися 34 райони. Загальні збитки від енергокризи за даними на 2005 рік у Москві становили понад 1,7 млрд руб., а Московської області – понад 500 млн руб. [23].

Проведений аналіз наукових праць показав, що питаннями забезпечення пожежної безпеки об'єктів електроенергетики, запобігання виникненню пожеж, гасіння пожеж в електроустановках, обмеження поширення пожеж на суміжні споруди, оцінювання ризиків виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях, зокрема маслонаповнених трансформаторах, займалися вітчизняні та зарубіжні вчені, такі як: Антонов А.В., Булгаков А.Б., Варнакова Д.А., Василевський В.В., Душкін А.Л., Зозуля Д.В., Кашолкін Б.І., Лінчевський Є.А., Мешалкін Є.О., Ніжник В.В., Поздєєв С.В., Рожков А.В., Соколов В.В., Філянович Л.П., Хісматуллін А.С., Черкасов В.М., Heinz-Peter Berg, Marc Foata, Nicole Fritze та ін.

Зокрема, в праці [24] розглянуто питання пожежної безпеки об'єктів електроенергетики на основі аналізу аварійних режимів, особливості розвитку та гасіння пожеж в електроустановках; приведені способи та засоби гасіння таких пожеж, а також необхідні витрати вогнегасних речовин.

У роботі Варнакової Д.А. [25] приділено увагу гасінню пожеж саме на трансформаторних підстанціях, причому зазначається, що руйнування масляних баків або вилив масла є найгіршим варіантом розвитку подій з причини розтікання масла по території підстанції.

Питання пожежної небезпеки силових трансформаторів досліджував Філянович Л.П. [26].

У підручнику за загальною редакцією Черкасова В.М. [27] наведені нормативні обґрунтування й інженерні рішення по забезпеченню пожежної безпеки електроустановок і захисту будівель та споруд від блискавок і статичної електрики.

Підвищенню ефективності систем охолодження потужних силових масляних трансформаторів присвячені роботи Хісматулліна А.С. [28, 29]. Проблеми надійності потужних силових трансформаторів розглянуто у роботах Соколова В.В. [30, 31]. Над підвищенням надійності трансформаторів на АЕС України працює Зозуля Д.В., зокрема, дослідження їх аварійності [32] дозволили визначити «зони ризику» обладнання та запропонувати діагностичні методи контролю терміну служби трансформаторного обладнання.

Дослідження надійності силових трансформаторів і наслідків аварійних ситуацій, пов'язаних із вибухами силових трансформаторів, висвітлено у працях Н. Berg і N. Fritze [33, 34], які відзначають, що останніми роками ймовірність відмов трансформаторів зростає через їх старіння чи зовнішні небезпеки. Запобіганням розривів резервуарів силових трансформаторів присвячена доповідь М. Foata і J.-V. Dastous [35].

Припиненню горіння й обмеженню поширення пожеж на суміжні об'єкти присвячені праці Ніжника В.В. і Поздєєва С.В. [36, 37], але в них не розглядалося питання розповсюдження пожежі між суміжними спорудами під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях.

Результати експериментальних досліджень щодо ефективності гасіння маслонаповнених трансформаторів з урахуванням охолодження його розігрітих елементів тонкорозпиленою водою висвітлені в праці [38], причому авторами визначено час, необхідний для надійного гасіння й охолодження нагрітих частин трансформатора до температури нижчої за температуру самозаймання масла для потоку тонкорозпиленої води, та отримано значення зміни теплового потоку.

В роботі [39] розглянуто вимоги щодо захисту силових маслонаповнених трансформаторів від пожеж і запропоновано принципову схеми спеціального дренчерного зрошувача для їх захисту установками пожежогасіння.

Проведені ще 25 років тому дослідження силових трансформаторів, з напрацьованими за понад 20 років даними вибіркою у 216 одиниць, дозволили виявити основні дефекти [40], що наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні дефекти силових трансформаторів

| Обладнання та вид дефекту                                | Кількість випадків,<br>од. | Питома вага,<br>у %% |
|--|----------------------------|----------------------|
| Система охолодження                                      | 146                        | 23,1                 |
| Високовольтні вводи                                      | 92                         | 14,5                 |
| Виділення газів у масло                                  | 58                         | 9,2                  |
| Старіння масла   | 48                         | 7,6                  |
| Дефекти в пристрої регулювання під навантаженням         | 46                         | 7,3                  |
| Витік по ущільненням обладнання трансформатора           | 44                         | 7,0                  |
| Розпресування обмоток                                    | 42                         | 6,6                  |
| Забруднення твердої ізоляції                             | 34                         | 5,4                  |
| Зволоження твердої ізоляції                              | 26                         | 4,1                  |
| Розпресування магнітопроводу                             | 26                         | 4,1                  |
| Забруднення масла  | 14                         | 2,2                  |
| Деформація обмоток                                       | 10                         | 1,6                  |
| Пошкодження в шафі автоматичного управління охолодженням | 8                          | 1,3                  |
| Підвищена вібрація                                       | 8                          | 1,3                  |
| Пошкодження відводів                                     | 7                          | 1,1                  |
| Пошкодження магнітних шунтів                             | 6                          | 0,9                  |
| Пошкодження пристроїв перемикачів без збудження          | 6                          | 0,9                  |
| Окислювання масла  | 4                          | 0,6                  |
| Перегрів роз'ємну  | 4                          | 0,6                  |
| Порушення герметичності                                  | 4                          | 0,6                  |

Як видно з таблиці 1.3, основними дефектами силових трансформаторів є: пошкодження системи охолодження, виділення газів в масло, витік масла по ущільненням і забруднення масла. Результат цих процесів – знос ізоляції [41].

Питанням прогнозування строку служби та ресурсу ізоляцій присвячені праці Полякова М.А., Василевського В.В., Васіна В.П. [42, 43, 44].

Дисертаційну роботу Василевського В.В. [45] присвячено удосконаленню математичних моделей для прогнозуванню залишкового ресурсу силового трансформатора та техніко-економічного обґрунтування стратегії його технічного обслуговування шляхом розробки комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції. Запропоновано комплексну модель технічного стану целюлозної ізоляції, яка складається з математичної моделі формування реального ресурсу трансформатора на етапі його виробництва та моделі витрати ресурсу целюлозної ізоляції силового трансформатора на етапі експлуатації. Розроблено математичну модель вологообміну в системі целюлозна ізоляція –

трансформаторне масло у взаємозв'язку з іншими математичними моделями, які описують стан трансформатора в експлуатації. За допомогою аналізу результатів моделювання обґрунтовано необхідність урахування проведення технічного обслуговування при розрахунках залишкового ресурсу і моделюванні витрати ресурсу ізоляції в експлуатації.

В цілому, аналіз підходів щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях показав, що відкритий маслонаповнений трансформатор повинен бути відокремлений від сусідніх трансформаторів та один від одного бар'єрами, просторовим розділенням або іншими засобами з метою обмеження шкоди та потенційного розповсюдження пожежі через його несправність [46].

Однак, у цих працях не приділено уваги поведінці під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях при розгерметизації трансформатора з подальшим виливанням масла у маслоприймач та його проходженням через вогнезагороджувач з метою виявлення закономірності зниження температури до нижчої за температуру спалаху масла в залежності від геометричних параметрів гравійної засипки. Хоча в навчальному посібнику [47] наведено розрахунки маслоприймачів (без відводу та з відводом трансформаторного масла), масловідводів і маслзбірників із зазначенням їх геометричних параметрів, а також вимоги до гравійної засипки. Разом із тим, розрахунки для систем відводу масла від трансформаторів наведені за рекомендаціями ще 1990 року [48].

П'ять років тому в праці [49], присвяченій оцінці пожежної небезпеки на закритому розподільчому пристрої 220 кВ через розрахунок ризику виникнення та розвитку пожежі з розливом трансформаторного масла, розрахунок ймовірності виникнення аварійної ситуації показав, що найбільш імовірна подією є перегрів трансформаторного масла при збільшених навантаженнях.

Тож, за результатами проведеного аналізу можна відзначити, що в розглянутих роботах недостатньо досліджені процеси тепломасопередачі для забезпечення ефективного відведення тепла трансформаторного масла, що



проходить через вогнезагороджувач в умовах пожежі, та не виявлені закономірності зниження температури масла до нижчої за його температуру спалаху залежно від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

### **1.3. Аналіз нормативних документів щодо припинення та обмеження поширення пожеж під час аварій на трансформаторних підстанціях**

Вимоги щодо протипожежного захисту трансформаторів зазвичай описано в стандартах, таких як NFPA 850 [50], NFPA 851 [51] або Нормативно-технічний документ FM Global № 5-4 [52]. Інші стандарти або кодекси усталеної практики можуть містити вимоги, що залежать від ризику, а також настанови, до них належать Настанова щодо практики забезпечення пожежної безпеки трансформаторів [53], Настанова Інституту інженерів-електриків та електронників США [54] щодо протипожежного захисту трансформаторних підстанцій, а також стандарт щодо систем пожежної сигналізації [55].

Аналіз вітчизняної нормативної бази показав, що в Україні нормативним документом, який встановлює вимоги до електроустановок загального призначення змінного струму напругою до 750 кВ та постійного струму напругою до 1,5 кВ, зокрема вимоги щодо обмеження розтікання масла та поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів, – є «Правила улаштування електроустановок» [56].

Відповідно до вимог [56] для обмеження розтікання масла та поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів застосовують маслоприймачі з відведенням масла масловідводами в маслосбірник. Приклад зовнішнього виду площадки маслоприймача типової трансформаторної підстанції наведено на рисунку 1.10.

Дана конструкція маслоприймача повинна мати ухил 0,005 м/м у бік напрямки (маслосбірника) та бути засипаною чистим щебенем фракцією від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки має становити не менше ніж 250 мм.



Рисунок 1.10 – Зовнішній вид площадки маслоприймача трансформаторної підстанції

Маслоприймач – це площадка, що першою приймає витікаюче масло з обладнання та не дає йому розлитися територією підстанції. Маслосбірник – це ємність, в яку потрапляє масло, стікаючи масловідводами від маслоприймача.

Приклад улаштування маслонаповненого трансформатора, встановленого у маслоприймач, наведено на рисунку 1.11.



Рисунок 1.11 – Маслонаповнений трансформатор, встановлений у маслоприймач

Припинення й обмеження поширення горіння трансформаторного масла досягається застосуванням системи вогнеперешкоджання, що складається з маслоприймача, масловідводів і вогнезагороджувача, в якості якого використовується маслосбірник із металевою решіткою, поверх якої улаштовано гравійну засипку.

Приклад конструктивної схеми вогнезагороджувача, в якості якого використовується маслосбірник із металевою решіткою, поверх якої насипано шар щебеню, наведено на рисунку 1.12.

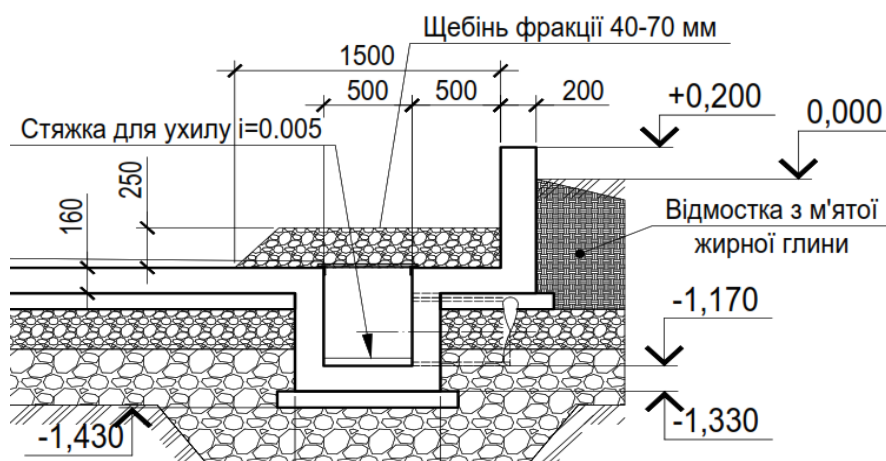


Рисунок 1.12 – Приклад конструктивної схеми вогнезагороджувача

Проведений аналіз іноземного досвіду щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях [57-62] показав, що зарубіжні підходи аналогічні вітчизняним. Зокрема, у [61] приведено загальні вимоги до утримання масла в маслоприймачі, а одним із методів обмеження пожежі є заповнення маслоприймача щебенем фракцією від 30 мм до 50 мм, причому щебінь повинен бути чистим і середніх розмірів, щоб масло могло швидко протікати через нього. Об'єм приймача та засипки повинен бути достатнім, щоб утримувати загальний обсяг масла з трансформатора на 100 мм нижче поверхні щебеню, для того щоб пожежа не поширювалася.

На рисунку 1.13 показано типове розташування щебеню у маслоприймачі згідно з [61].

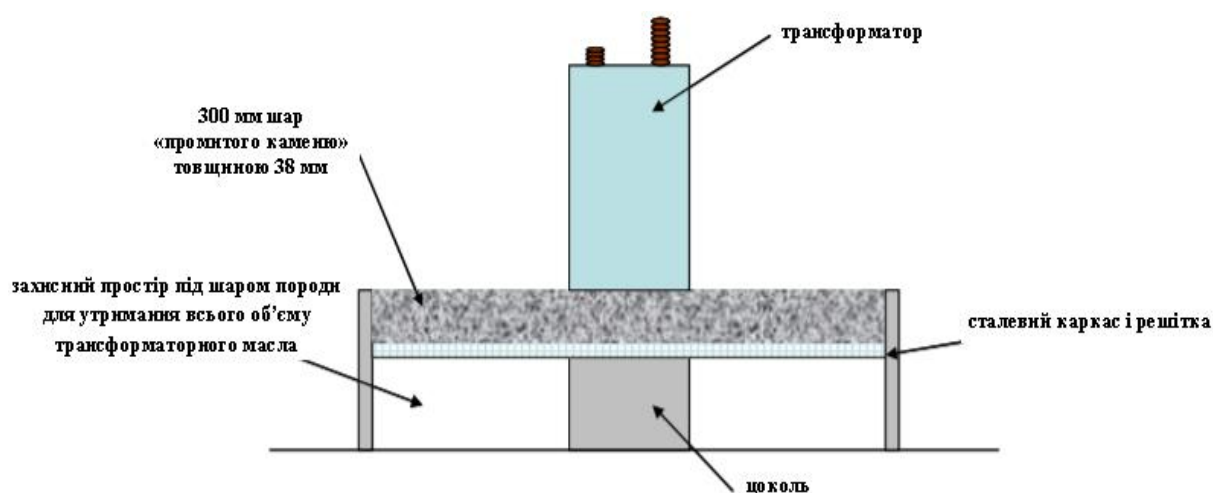


Рисунок 1.13 – Типове розташування щебеню у маслоприймачі згідно з [61]

Разом із тим, аналіз пожеж та їх наслідків, що виникають під час експлуатації маслонаповнених трансформаторів показав, що ряд їх конструктивних параметрів негативно впливають на ефективність обмеження поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених трансформаторів. Руйнування керамічного ізолятора або розгерметизація масляного бака і подальший вихід обладнання з ладу, як правило, є наслідком довготривалої експлуатації – процесом, який важко передбачити та можливо виявити лише за постійного моніторингу технічного стану корпусу маслонаповнених трансформаторів [63].

Під час влаштування маслоприймачів для відведення трансформаторного масла діє вимога щодо влаштування ухилу, не менше ніж 0,005 м/м у бік маслоприймача, який має бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем. Разом із тим, слід розуміти, що ухил в 0,005 м/м, що відповідає значенню 5 мм висоти на 1 м довжини, може, навіть, не відповідати значенню шорсткості поверхні бетонної площадки [63]. Для прикладу, шорсткість поверхні рівного асфальтобетонного покриття автомобільних доріг та площадок для паркування автомобілів згідно з ДСТУ Б В.2.7-119 [64] становить 0,02-0,07 м/м. Окрім цього, ухил 0,005 м/м у бік маслоприймача не може задовольнити вимог ДБН В.2.5-74 [65] щодо забезпечення відводу дощових вод і води, що утворюватиметься під час танення снігу. Також недослідженим питанням є необхідність засипання гравієм чи щебенем всієї площі маслоприймача, який внаслідок впливу оточуючого середовища постійно забруднюється, чим погіршує свою пропускну й охолоджувальну здатність, що зумовлює його періодичне збирання, промивання, сушку, засипку (а на цей період відбувається відключення підстанції). Такі роботи є трудомісткими й економічно затратними.

Вплив природного фактору на виникнення та поширення пожежі ілюструє наступний приклад [12]. 09 березня 2017 року о 13 год 39 хв рятувальникам Херсонщини надійшла інформація про займання сухої трави та сміття у місті Скадовську по вул. Набережній. Чергове відділення пожежно-рятувальної частини, прибувши до місця виклику, відразу приступило до гасіння займання та вже через годину повністю ліквідувало пожежу на площі 300 м<sup>2</sup>. Але, від

сухостою частково загорілася трансформаторна будка, якій не дали згоріти вогнеборці, приборкавши полум'я на початковій стадії (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Приклад загоряння трансформатору від пожежі сухої трави

Під час розгерметизації масляного бака, в середині якого знаходиться масло з робочою температурою від 150 °С до 270 °С, при контакті масла з повітрям воно може самозайнятися. Таким чином, відсутність заходів щодо ефективного відведення трансформаторного масла з площадки маслоприймачів для маслонаповнених електротрансформаторів унаслідок їх розгерметизації може спричинити збільшення площі пожежі та, як наслідок, підвищити значення теплового впливу на суміжні об'єкти, що в свою чергу тягне за собою необхідність у нарощуванні кількості сил і засобів на ліквідацію пожежі.

За результатами проведеного аналізу щодо обмеження поширення пожеж під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях [46, 66, 67] можна стверджувати, що сучасні підходи до обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях недостатні й економічно затратні для мінімізації наслідків горіння розливів трансформаторного масла.

Тож, визначені у вітчизняній нормативній базі конструктивні та геометричні параметри вогнезагороджувачів маслонаповнених трансформаторних підстанцій можуть бути предметом для їх удосконалення, зокрема щодо геометричних параметрів маслоприймача, конструктивної схеми вогнезагороджувача, ухилу маслоприймача, обмеження теплового впливу між трансформаторами, суміжними об'єктами та територіями.

#### 1.4. Висновки за першим розділом

За результатами аналізу пожеж та їх наслідків, проведеного на основі аналізу статистичних даних про пожежі в Україні встановлено, що щороку в середньому близько 50 % від пожеж в енергетичній галузі припадає на трансформаторне обладнання (загалом виникло 963 пожежі, прямі збитки від яких склали більше 32 млн гривень); як правило, такі пожежі супроводжуються аварійним розливом масла із трансформатора та його загорянням.

За результатами аналізу літературних джерел відзначено, що в розглянутих роботах недостатньо досліджені процеси тепломасопередачі для забезпечення ефективного відведення тепла трансформаторного масла, що проходить через вогнезагороджувач під час пожежі на трансформаторних підстанціях, і не виявлені закономірності зниження температури масла до нижчої за його температуру спалаху залежно від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

За результатами проведеного аналізу пожеж та їх наслідків, що виникають під час експлуатації маслонаповнених трансформаторів, розглянутих літературних джерелах, вимог вітчизняної та зарубіжної нормативної бази щодо конструктивних параметрів площадок маслоприймачів можна стверджувати, що сучасні підходи до припинення й обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях недостатні й економічно затратні для мінімізації наслідків горіння розливів трансформаторного масла.

Визначені у вітчизняній нормативній базі конструктивні та геометричні параметри вогнезагороджувачів є предметом для їх удосконалення, зокрема щодо геометричних параметрів маслоприймача, конструктивної схеми вогнезагороджувача, ухилу маслоприймача, обмеження теплового впливу між трансформаторами, суміжними об'єктами та територіями.

Виходячи із викладеного, можливо сформулювати гіпотезу про те, що вдосконалення наявних інженерних рішень по облаштуванню маслоприймача, що має виконувати функцію вогнезагороджувача та охолодження масла нижче температури спалаху, створить передумови для підвищення ефективності системи обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях.

Тому дослідження, спрямовані на розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача, що стане підґрунтям для підвищення ефективності системи вогнеперешкодження маслонаповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі, – є актуальним науковим завданням.

Метою проведення досліджень є виявлення закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції, як основи вдосконалення наявних конструктивних рішень під час проектування маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що мають виконувати функцію припинення горіння та забезпечувати охолодження масла нижче температури спалаху.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати сучасний стан заходів щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях;

2) обґрунтувати найбільш значущі параметри системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції та визначити критерій, що встановлює ефективність охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції;

3) побудувати математичну модель процесу тепломасообміну у потоках трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції під час пожежі;

4) на основі створеної математичної моделі розробити методику та провести чисельний експеримент щодо виявлення залежності температури охолодження трансформаторного масла від параметрів маслоприймача;

5) розробити методику експериментальних досліджень та провести експеримент щодо охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції під час його аварійного зливання; встановити на основі порівняльного аналізу експериментальних і розрахункових даних адекватність запропонованих моделей; експериментально визначити показники пожежної небезпеки трансформаторного масла;

6) розробити методичні підходи до прогнозування ефективності системи перешкодження пожежі трансформаторних підстанцій.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ПРИПИНЕННЯ ТА ОБМЕЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

### 2.1. Теоретичні підходи до дослідження умов припинення та обмеження поширення пожежі вогнезагороджувачем

Відомо, що теплота в навколишнє середовище передається трьома способами: конвекцією, теплопровідністю і випромінюванням [68, 69].

Конвекція – вид теплообміну (теплопередачі), за якого внутрішня енергія передається струменями і потоками самої речовини [70].

Теплопровідність – здатність речовини переносити теплову енергію, а також кількісна оцінка цієї здатності: фізична величина, що характеризує інтенсивність теплообміну в речовині, яка дорівнює відношенню густини теплового потоку до градієнта температури [71].

Випромінювання – це складний процес, який об'єднує випромінювання енергії тілом, розповсюдження її в просторі електромагнітними хвилями і поглинання іншими тілами. Такий вид теплопередачі називають також радіаційним теплообміном [72].

Під час пожеж на відкритому просторі теплота передається оточуючим об'єктам головним чином випромінюванням [73]. Незважаючи на те що частка теплоти, переданої конвекцією, орієнтовно досягає 76 %, значна частина передається верхнім шаром атмосфери та не змінює обстановки на пожежі [74].

Однією з причин поширювання пожежі на сусідні будівлі та споруди, технологічні блоки та об'єкти природної екосистеми може бути перенос теплової енергії шляхом променевим та конвекційним теплообміном [75].

Під час виконання роботи слід вирішити обернену задачу передачі тепла через багат шарову плоску поверхню чистого гравію або промитого гранітного щебеню фракцією від 30 мм до 70 мм.



Конвективний теплообмін між рухомих середовищем (рідиною) і поверхнею її розподілу з іншим середовищем (твердим тілом) називається тепловіддачею.

Тепловіддачу прийнято розраховувати за формулою Ньютона-Ріхмана (2.1) для теплового потоку [76]:

$$q = \frac{Q}{F} = \alpha(T_e - T_s), \quad (2.1)$$

де:  $\alpha$  [Вт/(м<sup>2</sup>·К)] або [Вт/(м<sup>2</sup>·°С)] – коефіцієнт тепловіддачі, що характеризує умови теплообміну між рідиною і твердим тілом;

$T_e, T_s$  [°С] – середні температури рідини та стінки;

$Q$  [Вт] – тепловий потік;

$F$  [м<sup>2</sup>] – площа поверхні тепловіддачі.

Під час визначення теплового потоку за формулою (2.1) великі труднощі виникають під час визначення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$ , який залежить від багатьох факторів: причини і режиму руху рідини, її швидкості, теплофізичних параметрів, геометричної форми і розмірів тіла, температур середовища і поверхні тіла тощо.

За природою виникнення тепловіддачі розрізняють два види конвекції – вільну, що виникає під час руху рідини під дією неоднорідного поля гравітаційних (або електромагнітних) сил, та вимушену, під час руху рідини під дією зовнішніх сил, прикладених на границях або за рахунок кінетичної енергії рідини, отриманої поза системою. В нашому випадку вважаємо що конвекція відноситься до вільного типу та виникає під час руху рідини під дією гравітації (аварійної розгерметизації електротрансформатора).

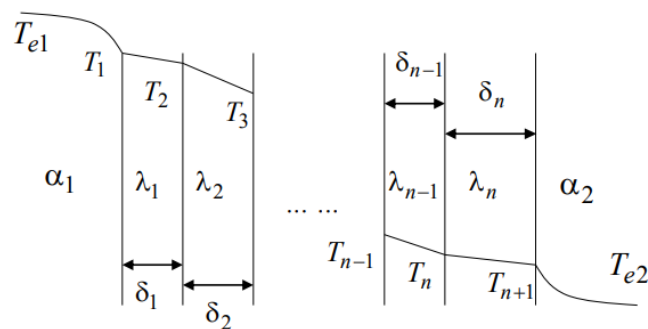
Під час ламінарного руху масла окремі частинки та шари рідини рухаються паралельно один до одного, не перемішуючись. У такому режимі перенесення теплоти від одного шару рідини до іншого відбувається тільки теплопровідністю. Під час турбулентного режиму окремі частини і шари рідини рухаються безладно (хаотично) з утворенням вихрів. Але на кордоні рідини та стінки зберігається тонкий ламінарний шар рідини. У турбулентній частині потоку теплота

передається як конвекцією, так і теплопровідністю. Цей шар має великий термічний опір (у порівнянні з турбулентною частиною потоку) і в ньому відбувається найбільше падіння температури.

Враховуючи непривирність потоку тепла, тепловий потік що відводиться поверхнею згідно формули Ньютона-Ріхмана можна виразити у вигляді (2.2):

$$q \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = T_{e1} - T_{e2} \quad (2.2)$$

При цьому, графічно рівняння (1.2) матиме вигляд:



Повний термічний спротив  $R$ ,  $(\text{m}^2 \text{K})/\text{Вт}$  можна виразити рівнянням (2.3):

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (2.3)$$

де, коефіцієнт передачі виражений через формулу (2.4):

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i + 1/\alpha_2} \quad (2.4)$$

Вирішення оберненої задачі полягає в тому, що згідно з вихідними фізичними властивостями трансформаторного масла, а саме знаючи початкову критичну температуру горіння  $350^\circ\text{C}$ , що супроводжується виділенням енергії та втрати маси, слід знайти необхідну товщину шару гравію, що знизить критичну температуру до  $150^\circ\text{C}$ , при цьому температура гравію буде поступово збільшуватись упродовж усіх 900 с вільного витікання масла із трансформатору. Таким чином, рівняння енергії та нерозривності для нестисливої рідини [77], можна виразити у вигляді (2.5) та (2.6).

$$c_p \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Рівняння руху, з врахуванням сили тяжіння:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_x}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} &= g\beta(T - T_0) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w_y}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial w_z}{\partial t} + w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Моделювання процесів горіння, а саме попередньо змішане горіння, для запуску якого вимагається займання, проводиться за допомогою сучасних математичних комплексів, що дозволяє досить точно досліджувати горіння 26 видів палива і 5 окислювачів [78].

Візуалізація розподілу масової частки компонентів горіння для: оксид вуглецю (CO), діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>), оксид азоту (NO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), вода (H<sub>2</sub>O), залишкове паливо та залишковий окислювач. Рівноважна модель горіння суміші, що складається з декількох речовин та може реагувати. Якщо в ході реакції виділяється енергія, то тоді відбувається горіння. FloEFD дозволяє враховувати теплові ефекти горіння в газових сумішах. Рівноважний підхід означає, що горіння починається нескінченно швидко при змішуванні (без попереднього перемішування). На практиці є багато випадків, в яких газові суміші (паливо і окислювач) знаходяться при кімнатній температурі і ці суміші не вступають в реакцію доданих умовах. Для проведення аналізу вищевказаного випадку досліджуватиметься горіння з кінцевою швидкістю рівноважних продуктів згорання. Це вимагає моделювання займання, щоб почати реакцію горіння.

Загальний алгоритм моделювання представлено схемою на рисунку 2.1.

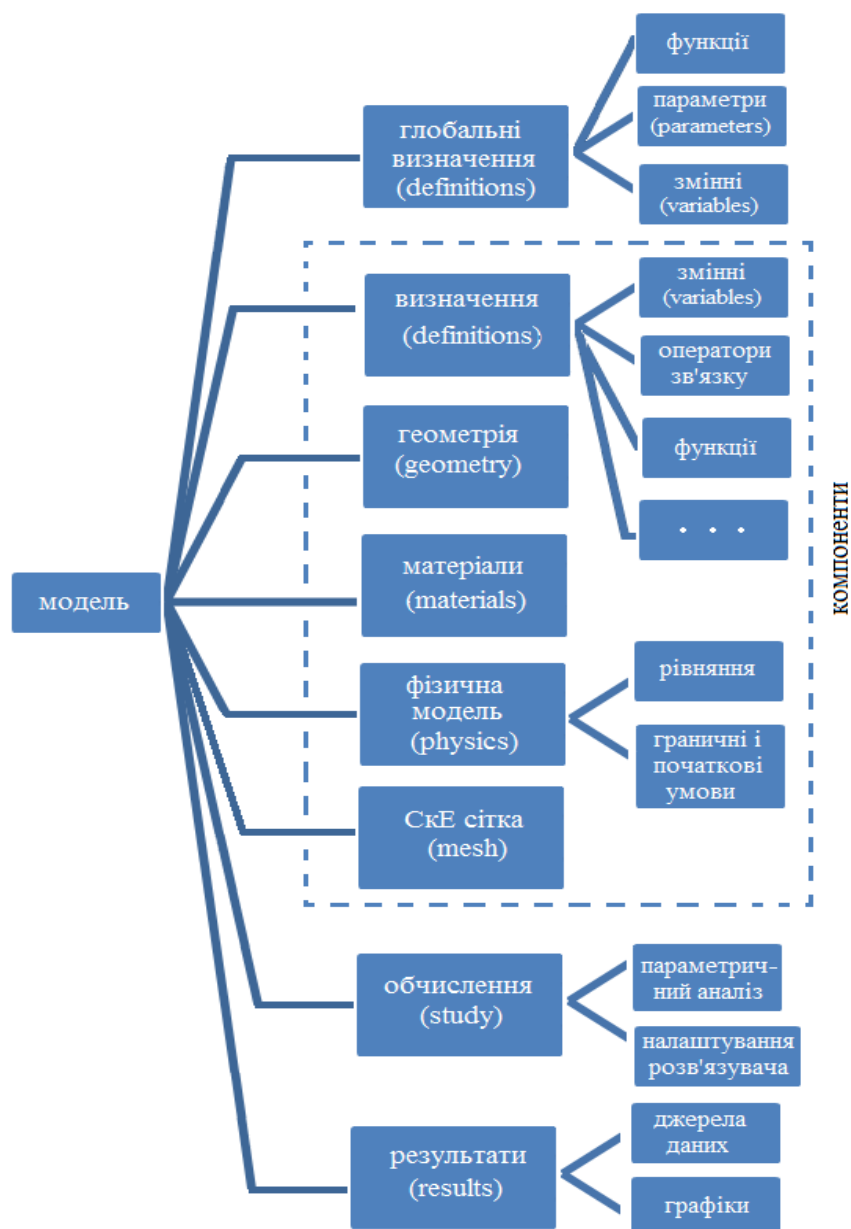


Рисунок 2.1 – Алгоритм математичного моделювання тепловіддачі вогнезагороджувача

Основи розвитку та припинення горіння викладено в [79-82]; щодо гасіння пожеж в електроустановках – у [24]. Загальні відомості про методи прогнозування небезпечних чинників пожежі наведено в навчальному посібнику [83].

## **2.2. Обґрунтування критеріїв по дослідженню залежності температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик маслоприймача**

За результатами проведеного у розділі 1 аналізу пожеж та їх наслідків, що виникають під час експлуатації маслонаповнених трансформаторів, вимог вітчизняної та зарубіжної нормативної бази, що висуваються до конструктивних параметрів площадок маслоприймачів, з'ясовано, що у разі виникнення аварій на трансформаторних підстанціях трансформаторне масло як горюча рідина при контакті з повітрям може самозайнятися, обумовивши виникнення пожежі, а також сприяти її розвитку та поширенню на суміжні будівлі чи споруди на території станції. А недостатність або відсутність заходів щодо ефективного відведення трансформаторного масла з площадки маслоприймачів трансформаторних підстанцій може сприяти збільшенню площі пожежі та, як наслідок, підвищенню значення теплового впливу на суміжні об'єкти [67].

Аналіз обставин виникнення пожеж під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях дозволив визначити основні їх причини, що в свою чергу дозволяє виокремити ряд параметрів, які впливають на зміну температури трансформаторного масла під час його проходження через маслоприймач до маслозбірника.

Такі параметри, як тривалість опромінювання, інтенсивність теплового потоку, потужність джерела горіння, висота зони полуменевого горіння, теплоутворювальна здатність пожежної навантаги, що впливають на зміну значення теплового потоку від пожежі на суміжні будівлі чи споруди, визначені й охарактеризовані у роботі [84].

Разом із тим, на обмеження поширення пожежі на маслонаповнених трансформаторних підстанціях і зміну температури трансформаторного масла можуть впливати такі конструктивні параметри маслоприймачів як висота, ширина, довжина гравійної засипки, фракція щебеню, ухил маслоприймача у бік маслозбірника, матеріал основи маслоприймача, матеріал засипки маслоприймача

(його теплоємність, теплопровідність, економічна доцільність), а також такі природні чинники як опади у вигляді дощу чи снігу, рослинність, тиск і вітер [85].

В роботі [86], результатом якої є обґрунтування доцільності впровадження результатів моделювання рівнянь теплового балансу на стадії завершального етапу проектування розподільчих трансформаторів, однією зі складових математичної моделі є рухома речовина (масло), що додатково контактує з навколишнім середовищем нескінченної теплоємності. За результатами аналізу існуючих методів урахування нагріву й охолодження розподільчих трансформаторів, таких як: емпіричний і розрахунковий методи «перегрів», метод термогідролічних кіл, метод польового моделювання стану обмоток, метод еквівалентних гріючих втрат, метод температурних полів, метод еквівалентних схем заміщення, метод теплового розрахунку, з'ясовано, що, застосовуючи їх під час проведення розрахунків чи математичного моделювання теплових процесів, слід враховувати температури масла (як середню, так і верхнього шару на поверхні трансформатора), а нехтування цими значеннями є неприйнятним.

Аналізуючи взаємозв'язки між зазначеними параметрами та їх значущість до впливу на процес тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою, встановлено перелік параметрів, що слід враховувати під час дослідження залежності зміни температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки, а саме: висота гравійної засипки, ширина гравійної засипки, ухил маслоприймача у бік маслозбірника.

Основним істотним критерієм оцінювання ефективності системи обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях – є температура масла, вплинути на зміну показника якого можливо інженерними рішеннями по облаштуванню маслоприймача, що має виконувати функцію вогнезагороджувача та охолодження його нижче температури спалаху. Тож, критерієм оцінювання прийнято температуру масла, зокрема температуру його спалаху.

### 2.3. Теоретичне описання процесу тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою маслоприймача

Дослідити процеси тепломасообміну у потоках трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції під час його аварійного зливання можливо за допомогою розроблення математичних моделей [87] дослідження процесів теплообміну трансформаторного масла в маслоприймачі та закономірностей зміни його температури від параметрів гравійної засипки маслоприймача.

Використовуючи математичне моделювання стає можливим дослідити процеси теплопередачі [88] та тепломасопереносу [89] із заданими умовами довкілля.

Для теоретичного описання процесу тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою з метою обґрунтування її ширини та висоти у якості математичної моделі використано рівняння руху та рівняння нерозривності потоку, що описуються системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса [90].

У векторному вигляді для нестисливої рідини їх записують у спосіб, визначений формулами (2.7-2.9):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \times V] = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left[ \left( \frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right] + Q_{rad}, \quad (2.9)$$

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;

$S$  – початковий член рівняння

$C_p$  – теплоємність суміші за постійного тиску;

$Pr_t$  – турбулентне число Прандтля;

$h$  – статична ентальпія;

$Q_{rad}$  – член рівняння, що описує зміну енергії за рахунок дії теплового випромінювання.

Початковий член рівняння  $S$  визначають за формулою (2.10):

$$S = (\rho - \rho_{hyd})g + \rho B, \quad (2.10)$$

де:  $\rho_{hyd}$  – гідростатична густина;

$g$  – вектор гравітаційних сил;

$B$  – вектор сил обертання.

Вектор сил обертання (центробіжної сили та сили Кориоліса) обраховують за формулою (2.11):

$$B = -2\omega \cdot V, \quad (2.11)$$

де:  $\omega$  – вектор кутової швидкості.

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.

Турбулентну динамічну в'язкість ( $\mu_t$ ) визначали за найбільш поширеною стандартною  $k$ - $\varepsilon$  моделлю [91] за формулою (2.12):

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.12)$$

де:  $C_\mu = 0,09$  – сталий коефіцієнт;

$\rho$  – густина;

$\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії;

$k$  – турбулентна енергія.



Статичну ентальпію ( $h$ ) визначають за формулою (2.13):

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T C_p dT + \sum_k Y_k H_k, \quad (2.13)$$

де:  $T$  – температура;

$h_0$  – початкова ентальпія за температури  $T_0$ ;

$C_p$  – теплоємність суміші за постійного тиску;

$Y_k$  – концентрація  $k$ -го компонента реакції горіння;

$H_k$  – теплота утворення  $k$ -го компонента.

Вихідний член  $Q_{rad}$  у рівнянні (2.9) визначають за формулою (2.14):

$$Q_{rad} = -4\alpha n^2 (E_b - E_r), \quad (2.14)$$

де:  $\alpha$  – інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання;

$n$  – коефіцієнт заломлення середовища;

$E_b$  – рівноважна щільність енергії випромінювання;

$E_r$  – щільність енергії випромінювання.

Крім того, основні рівняння доповнюються математичними моделями, що враховують сукупні явища, зокрема: модель конвективних та радіаційних потоків, модель турбулентності тощо [92].

Для обчислення радіаційного теплообміну в рідині та взаємного теплообміну між середовищем і частками, а також твердим тілом доцільно використовувати дифузійну модель випромінювання газу, побудованої на припущенні, що оптичне середовище ізотропне, процес радіаційного теплопереносу описується рівнянням (2.15):

$$\nabla \left( \frac{1}{\alpha + \beta} \nabla E_r \right) + 3(\alpha E_b - \alpha E_r) = 0 \quad (2.15)$$

Рівноважну щільність енергії випромінювання ( $E_b$ ) визначають за формулою (2.16):

$$\alpha E_b = \alpha_m \cdot E_{b,m} + \alpha_p \cdot E_{b,p}, \quad (2.16)$$

де:  $\alpha_m$ ,  $\alpha_p$  – коефіцієнти поглинання відповідно середовища та часток;

$\beta_m, \beta_p$  – коефіцієнти розсіювання відповідно середовища та часток;

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

Інтегральний за спектром коефіцієнт поглинання ( $\alpha$ ) визначають за формулою (2.17):

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_p \quad (2.17)$$

Інтегральний за спектром коефіцієнт розсіювання ( $\beta$ ) визначають за формулою (2.18):

$$\beta = \beta_m + \beta_p \quad (2.18)$$

Перелічені у виразах (2.15-2.18) величини визначають за такими формулами:

$$E_{b,m} = \sigma \cdot T_m^4 \quad (2.19)$$

$$\alpha_p E_{b,p} = \frac{1}{\Omega_{cell}} \sigma \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 \cdot N_j \cdot T_{pj}^4 \quad (2.20)$$

$$\alpha_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} \varepsilon_p \sum_j \pi r_j^2 \cdot N_j \quad (2.21)$$

$$\beta_p = \frac{1}{\Omega_{cell}} (2 - \varepsilon_p) \sum_j \pi r_j^2 \cdot N_j, \quad (2.22)$$

де:  $\sigma$  – стала Стефана-Больцмана;

$T_{pj}$  – температура  $j$ -тої частки;

$\varepsilon_p$  – ступінь чорноти часток;

$N_j$  – кількість часток у комірці.

Короткі характеристики можливих видів математичних моделей, зокрема детермінованих, інтегральних, зональних, польових, імовірнісних, імітаційних, змішаних, наведено в роботі [93].

Під час апроксимації диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса використано метод кінцевих різниць із їх розв'язком за явною схемою «предиктор-коректор» другого порядку інтегруванням по температурі. Прийнято, що напрям руху потоку масла співпадає з напрямом ухилу.

## 2.4. Теоретичне визначення ефективного ухилу маслоприймача

Запобігання розтікання трансформаторного масла в разі аварійної розгерметизації маслонаповнених силових трансформаторів є невід'ємною частиною забезпечення обмеження пожежі на трансформаторних підстанціях. Наявність конструктивних заходів щодо обмеження розтікання трансформаторного масла на площадці трансформаторної підстанції та забезпечення ефективного відводу масла в аварійну ємкість є передумовою зменшення площі можливої пожежі, зниження значення температурних впливів для суміжних об'єктів та створення умов безпеки для пожежно-рятувальних підрозділів, які здійснюватимуть гасіння можливої пожежі.

Згідно з вимогами [56] для запобігання розтіканню масла та поширенню пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів (шунтувальних реакторів) з кількістю масла понад 1 т в одиниці (в одному баку) потрібно застосовувати маслоприймачі з відведенням масла масловідводами в маслосбірники. Для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВА і маслонаповнених бакових вимикачів на напругу 110 кВ і вище дозволено виконувати маслоприймачі без відведення масла. Об'єм маслоприймача з відведенням масла потрібно розраховувати на приймання 100 % масла, залитого в трансформатор. Під час влаштування маслоприймачів для відведення масла діє вимога щодо влаштування ухилу, не менше ніж 0,005 м/м у бік приямка, який має бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем.

У разі розливу масла на пласку поверхню без ухилу, пляма масла матиме характер розтікання рівномірно пропорційний площі площадки маслоприймача та збільшуватиметься до моменту досягнення границі борту площадки трансформатора, навіть якщо частина масла буде стікати до приямку масловідводу.

У роботі [63] під час проведення аналізу конструктивних параметрів існуючих типів трансформаторних підстанцій виявлено окремі конструктивні недоліки площадок, що можуть негативно впливати на запобігання розтіканню

масла та, як наслідок, спричиняти поширення пожежі під час пошкодження маслonaповнених силових трансформаторів.

Аналіз літературних джерел показав відсутність результатів наукових досліджень, пов'язаних з обґрунтуванням ефективного значення ухилу площадки маслоприймача, засипаного чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем, у бік маслосбірника. Наявні дослідження у сфері пожежної безпеки, пов'язані з транспортною галуззю.

Так, у роботі [94] проведено порівняльну оцінку величини пожежного ризику під час транспортування бензину залізничними цистернами ємкістю  $84 \text{ м}^3$  як з урахуванням ухилу залізничної колії та прилеглої території, так і без нього. За рельєф розглядалася прямолінійна ділянка дороги з ухилом і подальшим підйомом загальною довжиною 1 км, обмежена з обох боків дренажними канавами, що відводять вилів до нижньої точки дороги з подальшим скиданням на рельєф території. Отримані залежності потенційного ризику (рисунок 2.2) від відстані до осі, перпендикулярній залізниці, що проходить через нижчу точку прокладеної залізничної колії, вказують, що значення потенційного ризику (з урахуванням і без урахування рельєфу, дренажних каналів) можуть значно відрізнятися один від одного, що пояснюється необхідністю урахування внеску всіх чинників по довжині ухилу.

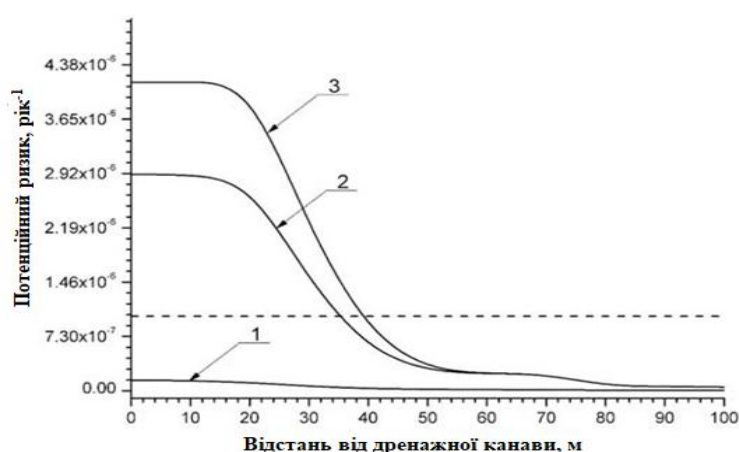


Рисунок 2.2 – Залежність значення потенційного ризику від відстані дренажної каналі:

- 1 – значення потенційного ризику без урахування розливу рідини;
  - 2 – значення потенційного ризику з урахуванням розливу у відкритій дренажній каналі;
  - 3 – значення потенційного ризику з урахуванням розливу у закритій дренажній каналі;
- пунктиром позначено величину потенційного ризику, що дорівнює  $10^{-6} \cdot \text{рік}^{-1}$

Тож, урахування ухилу та дренажних систем може відігравати істотну роль для оцінки величини пожежного ризику.

У роботі [95] з метою вивчення впливу на поширення небезпечних чинників пожежі ухилу тунелю авторами було проведено чисельні експерименти на змодельованому тунелі (рисунок 2.3).

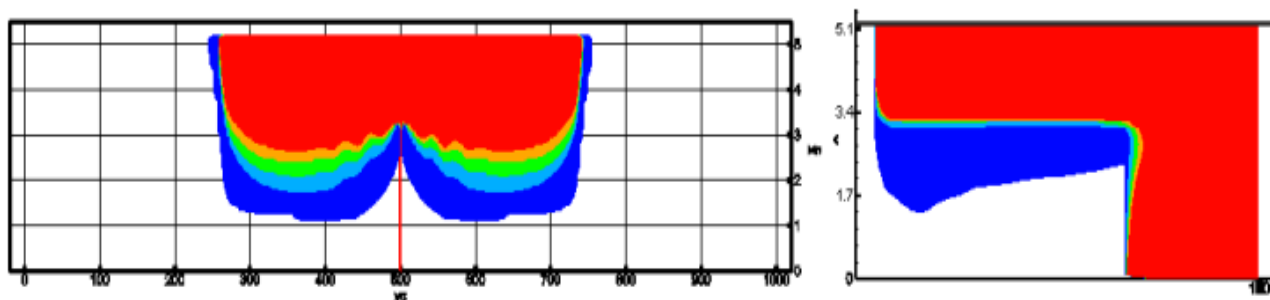


Рисунок 2.3 – Змодельований тунель на 2 смуги прямокутного поперечного перерізу розміром 10 м×5,2 м і довжиною 1 км

Застосована математична модель, реалізована в програмному комплексі SOFIE [96], була апробована шляхом порівняння з даними натурних експериментів [97] та визнана адекватною для проведення чисельного моделювання розвитку пожежі у тунелях. За осередок пожежі обрали джерело потужністю 10 МВт, що розміщувався у центрі тунелю, та постійні за довжиною значення ухилу від 0 % до 6 %.

Отримані результати вказують, що характер поширення небезпечних чинників пожежі в тунелі без ухилу істотно відрізняється від поширення в похилому тунелі, в якому блокування шляхів евакуації вгору по ухилу відбувається значно швидше. Крім того, за відсутності ухилу блокування простору тунелю біля стін відбувається швидше, ніж у його центрі.

У роботі [98] проведено оцінку величини потенційного ризику під час перевезення пожежонебезпечних вантажів автомобільним транспортом з урахуванням можливого стікання горючої рідини з урахуванням ухилу території, а також проведено порівняння для відкритих і закритих дренажних каналів.

У роботі [99] розглянуто вплив поздовжнього ухилу автодорожнього тунелю на поширення небезпечних чинників пожежі у разі виникнення у ньому

загоряння, оцінювання якого проведено з використанням польового методу моделювання. За результатами аналізу отриманих даних автори дійшли висновку про те, що «класичне» розуміння протікання пожежі, що ґрунтується на принципі «чим більший ухил тунелю, тим швидше відбувається блокування», за певних умов може не відповідати дійсності, причому достатній вплив на результат розрахунку дає постановка граничної умови щодо сталого тиску.

Відсутність досліджень щодо ефективності значення ухилу, передбаченого [56] у 0,005 м/м у бік маслоприймача, що фактично відповідає значенню 5 мм висоти на 1 м довжини, є передумовою для проведення аналізу конструктивних характеристик площадки й обґрунтування необхідного значення ухилу для забезпечення швидкого відводу масла до маслоприймача, його проходженням через гравійну засипку.

Окрім цього, постає завдання обґрунтувати значення ухилу лотку із гравійною засипкою для забезпечення проходження трансформаторного масла з необхідною швидкістю системою вогнеперешкоджання та забезпечення відсутності накопичення трансформаторного масла на поверхні гравійної засипки через низький коефіцієнт фільтрації при малій швидкості проходження потоку масла крізь гравійну засипку, адже накопичення масла на поверхні щебеню та його контакт з повітрям створює передумови для його займання.

Теоретичне визначення ефективного ухилу маслоприймача у бік маслосбірника проводилося за адаптивною формулою (2.23) для прямокутних каналів:

$$i = \frac{\lambda(a+b)}{2ab} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\varphi^{0,72}}{n_c}, \quad (2.23)$$

де:  $i$  – ухил маслоприймача;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;

$n_c$  – шорсткість стінок;

$a, b$  – геометричні параметри лотку;

$\varphi$  – коефіцієнт переливу;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$v$  – середня швидкість потоку.

Таблиці з коефіцієнтами, що використовуються під час гідравлічних розрахунків, наведені [100], в основі яких покладено формулу академіка М.М. Павловського (2.24):

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (2.24)$$

де:

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1), \quad (2.25)$$

для значення коефіцієнта шорсткості самопливних колекторів  $n = 0,014$  і напірних трубопроводів круглого перерізу  $n = 0,013$ .

При визначенні ефективного ухилу маслоприймача прийнято, що основний напрям руху потоку масла співпадає з напрямом ухилу у бік маслзбірника.

## **2.5. Теоретичне визначення безпечної величини температури трансформаторного масла**

Як вже зазначалося, сучасні силові трансформатори мають переважно масляне охолодження.

Масло заповнює внутрішній простір бака та витісняє звідти повітря, створюючи електрично міцну ізоляцію. Одночасно масло є гарним переносником тепла, його використовують для охолодження трансформаторів. Однак масло має істотні недоліки, які підвищують пожежну небезпеку трансформаторів, оскільки воно горить, а його пари в суміші з повітрям займаються під дією тепла [101].

Гасіння трансформатора нерозривно пов'язане з охолодженням нагрітих тепловим потоком частин та елементів трансформатора, причому необхідність охолодження металевих частин у кілька разів збільшує потрібний час гасіння порівняно з часом гасіння масла на горизонтальній поверхні [101].

Так, дослідження гасіння силових маслonaповнених трансформаторів викладено в праці [102].

У роботі [103] розглянуто особливості визначення площі розливу турбінного масла, що витікає з отвору напірного маслопроводу у разів аварії в машинному залі енергопідприємства. Зазначається, що розтікання рідини залежить від трьох факторів: витрати, тривалості витоків та в'язкості, а радіус розтікання горючих рідин на горизонтальних поверхнях виражається критеріальним рівнянням (2.26) добутком ступеневих функцій критерію Галілея та критерію гомохронності [104, 105]:

$$\frac{R}{l} = A \cdot G_a^m \cdot H_0^n, \quad (2.26)$$

де:  $R$  – радіус розтікання рідини;

$l$  – визначальний розмір;

$A$  – постійна величина;

$G_a = g \cdot l^3 / \nu^3$  – критерій Галілея ( $g$  – прискорення сили тяжіння,  $\nu$  – кінематична в'язкість);

$H_0 = g \cdot \tau^2 / l$  – перетворений критерій гомохронності ( $\tau$  – тривалість витоків);

$m, n$  – показники ступеню, що визначаються експериментально.

Причому, приводяться рівняння, що описують залежність радіусу розтікання від тривалості витоків, в'язкості, об'єму та витрати горючої рідини (при разовому витоків та безперервному витоків); рівняння витоків рідини із закритої ємності з тиском  $p$  на поверхні рідини до середовища з тиском  $p_0$  через отвір; рівняння витрати рідини, що витікає з отвору.

Зазначається, що витрата турбінного масла при його розливі з маслосистеми змазування й ущільнення валу генератора приймається рівною сумі витрат масла крізь два підшипника та два ущільнення генератора і може складати до 25 л/с; що тривалість витоків масла залежить від часу спрацювання відсічної арматури на маслопроводах і приймається від 1 хв до 5 хв; що для реальних діаметрів маслопроводів відомі відповідні значення надлишкового тиску в трубопроводі (наприклад, для маслопроводу діаметром  $\varnothing 50$  мм надлишковий тиск  $\Delta P$  складає 0,3 МПа).



Приймається, що діаметр отвору чисельно дорівнює діаметру маслопроводу, що і враховано під час проведення експерименту в рамках цієї роботи. А витрата масла, що витікає з отвору в маслопроводі, визначається за формулою (2.27):

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P / \rho}, \quad (2.27)$$

де:  $\mu$  – коефіцієнт витрати отвору;

$S$  – площа перерізу отвору, м<sup>2</sup>;

$\Delta P$  – надлишковий тиск у трубопроводі, Па;

$\rho$  – густина масла, що витікає, кг/м<sup>3</sup>.

Вказано, що значення в'язкості масла буде змінюватися залежно від температури масла. Так, у нормальному режимі масло обертається в турбогенераторі за робочої температури 40 °С ... 50 °С; під час витоку та горіння масла його температура буде значно зростати, відповідно в'язкість буде зменшуватися, що неминуче вплине на збільшення площі його розливу.

Авторами [103] також звернуто увагу, що в роботі [106] побудована математична модель теплового впливу пожежі горючої рідини, що розлилася на залізничну цистерну, в якій зроблено допущення, що, розлив має форму круга відомої площі; при цьому залежність площі розливу, товщини шару і часу горіння від об'єму рідини, що витекла, не розглядаються.

Дослідження проблеми, пов'язаної з аварійними розливами горючих рідин, мало розвиток у праці [107], в якій розглянуто фактори, від яких залежить розлив рідин; проведено аналіз підходів до визначення площі аварійного розливу горючих рідин; особливу увагу приділено розрахунку геометричних розмірів осередку пожежі під час розливу турбінного масла з маслоснаповненого обладнання; вказано на необхідності проведення експериментальних досліджень із розливу та горіння масла на бетонній чи металевій поверхні, що найбільш відповідають умовам експлуатації. Також, наведено інформацію з посиланням на [108] стосовно використання міжнародною лабораторією Fire Technology Laboratory комп'ютерних програм для моделювання пожеж в приміщеннях з

великою пожежною небезпекою (існує два основних типи цих програм; програма першого типу Harvard Fire Code CFC V (пізня версія: First) призначена для моделювання пожежі в одному відсіку). Приведено результати розрахунків для випадку горіння розливу турбінного масла площею  $2 \text{ м}^2$  та  $3 \text{ м}^2$  у нижній частині відсіку об'ємом  $70 \text{ м}^3$ ; описано польові моделі горіння розливання турбінного масла та руху газів. Програма дозволяє розраховувати температурні поля, турбулентну кінетичну енергію, швидкість розсіювання, хімічну концентрацію, інтенсивність випромінювання в трьох координатах.

У роботі [109] проаналізовано параметри, що можуть бути використані під час моделювання процесів горіння турбінного масла; обґрунтована необхідність експериментального визначення питомої масової швидкості вигорання масла залежно від його початкової температури, температури горіння, товщини та площі розливу, а також уточнення величини нижчої теплоти згорання, у т.ч. залежно від терміну його експлуатації. До того ж автори аналізують відомі дані стосовно того, що під час горіння рідин у пальниках різних діаметрів [110] мають місце три динамічні режими з характерними для кожного із них умовами масопереносу речовини та теплообміном з навколишнім середовищем, рідиною та стінками ємності (резервуару). Зазначається, що основними чинниками, що впливають на швидкість вигорання рідини, є матеріал і товщина стінки пальника, висота вільного борту, швидкість обдування та вміст кисню у навколишньому газовому середовищі. При чому, теплообмін між стінкою та рідиною має значення при горінні палива у вузьких пальниках [110]; у цьому випадку на швидкість вигорання значний вплив мають властивості матеріалу, з якого виготовлений пальник. Експерименти, проведені в [111], показали, що швидкість вигорання зменшується зі збільшенням теплопровідності матеріалу стінки; це пояснюється зростанням теплових втрат від стінки у навколишнє середовище. У той же час, при горінні рідин у пальниках великого діаметру вплив цих параметрів на швидкість вигорання незначний [112]. Інтерес також становить залежність швидкості вигорання від рівня заливання рідини. У вузьких пальниках зі збільшенням цього рівня знижується градієнт концентрації горючих парів і

зменшується їх приплив у зону горіння. При цьому знижується температура на поверхні рідини й інтенсивність процесу горіння. Зі збільшенням діаметру вплив рівня заливки рідини суттєво знижується [110]. Вплив вимушеної конвекції на швидкість вигорання рідин у резервуарах вивчався на роботах [111-114]. Швидкість вигорання рідин у резервуарах зростає зі збільшенням швидкості повітряного потоку, що може свідчити про вплив повітрообміну в зоні пожежі на параметри горіння [113-114].

Ці процеси також мають бути враховані під час проведення моделювання процесів горіння масла.

Обґрунтування вихідних даних для моделювання горіння турбінного масла шляхом проведення експериментальних досліджень висвітлено в [115]. Зроблено висновок про те, що використання експериментально отриманих даних щодо його показників пожежної безпеки дозволить забезпечити адекватність моделювання із застосуванням програмного забезпечення FDS за різних сценаріїв аварії.

У праці [116] безпосередньо автором цієї роботи за результатами вивчення процесів виникнення, перебігу та гасіння пожежі, що сталася 29.03.2013 у Світлодарську Донецької області на Вуглегірській тепловій електростанції ПАТ «Центренерго», визначено причини неспрацювання системи пінного пожежогасіння, що захищала маслобаки і кабельні канали машинного залу КТЦ № 1.

У роботі [117] експериментально досліджено показники пожежної безпеки моторних масел, виготовлених на мінеральній, напівсинтетичній і синтетичній основах. Виявлено, що в процесі експлуатації температури спалаху, займання та самозаймання всіх видів масел знижуються від 5 % до 14 %, як наслідок, підвищуючи їх пожежну безпеку.

Зазначене доводить необхідність проведення експериментальних досліджень з метою визначення показників пожежної безпеки трансформаторного масла. Підходи до визначення показників пожежної безпеки горючих рідин за існуючими методами проаналізовано в роботі [118].

Основними показниками [8], що характеризують пожежну безпеку речовин і матеріалів, зокрема для рідин, є група їх горючості та температури

спалаху, займання, самозаймання. З метою конкретизації показників пожежної небезпеки трансформаторного масла Nytro 11GX визначення значень його температур було проведено за методами, встановленими ДСТУ 8829 [119].

Суть методів випробувань із визначення температури спалаху у закритому тиглі, температури спалаху у відкритому тиглі, температури займання полягає у нагріванні певної кількості речовини з заданою швидкістю, періодичному запалюванні парів, що виділяються, та встановленні факту наявності чи відсутності спалаху чи займання за фіксованої температури.

Температура спалаху у закритому (відкритому) тиглі – це найменша температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полуменеве горіння (спалах) над частиною або над всією поверхнею речовини, що триває менше 5 с після його видалення. Температура займання – це найменша температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полуменеве горіння парів рідини, що триває не менше 5 с після його видалення.

Визначення температур спалаху та займання проводиться за середнім арифметичним значенням температур, отриманих на трьох зразках, із поправкою на атмосферний тиск, що розраховується за формулою (2.28).

$$\theta = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - p_a), \quad (2.28)$$

де:  $\theta$  – значення температур спалаху та займання масла, °С;

$T_1, T_2, T_3$  – виміряні значення температур спалаху та займання масла, °С;

$p_a$  – атмосферний тиск, кПа.

Суть методу випробувань із визначення температури самозаймання полягає у введенні визначеного об'єму речовини у нагрітий до певної температури об'єм і встановленні факту наявності чи відсутності самозаймання за фіксованої температури. Випробовування повторюють з різними об'ємами проб та температурами до досягнення мінімальної температури самозаймання.

Температура самозаймання – це найменша температура довкілля, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається самозаймання речовини.

## 2.6. Висновки за другим розділом

Аналіз обставин виникнення пожеж під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях дозволив встановити перелік параметрів, що слід враховувати під час дослідження залежності зниження температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки, а саме:

- висота гравійної засипки;
- ширина гравійної засипки;
- ухил маслоприймача у бік маслозбірника.

Основним критерієм оцінювання ефективності системи обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях обрано температуру масла.

Встановлено, що:

- дослідити процеси тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою можливо за допомогою математичної моделі з використанням рівняння руху та рівняння нерозривності потоку, що описуються системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса та доповнюються математичними моделями, що враховують сукупні явища, зокрема: модель конвективних та радіаційних потоків, модель турбулентності тощо;

- для теоретичного визначення ефективного ухилу маслоприймача у бік маслозбірника можливо застосувати адаптивну формулу для прямокутних каналів.

- визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла доцільніше провести за методами, встановленими ДСТУ 8829 [119], що дозволить обґрунтувати безпечне значення показника прийнятого критерію оцінювання ефективності заходів припинення й обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях.

### РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ВІД ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛОПРИЙМАЧА

#### 3.1. Розроблення комп'ютерної моделі гравійної засипки маслоприймача

Дослідження процесів тепломасообміну трансформаторного масла в маслоприймачі та закономірностей зміни його температури від параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкоджання може бути реалізовано за допомогою математичного моделювання.

Математичні моделі пожеж розливів горючих рідин почали активно розроблятися у середині минулого століття. На сьогодні відомо ряд моделей, розроблених для вирішення окремих завдань пожежної безпеки, в яких формалізуються найбільш суттєві для кожного з них процеси та взаємозв'язки. Як правило, відповідні рішення отримують із використанням різних спрощень і припущень із наступним введенням коригуючих коефіцієнтів, узгоджуючи розрахункові результати з експериментальними даними. Загальним недоліком відомих моделей пожежі розливу горючої рідини є розгляд стаціонарного режиму горіння, що відбувається з постійною швидкістю горіння пожежного навантаження, і відсутність повного опису початкового етапу розвитку пожежі, що становить найбільший інтерес із позицій визначення характеристик системи пожежогасіння.

У факелі пожежі розливу горючої рідини виділяють п'ять основних зон [120]: пароповітряний шар відповідної товщини, зону горіння, що розвивається, зону стійкого горіння, зону переривчастого полум'я, зону висхідних потоків продуктів згорання.

Сучасні комп'ютерні програмні комплекси дозволяють проводити аналіз певних об'ємно-планувальних і конструктивних рішень за допомогою методів математичного моделювання, при цьому їх перевагою порівняно із експериментальними дослідженнями є забезпечення високої збіжності вихідних умов і сталих параметрів їх проведення [121].

Використовуючи математичне моделювання стає можливим дослідити процеси теплопередачі та тепломасопереносу [86-89] із заданими умовами довкілля.

В якості об'єкту для проведення моделювання теплових процесів теплообміну між трансформаторним маслом і гравійною засипкою маслоприймача обрано типовий вогнезагороджувач [122], в якості якого використовується маслосбірник із металевою решіткою, поверх якої насипано шар щебеню. Маслоприймач являє собою бетонну площадку. Дно маслоприймача повинно мати ухил, не менше 0,005 м/м, у бік приямка та бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 250 мм [56].

Вирішення основної задачі моделювання полягає в тому, що маючи початкову температуру трансформаторного масла на вході у вогнезагороджувач у 250 °С необхідно визначити такі мінімальні геометричні параметри гравійної засипки, які забезпечують відсутність його горіння й охолодження нижче за температуру спалаху у 150 °С. При цьому слід врахувати параметри, що впливають на зміну температури трансформаторного масла в маслоприймачі, та те, що температура щебеню буде зростати, а його властивість відбирати тепло у масла буде зменшуватися.

Дослідження процесу теплообміну між трансформаторним маслом і гравійною засипкою маслоприймача проводилося за допомогою програмного комплексу FlowVision версії 2.5.4 [122], що призначений для моделювання тривимірних потоків рідини та газу в технічних і природних об'єктах, а також візуалізації цих потоків методами комп'ютерної графіки. Моделюємі потоки включають в себе стаціонарні та нестаціонарні, стисливі, слабостисливі і нестисливі потоки рідини та газу, а використання різних моделей турбулентності й адаптивної розрахункової сітки дозволяє моделювати складні рухи рідини, включаючи потоки з сильною закруткою, горінням, потоки з довільною поверхнею. Програмний комплекс заснований на кінцево-об'ємному методі рішення рівнянь гідродинаміки та використовує прямокутну адаптивну сітку з

локальним подрібненням. Для апроксимації криволінійної геометрії з підвищеною точністю використовується технологія підсіткової роздільної здатності. Ця технологія дозволяє імпортувати геометрію з системи автоматизації проектування й обмінюватися інформацією з системами кінцево-елементного аналізу. Використання цієї технології дозволило вирішити проблему автоматичної генерації сітки (щоб згенерувати сітку, досить задати всього лише кілька параметрів, після чого сітка автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якого ступеня складності).

Як правило, чисельне інтегрування рівнянь за просторовими координатами проводять із використанням прямокутної, адаптивної, локально подрібненої сітки. Такий підхід уможливорює використання простої рівномірної неадаптивної сітки під час виконання завдань із порівняно нескладною геометрією. Між точністю розрахунку та кількістю розрахункових комірок існує прямо пропорційна залежність, а між кількістю комірок і часом, за який буде проведений розрахунок, – обернено пропорційна; необхідно обирати баланс між необхідною точністю розрахунку та часом, що буде витрачений на проведення розрахунку [124]. У цій роботі для досягнення необхідної точності розрахунку використано прямокутну адаптивну сітку з локальним подрібненням комірками середнім кроком 0,2 м кубічним розміром по трьом просторовим вимірам ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Обґрунтування розміру комірки розрахункової схеми здійснено методом дихотомії [125].

Математична модель максимально наближена до геометричних і конструктивних параметрів маслоприймача та властивостей гравійної засипки і матеріалів маслоприймача.

Під час моделювання було зроблено припущення, що щебінь має однотипний розмір у ширину  $\approx 35$  мм та варіативний повздовжній розмір в інтервалі 35-70 мм. Варіація кута розташування відбувається тільки у горизонтальній площині. З метою зменшення часу проведення розрахунків ширину вогнезагороджувача обмежено 500 мм, враховуючи, що під час розливу масла процес його проходження гравійною засипкою – є лінійним.



Розрахункову схему розташування щебеню у маслозбірнику, що наглядно демонструє його розміщення із заданими геометричними параметрами у просторі, наведено на рисунку 3.1

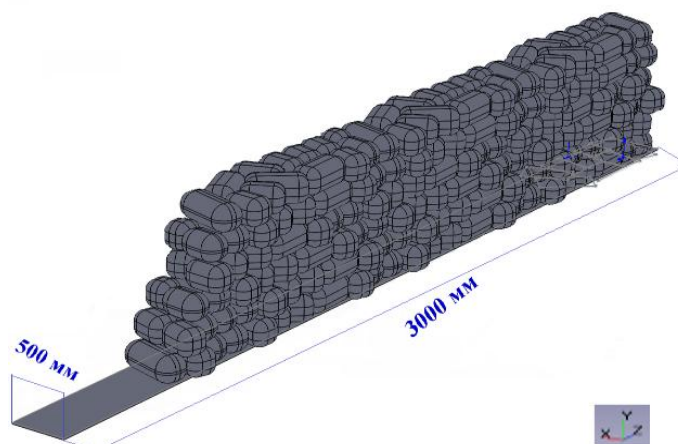


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема розташування щебеню у маслозбірнику

Основні рівняння доповнюються математичними моделями, що враховують сукупні явища, зокрема: модель конвективних та радіаційних потоків, модель турбулентності тощо. Під час апроксимації диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса використано метод кінцевих різниць із їх розв'язком за явною схемою «предиктор-коректор» другого порядку інтегруванням по температурі.

Як необхідну умову збіжності явного чисельного розв'язку диференціальних рівнянь із частковими похідними методом кінцевих різниць застосовано критерій Куранта-Фрідрікса-Леві [126].

У разі загоряння трансформаторного масла під час його проходження через вогнезагороджувач прийнято, що горінні відбувається на всій його поверхні, як це зазначено в роботі Кілімніка О.В. [127], де під час розрахунків за методикою визначення пожежного ризику на промислових об'єктах для оцінювання кількості небезпечних речовин, які беруть участь у створенні чинника ураження (теплового випромінювання), було припущено, що при пожежі розливу масла бере участь у горінні вся маса рідкої фази маслоприймача електрообладнання, яка надходить на поверхню.

Геометричну схему розрахункової області (загальну й окрему для кожної області) під час проведення моделювання процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач наведено на рисунку 3.2.

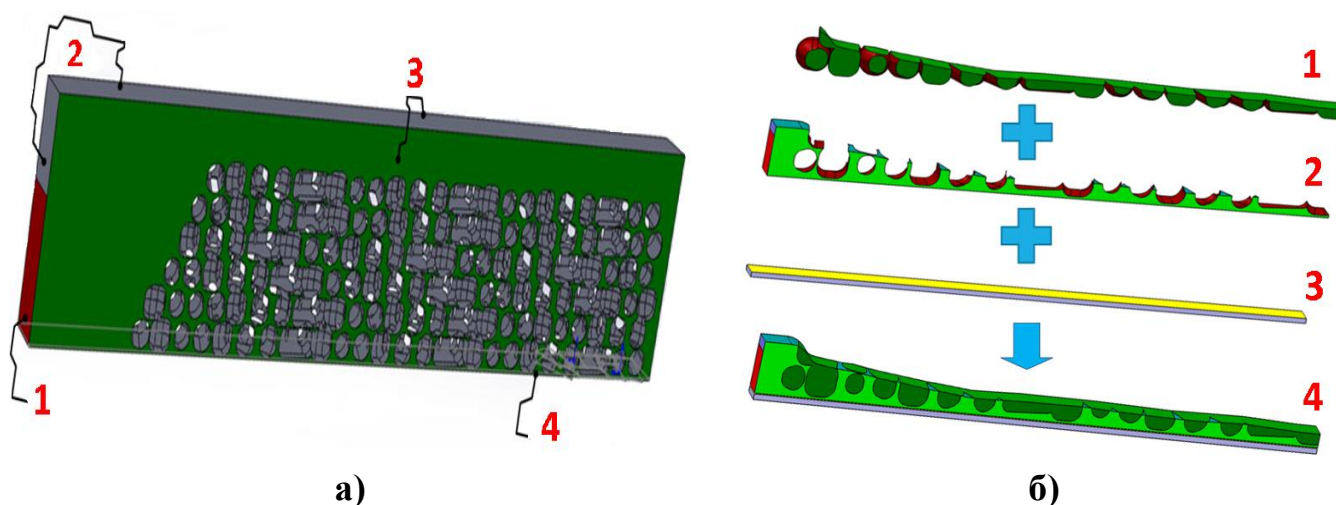


Рисунок 3.2 – Геометрична схема розрахункової області та її складові частини:  
**а) загальна схема розрахункової області:**  
 1) вхід масла зі сталою швидкістю 0,014 м/с;  
 2) стінка з проковзуванням; 3) симетрія;  
 4) вільний вихід масла  
**б) складові частини розрахункової області:**  
 1) область щебеню, що обтікається маслом;  
 2) область течії масла; 3) бетонна основа лотоку;  
 4) загальна розрахункова область

Під час проведення розрахунків процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач на першому етапі встановлено основні компоненти математичної моделі, перелік яких наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні компоненти математичної моделі процесу теплообміну між трансформаторним маслом та гравійною засипкою маслоприймача

| Складові математичної моделі                     | Особливості реалізації                       |
|--|--|
| Основна математична модель                       | Система диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса |
| Тип середовища                                   | Нестислива рідина                            |
| Модель турбулентності                            | Стандартна « <i>k-ε</i> » модель             |
| Метод чисельної апроксимації                     | Метод кінцевих різниць з адаптивною сіткою   |
| Критерій автоматичного вибору кроку інтегрування | Критерій Куранта-Фрідрікса-Леві              |
| Схема інтегрування                               | Явна схема                                   |

Для проведення моделювання процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач прийнято фізичні властивості масла та початкові умови, що наведено у таблиці 3.2 за нормальних умов навколишнього середовища.

Таблиця 3.2 – Фізичні властивості масла та початкові умови моделювання

| Фізичні властивості масла                            |       |
|--|-------|
| Динамічна в'язкість ( $\mu$ ), Па с                  | 0,001 |
| Густина ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>                | 870   |
| Поверхневий натяг ( $\eta$ ), мН/м                   | 30    |
| Теплофізичні властивості масла                       |       |
| Коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda$ ), Вт/(м·°C) | 0,11  |
| Питома теплоємність ( $C_p$ ), Дж/(кг·°C)            | 1680  |
| Початкова температура масла ( $T_0$ ), °C            | 20    |

Окремо обрані теплофізичні властивості породи щебеню (граніту) та основи лотку (бетону) наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Теплофізичні властивості граніту та бетону

| Теплофізичні властивості граніту                     |      |
|--|------|
| Коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda$ ), Вт/(м·°C) | 2    |
| Питома теплоємність ( $C_p$ ), Дж/(кг·°C)            | 850  |
| Густина ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>                | 2600 |
| Теплофізичні властивості бетону                      |      |
| Коефіцієнт теплопровідності ( $\lambda$ ), Вт/(м·°C) | 1,6  |
| Питома теплоємність ( $C_p$ ), Дж/(кг·°C)            | 950  |
| Густина ( $\rho$ ), кг/м <sup>3</sup>                | 2500 |

Для порівняння, у навчальному посібнику [128] наведено довідкові дані по теплопровідності та теплоємності бетону разом зі щебенем, що складають  $\lambda = 1,28 \text{ Вт/(м·К)}$  і  $C_p = 0,84 \text{ кДж/(кг·К)}$  відповідно.

### **3.2. Результати розрахунків щодо зміни температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик маслоприймача**

Розрахунок процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач проводився у 2 етапи.

На першому етапі визначалася геометрична форма потоку масла крізь гравійну засипку (теплообмін між щебенем і маслом відсутній). На другому етапі проводився розрахунок температурного розподілу у потоці масла крізь гравійну засипку (теплообмін між щебенем і маслом враховувався).

Сіткову модель області проведення моделювання процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач на I-му етапі наведено на рисунку 3.3.

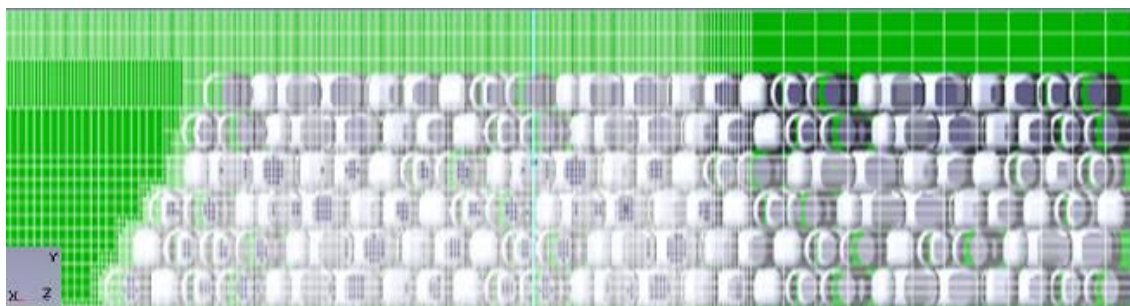


Рисунок 3.3 – Сіткова модель області проведення розрахунків на I-му етапі моделювання

Результати першого етапу розрахунку процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач графічно зображено на рисунку 3.4.

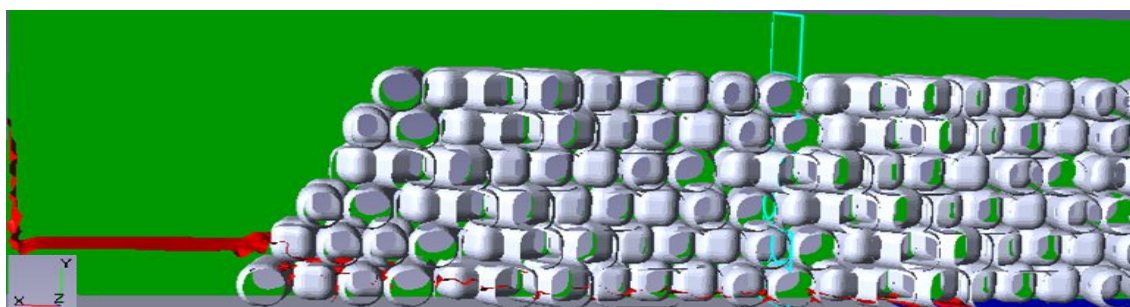


Рисунок 3.4 – Графічне зображення результату I-го етапу розрахунку  
Граничні умови процесу протікання трансформаторного масла через вогнезагороджувач наведено на рисунку 3.5.

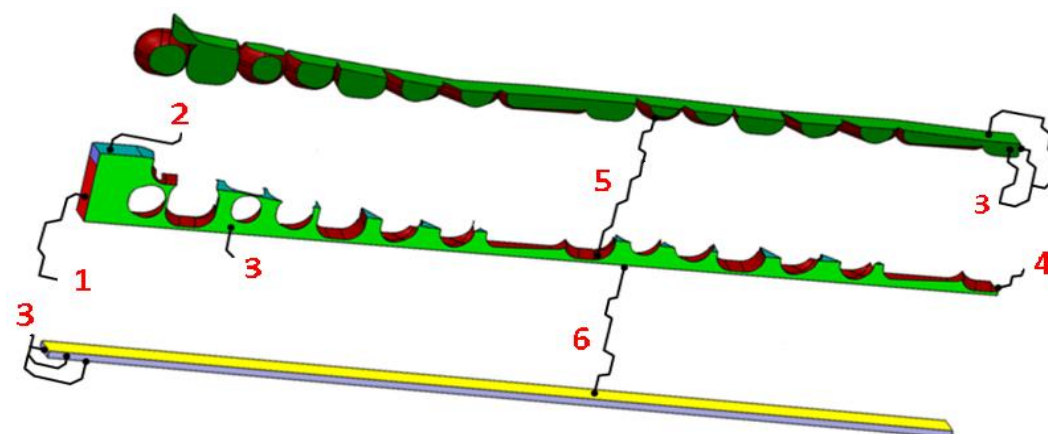


Рисунок 3.5 – Граничні умови процесу протікання трансформаторного масла:  
1) вхід масла; 2) стінка з проковзуванням; 3) симетрія; 4) вільний вихід масла;  
5) спряжені граничні умови між щебенем і маслом; 6) спряжені граничні умови між бетоном і маслом

Сіткову модель області проведення моделювання процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач на II-му етапі наведено на рисунку 3.6.

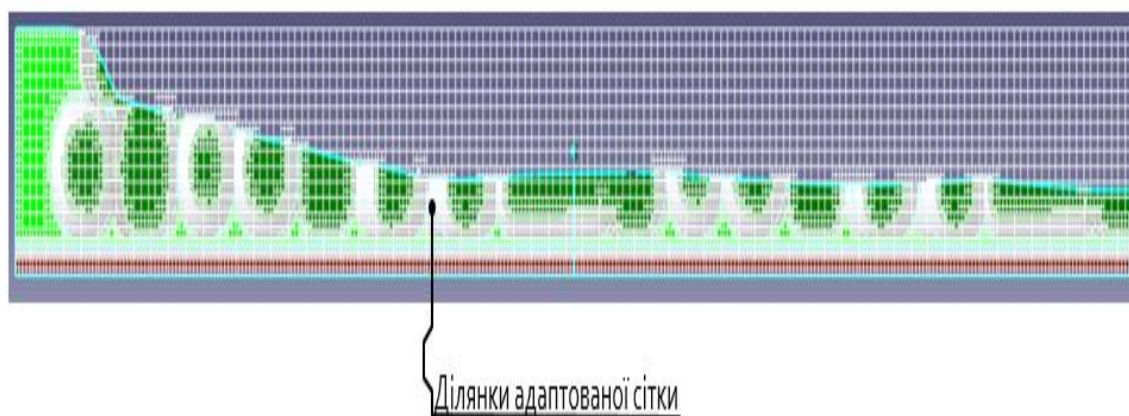


Рисунок 3.6 – Сіткова модель області проведення розрахунків на II-му етапі моделювання

Результати II-го етапу розрахунку процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач графічно зображено на рисунку 3.7.

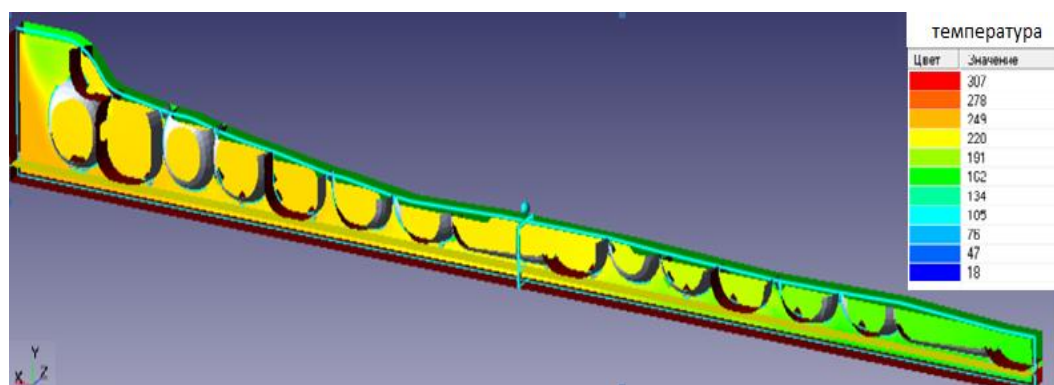


Рисунок 3.7 – Графічне зображення результату II-го етапу розрахунку

Графік розподілу температури трансформаторного масла у розрахунковій області наведено на рисунку 3.8.

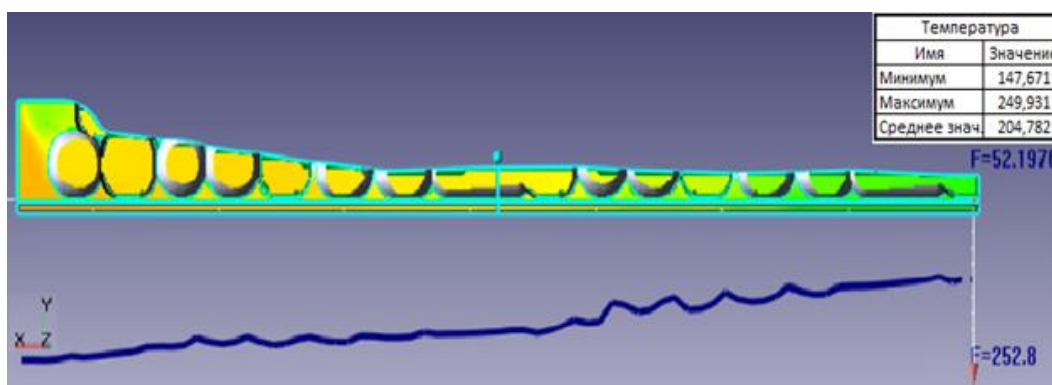


Рисунок 3.8 – Розподіл температури трансформаторного масла у розрахунковій області

За результатами математичного моделювання встановлено [85], що трансформаторне масло температурою у 250 °С на вході в шар гравійної засипки маслоприймача при проходженні через вогнезагороджувач з геометричними розмірами 1500 мм × 250 мм охолоджується до температури 148 °С.

### 3.3. Визначення залежності зниження температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки

Для визначення залежності зниження температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції проведено повний факторний обчислювальний експеримент.

Повним факторним експериментом називається такий експеримент, при реалізації якого визначається значення параметра оптимізації при всіх можливих поєднаннях рівнів варіювання факторів. Якщо ми маємо справу з  $k$  факторами, кожен з яких може встановлюватися на  $q$  рівнях, то для того, щоб здійснити повний факторний експеримент необхідно поставити  $n = q^k$  дослідів [129-133].

Найбільшого поширення набули експерименти, в яких фактори варіюються на двох рівнях, тобто експерименти типу  $2^k$ . Планування, проведення та обробка результатів складається з таких етапів: вибір залежних і незалежних змінних (факторів); кодування незалежних (вхідних) чинників; складання план-матриці експерименту; рандомізація дослідів (їх реалізація у випадковому порядку);

реалізація плану експерименту; розрахунок і оцінка значимості коефіцієнтів моделі; перевірка адекватності отриманої моделі.

Зокрема у виданні [134] розглядаються сучасні математичні методи планування й аналізу експерименту, що вже застосовуються на різних стадіях науково-дослідних робіт у легкій та текстильній промисловості (психологічний експеримент, факторне планування, метод випадкового балансу, метод крутого сходження, симплекс-планування, ортогональне та ротатабельне планування другого порядку), а також раніше взагалі не використовувалися при дослідженні в зазначених галузях (планування третього порядку, D-оптимальні плани, методи системного аналізу при виборі напряму досліджень, інші).

У сфері пожежної безпеки у роботі [135] на прикладі обґрунтування параметрів флегматизування азотом горючого газового середовища представлено розроблену методику, що поєднує елементи експериментальних досліджень і розрахунків у співвідношенні достатньому для одержання достовірних результатів за порівняно невеликих працевтрат, із застосуванням числових методів [129] у запропонованій математичній моделі.

У роботі [136] з використанням методу факторного експерименту отримано математичну модель визначення категорій промислових приміщень за вибухопожежною та пожежною небезпекою для фарбоприготувальної дільниці, що дозволяє оцінити вплив різних факторів на значення розрахункового надлишкового тиску вибуху  $\Delta P$  стехіометричної пароповітряної суміші у замкнутому об'ємі.

У роботі [137] використані методи планування експерименту (факторного експерименту, факторного аналізу), за допомогою яких отримано математичні моделі впливу відношення  $\gamma$  між вихідними концентраціями донора  $C_0^a$  й акцептора  $C_0^b$  протона,  $K$  і  $C_0^a$  на відносну похибку  $\varepsilon_K$  константи рівноваги  $K$ -процесу утворення комплексів з водневим зв'язком за відсутності самоасоціації донора протона.

Багатофакторний аналіз, предметом якого було підприємство електричних мереж, застосовувався в праці [138] для попереднього проєктного вибору

альтернативних варіантів обладнання когенераційних теплоелектростанцій та оцінювання їх інвестиційної привабливості.

Для проведення повного факторного обчислювального експерименту попередньо було визначено такі параметри: ширина гравійної засипки ( $d$ ), висота гравійної засипки ( $h$ ), ухил маслоприймача у бік маслозбірника ( $i$ ). Інтервали показників визначених параметрів варіювали для ширини гравійної засипки від 500 мм до 2000 мм; для висоти гравійної засипки від 150 мм до 450 мм; для ухилу маслоприймача від 0,005 м/м до 0,05 м/м.

Тип регресійної залежності зниження температури трансформаторного масла від ширини гравійної засипки, висоти гравійної засипки й ухилу маслоприймача має вигляд рівняння (3.1):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (3.1)$$

де:  $x_1, x_2, x_3$  – показники, що враховують обрані параметри;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – константи рівняння числової регресії.

Для визначення констант рівняння числової регресії проведено вісім чисельних експериментів за складеною для цього матрицею планування, наведеною у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Матриця планування повнофакторного експерименту для побудови математичної моделі

| № експерименту | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1, x_2$ | $x_1, x_3$ | $x_2, x_3$ | $x_1, x_2, x_3$ |
|----------------|-------|-------|-------|------------|------------|------------|-----------------|
| 1              | +     | +     | +     | +          | +          | +          | +               |
| 2              | -     | +     | +     | -          | -          | +          | -               |
| 3              | +     | -     | +     | -          | +          | -          | -               |
| 4              | -     | -     | +     | +          | -          | -          | +               |
| 5              | +     | +     | -     | +          | -          | -          | -               |
| 6              | -     | +     | -     | -          | +          | -          | +               |
| 7              | +     | -     | -     | -          | -          | +          | +               |
| 8              | -     | -     | -     | +          | +          | +          | -               |

Таким чином, за допомогою попередньо розробленої комп'ютерної моделі для кожного експерименту розраховано значення температур трансформаторного



масла у місці зливу в аварійну ємкість залежно від геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції для всіх обраних значущих параметрів і проектних сценаріїв пожежі розливу масла, що наведені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Розрахункові значення температур трансформаторного масла залежно від геометричних параметрів гравійної засипки

| Номер експерименту                              | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Значення температур трансформаторного масла, °C | 98 | 169 | 193 | 229 | 241 | 248 | 108 | 250 |

Використовуючи отримані дані та формули (3.2), визначено константи рівняння числової регресії, що наведені у таблиці 3.6.

$$\begin{aligned}
 b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i; & b_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d \cdot \theta_i; & b_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h \cdot \theta_i; \\
 b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i \cdot \theta_i; & b_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dh \cdot \theta_i; & b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N di \cdot \theta_i; \\
 b_6 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N hi \cdot \theta_i; & b_7 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dhi \cdot \theta_i,
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

де:  $N = 8$  – кількість проектних сценаріїв згідно з планом експерименту;

$d, h, i$  – значення параметрів згідно з матрицею планування (табл. 3.4);

$\theta$  – значення температури трансформаторного масла (табл. 3.5).

Таблиця 3.6 – Константи рівняння числової регресії

| Коефіцієнт | $b_0$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$  | $b_4$                | $b_5$ | $b_6$ | $b_7$                |
|------------|-------|-------|-------|--------|----------------------|-------|-------|----------------------|
| Значення   | 333,8 | -0,16 | -0,21 | -847,8 | $-3,9 \cdot 10^{-4}$ | 2,52  | -0,1  | $-8,4 \cdot 10^{-3}$ |

Таким чином, за результатами чисельного експерименту з використанням запропонованих математичних моделей уперше встановлено, що залежність температури охолодження трансформаторного масла, що горить, у маслоприймачі від ширини ( $d$ ), висоти ( $h$ ) гравійної засипки та ухилу ( $i$ ) має вигляд рівняння (3.3):

$$\theta = 333,8 - 0,16d - 0,21h - 847,8i + 0,00039dh + 2,52di - 0,1hi - 0,0084dhi \tag{3.3}$$

### 3.4. Визначення ефективного ухилу маслоприймача

Для обґрунтування необхідного значення ухилу маслоприймача слід розв'язати гідродинамічну задачу та визначити параметри, що забезпечать проходження необхідної витрати рідини без її накопичення на поверхні гравію через місцеві гідравлічні втрати, спричинені наявністю гравійної засипки системи вогнеперешкоджання.

Для проведення гідродинамічного розрахунку взято параметри дослідного стенду [139] для імітації аварійної ситуації у трансформаторі та моделювання його розгерметизацію з подальшим виливом масла у маслоприймач.

Під час проведення розрахунків необхідного ухилу, критичним параметром є забезпечення умов, коли значення витрати зливу трансформаторного масла з маслоприймача до ємкості збору масла є не меншим за витрату виливу із ємкості яка імітує корпус трансформатора.

Методологія розрахунку наступна. Початковий об'єм ємкості ( $W_1$ ), що імітує корпус трансформатора є 1000 л, а тривалість проведення експерименту ( $t$ ) не повинна перевищувати 15 хв, що відповідає критеріям визначеним у [56]. Слід враховувати, що під час проведення експерименту трансформаторне масло нагрівають від 20 °C ( $t_1$ ) до значення 250 °C ( $t_2$ ), тобто значення різниці ( $\Delta t$ ) складатиме 230 °C.

Коефіцієнт теплового розширення трансформаторного масла згідно з даними [140] складатиме  $\beta = 0,000662 \text{ 1/град}$ . Таким чином, фактичний об'єм нагрітого до 250 °C трансформаторного масла ( $W_2$ ) складатиме 1,15 м<sup>3</sup> (3.4):

$$W_2 = W_1(1 + \beta \cdot \Delta t) = 1,15 \text{ м}^3 \quad (3.4)$$

Після відкриття шарового крану масло потрапляє в лоток, відділений переливною перегородкою, та заповнює його першу частину. Слід розуміти, що після відкриття засувки потік масла не є вільним і заповнює об'єм лотку до перегородки ( $W_3$ ), що складатиме згідно з геометричними параметрами стенду 0,44 м<sup>3</sup>. Після заповнення об'єму лотку значення напору буде змінним, а

залишок масла в об'ємі ємкості, що імітує корпус трансформатора ( $W_4$ ) складає  $0,71 \text{ м}^3$ .

Знаючи геометричні параметри корпусу ємкості, визначимо фактичний напір трансформаторного масла ( $H$ ), враховуючи його залишковий об'єм ( $W_4$ ) в ємкості, за формулою (3.5):

$$H = \frac{4W_4}{\pi \cdot D^2} = 0,628 \text{ м} \quad (3.5)$$

З врахуванням висотної схеми розміщення ємкості (0,2 м) над рівнем корпусу приймального лотку, повний напір на вході в патрубок ( $H_n$ ) складатиме 0,83 м.

Визначимо напір масла ( $H$ ) на виході з патрубку з урахуванням місцевих опорів у трубопроводі, його довжини, діаметру, а також запірної арматури, що дозволить визначити фактичну витрату масла, з якою заповнюватиметься лоток (3.6):

$$H = \frac{V^2}{2 \cdot g} \left( 1 + \lambda \frac{l}{d} + \xi \right) \quad (3.6)$$

або через значення витрати (3.7):

$$H = \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot \omega_{mp}^2} \left( 1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right), \quad (3.7)$$

де:  $V$  – швидкість потоку;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$l$  – довжина труби;

$d$  – діаметр труби;

$\omega_{mp}$  – площа перерізу труби;

$\sum \xi$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів у трубопроводі (4,88) [141]:

$\xi$  – входу в трубу (0,5);

$\xi$  – коліна (1,19) на два повороти;

$\xi$  – вентиля (2,0);

$Q$  – фактична витрата;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя (для сталеві електрозварної труби  $\text{Ø } 50 \text{ мм } \lambda = 0,048$  [142]).

Виходячи із формули (3.7), значення витрати ( $Q$ ) на початок переливу складатиме 3 л/с, а на момент опорожнення ємкості, що імітує корпус трансформатора, ( $Q_k$ ) 0,4 л/с. Середнє значення витрати з трубопроводу складатиме 1,5-1,7 л/с. Таким чином, під час визначення необхідного ухилу лотку, керуємося критерієм фактичної витрати ( $Q$ ), що після проходження трансформаторного масла крізь шар гравійної засипки не повинна бути меншою за 3 л/с. Відповідно до даних [142] коефіцієнт зменшення значення витрати під час проходження рідин крізь гравій з фракцією 40-70 мм складатиме  $\vartheta = 3$ .

Мінімально необхідний ухил для прямокутних каналів з врахуванням [100] визначимо за адаптивною формулою (3.8):

$$i = \frac{\lambda(a+b)}{2ab} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\varphi^{0,72}}{n_c}, \quad (3.8)$$

де:  $i$  – гідравлічний ухил;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;

$n_c$  – шорсткість стінок;

$a, b$  – геометричні параметри лотку;

$\varphi$  – коефіцієнт переливу;

$g$  – прискорення вільного падіння;

$v$  – середня швидкість потоку.

Виходячи із приведеної формули, найбільш раціональним ухилом лотку дослідного стенду, що забезпечуватиме витрату трансформаторного масла 3 л/с крізь шар гравійної засипки, має становити не менше ніж 0,045 м/м.

Результати проведених розрахунків для перевірки отриманих параметрів, перевірені під час експериментальних досліджень.

Для регулювання ухилу маслоприймача використовувався звичайний автомобільний домкрат (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Регулювання ухилу маслоприймача автомобільним домкратом

Змінюючи значення ухилу маслоприймача у бік маслозбірника візуально спостерігалось горіння масла на поверхні гравійної засипки або його відсутність, як це зображено на рисунку 3.10.

Ухил 0,005 м/м



Ухил 0,05 м/м



Рисунок 3.10 – Зображення дослідного стенду під час визначення ефективного значення ухилу маслоприймача у бік маслозбірника

Враховуючи геометричні параметри маслоприймача, а саме прямокутний переріз і бетонне дно, та враховуючи необхідну кількісну витрату ( $Q$ ) та ширину

лотку ( $d$ ), визначено мінімально необхідний ухил для таких умов, який варіює у межах від 0,045 м/м до 0,05 м/м (рисунок 3.11).

### Значення витрати масла,

$Q$  л/с



Рисунок 3.11 – Залежність витрати трансформаторного масла під час проходження гравійною засипкою від ухилу маслоприймача

Такий ухил забезпечує:

- ефективне відведення масла в аварійну ємкість упродовж нормативного часу (швидкість проходження масла крізь гравійну засипку становить 0,4...0,5 м/с);

- відсутність утворення шару масла на поверхні гравійної засипки та, як наслідок, його повторне займання;

- зменшення площі можливої пожежі у 2,5 рази за даних умов моделювання.

За результатами проведених розрахунків підтверджено, що ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника має становити 0,05 м/м.

### 3.5. Висновки за третім розділом

У результаті проведених досліджень побудовано математичну модель, що дозволяє дослідити процеси теплообміну між трансформаторним маслом і гравійною засипкою маслоприймача трансформаторної підстанції, а також закономірності зниження його температури залежно від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

Встановлено, що зниження температури масла від 250 °С до 150 °С забезпечують мінімальні розміри гравійної засипки шириною 1500 мм і висотою 250 мм; при цьому, ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника становить 0,05 м/м.

За результатами проведеного повного факторного обчислювального експерименту для найбільш значущих параметрів із використанням запропонованих математичних моделей отримано залежність температури охолодження трансформаторного масла, що горить, у маслоприймачі від ширини ( $d$ ), висоти ( $h$ ) гравійної засипки та ухилу ( $i$ ), що має вигляд:

$$\theta = 333,8 - 0,16d - 0,21h - 847,8i + 0,00039dh + 2,52di - 0,1hi - 0,0084dhi$$

Розрахунки, проведені за розробленою математичною моделлю, реалізованою із застосуванням програмного комплексу FlowVision, свідчать про ефективність вогнезагороджувача із визначеними мінімальними геометричними параметрами гравійної засипки, що забезпечують відсутність горіння трансформаторного масла та його охолодження, але в подальшому потребують підтвердження шляхом проведення відповідних експериментальних досліджень, результати яких наведено в розділі 4.

## РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МІНІМАЛЬНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГРАВІЙНОЇ ЗАСИПКИ МАСЛОПРИЙМАЧА

### 4.1. Розроблення методики експериментальних досліджень

*Правилами улаштування електроустановок* [56] передбачено, що для запобігання розтіканню масла і поширенню пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів з кількістю масла понад 1 т в одиниці (в 1-му баку) потрібно застосовувати маслоприймачі з відведенням масла масловідводами в маслозбірники. Дно маслоприймача повинно мати ухил, не менше 0,005 м/м, у бік приямка та бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 250 мм.

Разом із тим, гравійна засипка внаслідок впливу оточуючого середовища постійно забруднюється, чим погіршує свою пропускну й охолоджувальну здатність; це зумовлює його періодичне збирання, промивання, сушку, засипку, що є трудомістким й економічно затратним. Передбачений ухил в 0,005 м/м у бік маслоприймача, що відповідає значенню 5 мм висоти на 1 м довжини, не може, навіть, задовольнити вимог ДБН В.2.5-74 [65] щодо забезпечення відводу дощових вод і води, що утворюватиметься під час танення снігу.

*Правилами улаштування електроустановок* [56] дозволяється не засипати дно маслоприймачів по всій площі гравієм, але не вказані геометричні параметри таких відхилень. Тому, унормовані конструктивні та геометричні параметри маслоприймачів з відведенням масла масловідводами можуть бути предметом для їх удосконалення.

Тож, для обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції, як підґрунтя для підвищення ефективності припинення й обмеження поширення пожежі системою вогнеперешкоджання, необхідно розробити методику експериментальних досліджень.



Основні положення методики експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції висвітлено у праці [143].

Кінцева мета дослідження полягала у виявленні закономірностей зміни температури трансформаторного масла від параметрів і характеристик маслоприймача, що має виконувати функцію вогнезагороджувача й охолодження масла нижче температури спалаху.

Під час розроблення методики експериментальних досліджень необхідно було:

- визначити тип і кількість необхідного обладнання та засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);
- визначити конструкцію та місце розташування дослідного стенду;
- встановити необхідну кількість трансформаторного масла й об'єм щебеню;
- обґрунтувати порядок проведення експериментальних досліджень впливу геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі на зміну температури трансформаторного масла;
- обґрунтувати діапазон зміни значень температури трансформаторного масла.

Сутність експериментальних досліджень полягала у виявленні закономірностей зниження температури горіння трансформаторного масла до температури нижче температури спалаху в залежності від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача під час зливання масла в аварійну ємність (маслозбірник).

#### *Місце проведення експериментальних досліджень*

Місцем проведення досліджень обрано пожежно-випробувальний полігон Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (с. Дмитрівка, Бучанського району, Київської області).

#### *Умови навколишнього середовища*

- температура:  $(20 \pm 10)$  °С;
- відносна вологість повітря: від 45 % до 90 %;
- атмосферний тиск: від 84 кПа до 106 кПа.

### Обладнання для проведення експериментальних досліджень

Під час експериментальних дослідження використовують обладнання, що включає: дослідний стенд, засоби вимірювальної техніки, прилад для проведення фото- та відеозйомок.

Схему дослідного стенду наведено на рисунку 4.1.

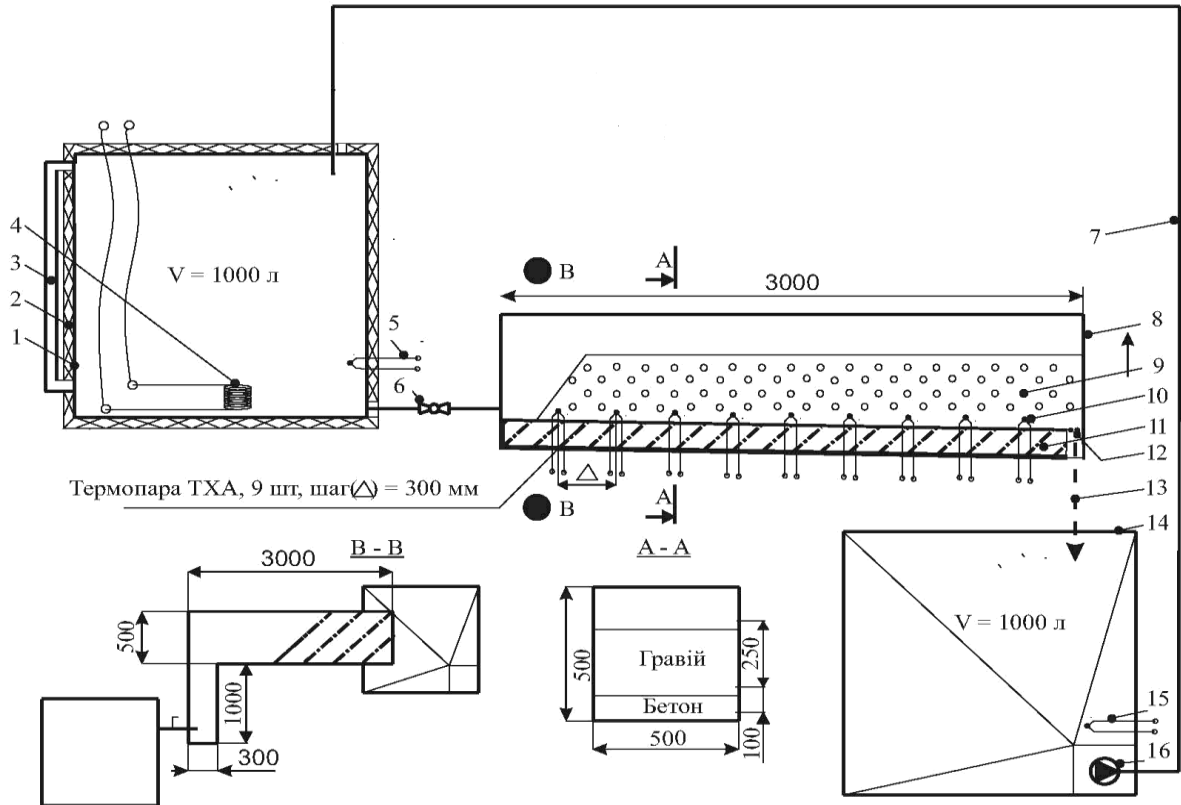


Рисунок 4.1 – Схема дослідного стенду:

- 1 – корпус ємкості для масла; 2 – теплоізоляція;  
 3 – кварцова трубка для візуального контролю рівня масла; 4 – ТЕН; 5 – термопара;  
 6 – шаровий кран; 7 – з'єднувальна арматура; 8 – корпус маслоприймача; 9 – гравійна засипка;  
 10 – термопари; 11 – бетон; 12 – сітка; 13 – траєкторія зливання масла в аварійну ємкість;  
 14 – корпус аварійної ємкості; 15 – термопара; 16 – шестеренчастий насос

Ємкість, що імітує трансформатор (1), об'ємом  $1 \text{ м}^3$  розмірами  $1000 \text{ мм} \times 1000 \text{ мм} \times 1000 \text{ мм}$  виготовляють із листової сталі марки Ст. 3 товщиною 2 мм. Об'єм ємкості прийнятий із умови наповнення її маслом у кількості 1000 л із відповідним запасом, що перешкоджає розливу масла під час його нагрівання. У нижній частині ємкості розміщують ТЕН (4) для підігріву масла до температури понад  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  з метою імітації аварійної ситуації у трансформаторі та термопару (5) для контролю температури масла. З метою зменшення втрат температури в

навколишнє середовище ємкість (1) ззовні по периметру опоряджена мінеральною ватою (2) товщиною 100 мм. У нижній частині бокової стінки ємкості (1) розміщений аварійний отвір  $\varnothing 50$  мм, діаметр якого обґрунтований за результатами аналізу статистичних даних аварійних ситуацій на трансформаторних підстанціях із урахуванням відповідного запасу, що дозволяє створити більш жорсткі умови під час експериментального дослідження.

Маслоприймач (8) із гравійною засипкою (9) виготовлено із листової сталі марки Ст. 3 товщиною 2 мм габаритними розмірами 3000 мм  $\times$  500 мм  $\times$  500 мм основної частини та 1000 мм  $\times$  300 мм допоміжної частини. З метою зменшення втрат температури в навколишнє середовище маслоприймач (8) ззовні по периметру опоряджено мінеральною ватою товщиною 100 мм. На дні маслоприймача робиться бетонна стяжка (11) товщиною 100 мм, а з боку витoku масла – щілинний отвір розміром 50 мм  $\times$  500 мм. Для потрапляння масла у маслоприймач (8) у нижній частині його бічної стінки розміщено отвір діаметром  $\varnothing 50$  мм. У маслоприймачі в якості вогнезагороджувача розміщено гранітний щебінь (9) розмірами від 30 мм до 70 мм (розміри засипки гравійного щебеню визначено шляхом проведення попереднього моделювання). Щебінь засипається по всій ширині маслоприймача на висоту 250 мм та довжину 2400 мм від краю отвору зливу масла в аварійну ємкість (14). З метою забезпечення проходження масла через вогнезагороджувач (12) до отвору зливу масла в аварійну ємкість (14) маслоприймач має ухил 0,005 м/м відносно горизонту у бік зазначеного отвору. Для контролю температури масла під час його проходження через вогнезагороджувач в ньому рівномірно (із кроком не більше ніж 300 мм), починаючи від місця, де масло потрапляє до гравійної засипки, та до отвору зливу масла в аварійну ємкість (14) розміщено термopари (10). З метою не потрапляння щебеню до отвору зливу масла в аварійну ємкість (14) верхню частину отвору оснащують сіткою (12) із розмірами чарунок не більше ніж 20 мм  $\times$  20 мм.

Система з'єднувальної арматури (6, 7) імітує вилив масла із трансформатора (1) до маслоприймача (8) та відведення масла із маслоприймача до аварійної ємкості (14). Система з'єднувальної арматури складається із металевого

трубопроводу із внутрішнім діаметром труби  $\varnothing 50$  мм, шарового крану (6), металевого трубопроводу (7) із внутрішнім діаметром труби  $\varnothing 100$  мм, шестеренчастого насосу (16). З метою зменшення втрат температури в навколишнє середовище систему з'єднувальної арматури ззовні по периметру опоряджено мінеральною ватою товщиною 100 мм.

Аварійна ємкість (14) об'ємом 1000 л. По периметру ємкості для унеможливлення розливу масла на відстані 1,5 м влаштовується обвалування. Обвалування виконується наступним чином. З внутрішньої сторони до ємкості з маслом виконується траншея глибиною до 610 мм та шириною до 610 мм, ззовні по відношенню до ємкості за траншеєю робиться насип висотою до 300 мм.

Проведення експериментальних досліджень забезпечувалося засобами вимірювальної техніки, характеристики яких наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики засобів вимірювальної техніки

| № з/п | Найменування ЗВТ                              | Призначення ЗВТ                                 |  |
|-------|---|---|--|
|       |   | діапазон вимірювання                            | клас точності ЗВТ, невизначеність / похибка  |
| 1     | Анемометр цифровий AR856                      | вимірювання швидкості вітру                     |  |
|       |   | від 0,3 м/с до 45 м/с                           | $U = 0,82$ м/с / $\Delta = \pm 0,2$ м/с  |
| 2     | Барометр-анероїд M67                          | вимірювання атмосферного тиску                  |  |
|       |   | від 610 мм рт. ст. до 790 мм рт. ст.            | $U = 0,52$ мм рт. ст. / $\Delta = \pm 1$ мм рт. ст.  |
| 3     | Інформаційно-вимірювальна система «Термококт» | реєстрація температури                          |  |
|       |   | від 0 °С до 1200 °С                             | $U = 0,14$ °С / $\Delta = \pm 0,35$ %  |
| 4     | Перетворювачі термоелектричні ТХА             | вимірювання температури                         |  |
|       |   | від 0 °С до 333 °С, від 334 °С до 1200 °С       | $U = 1,74$ °С / $\Delta = \pm 2,5$ °С; $\Delta = \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим}} \text{ °С}$   |
| 5     | Рулетка «Stanley»                             | вимірювання довжини                             |  |
|       |   | від 0 м до 60 м                                 | $U = 0,30$ мм / $\Delta = \pm 1$ мм  |
| 6     | Секундомір СОС пр. 2Б-2-010                   | вимірювання часу                                |  |
|       |   | від 0 с до 3600 с; від 0 с до 60 с; більше 60 с | 2 клас точності; $U = 0,163$ с / $\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60)$ с; $\Delta = (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540)$ с |
| 7     | Термогігрометр Testo 608-H1                   | вимірювання температури та вологості            |  |
|       |   | від 0 °С до 50 °С<br>від 2 % до 98 %            | $U = 0,3$ °С / $\Delta = \pm 0,5$ °С<br>$U = 1,3$ % / $\Delta = \pm 3$ %   |
| 8     | Фотовідеокамера Nikon D3110 18-55VR Kit       | здійснення відео- та фотофіксації               |  |
|       |   | 14,2 пікс.                                      | –  |

### *Вимоги до проведення експериментальних досліджень*

Експеримент імітує аварійну ситуацію у трансформаторі за підвищення температури масла до аварійного значення ( $T_{\text{самозаймання}} > 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), його розгерметизацію з подальшим виливом масла у маслоприймач із послідуєчим загорянням масла. Враховуючи, що відповідно до [8] трансформаторне масло є горючою рідиною, до проведення експерименту показники його пожежної небезпеки необхідно конкретизувати шляхом експериментального визначення згідно з ДСТУ 8829 [119]. Це дозволить визначити діапазон зміни значень температури трансформаторного масла: від аварійного значення до нижчої за  $T_{\text{спалаху}}$  шляхом його охолодження, проходженням у маслоприймачі гравійною засипкою.

Проходження розігрітого та палаючого масла через вогнезагороджувач маслоприймача має відбуватися впродовж тривалості часу не більше ніж 900 с.

Під час експерименту визначають зміну температури масла залежно від зміни параметрів гравійної засипки. При цьому повинна виконуватися така умова:

- над гравійною засипкою (щебенем) не повинно бути полум'яного горіння парів масла;

- температура масла у місці отвору його зливу в аварійну ємкість (маслозбірник) не повинна перевищувати  $T_{\text{спалаху}}$ .

Перше експериментальне дослідження розпочинається за таких параметрів гравійної засипки: довжина 2400 мм, висота 250 мм, що встановлені за результатами попереднього моделювання. Якщо зазначена умова у першому експериментальному дослідженні виконується, то довжину гравійної засипки зменшують на 100 мм та повторюють експеримент. Зменшення довжини гравійної засипки із кроком 100 мм повторюють до моменту, коли умова безпеки перестане виконуватися. За мінімальне значення довжини гравійної засипки приймають попереднє значення, за якого умова безпеки виконувалася.

Отримавши мінімальне значення довжини гравійної засипки починають зменшувати її висоту із кроком 10 мм, аналогічним чином визначаючи мінімальне значення висоти гравійної засипки.

Якщо зазначена умова у першому експериментальному дослідженні не виконується, то дослідження проводиться аналогічним чином, але у напрямку збільшення довжини та висоти гравійної засипки.

Якщо хоча б один із критеріїв попередньо визначеної умови безпеки не виконується, то слід вважати, що умова безпеки не виконується в цілому за заданих параметрів гравійної засипки. В такому випадку потрібно збільшувати один із параметрів та повторювати експеримент до того часу, поки всі критерії умови безпеки не будуть виконані.

Дослідження проводять не менше 3-х разів для кожної комбінації параметрів гравійної засипки.

Під час експерименту інформаційно-вимірювальною системою «Термоконт» вимірюють і реєструють значення температури трансформаторного масла в середині ємкості (1), у маслоприймачі (8), отворі зливу масла в аварійну ємкість, а також в самій аварійній ємкості (14).

#### *Порядок проведення експериментальних досліджень*

Дослідження проводились у такому порядку:

- підготовка до проведення експерименту;
- проведення експерименту;
- оцінювання отриманих результатів.

Підготовка до проведення експерименту включала в себе:

- переконання в тому, що шаровий кран (6) знаходиться у закритому положенні, а сітка (12), що перебиває отвір зливу масла в аварійну ємкість (14), знаходиться у робочому положенні;

- монтування термопар, їх під'єднання до інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт», налаштування системи вимірювання температури масла до роботи;

- засипання маслоприймача (8) щебенем;
- заповнення ємкості (1) трансформаторним маслом об'ємом в 1000 л;
- встановлення обладнання для проведення фото- та відеофіксації;
- вимірювання та реєстрацію параметрів умов навколишнього середовища;

- перевірку цілісності захисного огороження, встановлення попереджувальних знаків;

- підготовку засобів пожежогасіння, одягання оператора досліджень у захисний одяг (штани, куртка, чоботи, рукавиці, каска);

- нагрівання трансформаторного масла до температури його аварійного значення за допомогою ТЕНа (4), зображення якого наведено на рисунку 4.2;

- підготовку бензину А 92 у кількості 5 л для підпалювання масла, факелу для його підпалювання та металевої ємкості з водою для гасіння факелу.

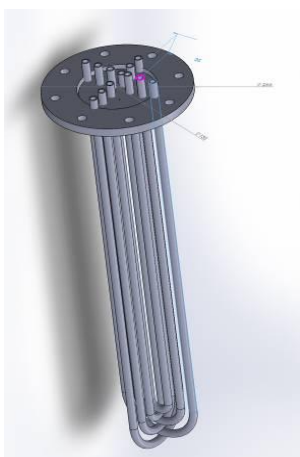


Рисунок 4.2 – Зображення блок-ТЕНу 50,0 кВт L850 мм

Проведення експерименту здійснювалось у такій послідовності:

- за досягнення маслом у ємкості (1), що імітує трансформатор, температури, наближеної до аварійних значень (більше 250 °С), відкривався шаровий кран (6), за допомогою якого регулювалася така необхідна витрата масла, щоб ємкість була звільнена за 900 с;

- додатково дно маслоприймача підігрівалося горінням бензину А92 в модельному вогнищі класу 25В;

- при потраплянні масла в маслоприймач відбувається його займання, і в цей момент часу розпочиналося вимірювання показників температур термопарами (5, 10, 15), що розташовані у маслоприймачі (8), в отворі зливу масла в аварійну ємкість і в самій аварійній ємкості (14).

- за допомогою інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт» фіксувалася зміна температури масла під час його проходження через щєбінь (9)

та візуально фіксувалася наявність полуменевого горіння парів масла над поверхнею щебеню;

- експеримент тривав до моменту повного витікання масла із ємкості (1);

- повторювання експерименту забезпечувалося заповненням ємкості (1) трансформаторним маслом шляхом його перекачування з аварійної ємкості (14) за допомогою електронасосу, зображення якого наведено на рисунку 4.3, що приводився в дію асинхронним двигуном ML100L-4.



Рисунок 4.3 – Зображення електронасосу НМШ 8-25-6,3/2,5

Оцінювання отриманих результатів експериментальних досліджень кожного досліді подаються окремо, з визначенням середнього значення.

За результат дослідження приймають середнє арифметичне значення результатів 3-х експериментів визначення температури трансформаторного масла та будують залежність зміни його температури від відстані проходження гравійною засипкою.

За отриманими даними визначається похибка за формулою (4.1):

$$\Delta A = \pm k \sqrt{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2}, \quad (4.1)$$

де:  $\Delta A$  – абсолютна похибка;

$\Delta A_1$  – похибка засобів вимірювання (термодатчик, витратомір);

$\Delta A_2$  – похибка вимірювальних пристроїв;

$k$  – коефіцієнт, що залежить від імовірності ( $k=1,1$  при  $P=0,95$ ).

#### *Вимоги безпеки*

До проведення досліджень допускаються особи, які пройшли загальний



інструктаж з охорони праці, ознайомились з порядком проведення досліджень, отримали інструктаж із уточненням функцій кожного учасника досліджень.

Під час організації та проведенні досліджень керуються вимогами [144, 145], інструкціями установи, якими встановлено вимоги з безпеки праці безпосередньо на робочому місці, іншими нормативними документами з безпеки праці.

До проведення експерименту необхідно визначити й огородити тимчасовою огорожею небезпечну зону на відстані не менше 3 м від експериментального стенду. До небезпечної зони стороннім особам входити заборонено.

Під час проведення досліджень всі учасники повинні бути одягнені у спеціальний одяг, забезпечені захисними касками та засобами захисту очей.

Під час проведення дослідження слід користуватися справними електричними установками без механічних і термічних дефектів (електричні розетки, електричні дроти, ТЕН).

Місце проведення експериментальних досліджень повинно бути забезпечено засобами пожежогасіння, а саме:

- не менше ніж двома порошковими вогнегасниками із масою заряду порошку не менше ніж 5 кг;
- кошмою;
- ящиком із піском об'ємом не менше ніж 0,5 м<sup>3</sup> та лопатою;
- металевим відром із водою.

Експериментальні дослідження поводяться не менше ніж двома операторами.

Під час проведення досліджень забороняється заходити у 3-х метрову зону огорожі особам, які не беруть участь у дослідженні; здійснювати підпалювання трансформаторного масла, коли в зоні стенду перебувають люди; проводити дослідження під час опадів.

На рисунку 4.4 наведено зображення дослідного стенду з елементами підготовки до проведення експериментальних досліджень із визначення мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у з'імітованому маслоприймачі.



Рисунок 4.4 – Зображення створеного дослідного стенду до експерименту

Розроблена методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції дає змогу визначати зміни температури трансформаторного масла та такі параметри гравійної засипки у маслоприймачі, за яких вона виконує функцію вогнезагороджувача й охолодження масла нижче температури спалаху.

## 4.2. Результати експериментального визначення показників пожежної безпеки трансформаторного масла

Основним критерієм оцінювання ефективності системи обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях – є температура масла, вплинути на зміну показника якого можливо інженерними рішеннями по облаштуванню маслоприймача.

Розроблена методика експериментальних досліджень з обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції [143] дозволяє дослідити зниження температури трансформаторного масла до безпечної величини та припинення його горіння залежно від попередньо визначених параметрів гравійної засипки [85].

Виходячи з цього, необхідно визначити безпечну величину температури трансформаторного масла, що експлуатується у маслонаповнених трансформаторах, виходячи з показників його пожежної безпеки.

Загально відомо [8], що трансформаторне масло є горючою рідиною, густиною: 860-880 кг/м<sup>3</sup>, температурою застигання: мінус 45 °С, кипіння: 300 °С, спалаху: 135-140 °С, займання: 135-160 °С, самозаймання: 270 °С, температурними межами розповсюдження полум'я: нижн. 125 °С – верхн. 193 °С.

Під час проведення досліджень [143, 146] застосовували трансформаторне масло типу Nytro 11GX, що відповідає міжнародному стандарту IEC 60296 [147]. За твердженням виробника (шведської компанії по виробництву спеціалізованих нафтових і бітумних масел Nynas AB, заснованої у 1928 році) – це високоякісне ізоляційне масло з високими експлуатаційними властивостями, включаючи дотримання конкретних вимог для спеціалізованих застосувань. Завдяки спеціально розробленому складу, масло Nytro 11GX відрізняється високою стійкістю до утворення осаду та високою стабільністю окисленню, що дозволяє подовжити термін служби трансформаторів і скоротити до мінімуму обсяги їх технічного обслуговування.

Це масло спеціально розроблено для застосування в маслонаповненому електрообладнанні, включаючи силові та розподільчі трансформатори.

Основними експлуатаційними властивостями та перевагами цього масла є:

- ефективний тепловідвід (завдяки низьким значенням в'язкості масло забезпечує ефективне відведення тепла від магнітопроводу й обмоток трансформатора);

- висока стабільність окисленню (завдяки спеціально розробленому складу масло відрізняється високою стійкістю до утворення осаду та високою стабільністю окисленню);

- оптимальні низькотемпературні властивості (низький вміст парафіну в нафтових маслах дозволяє виконувати пуск трансформаторів за найнижчих температур без використання присадок, що знижують температуру їх застигання);

- висока діелектрична міцність (при правильному зберіганні й експлуатації масло не тільки відповідає найжорсткішим вимогам до діелектричної міцності, але і перевершує їх).

Основні характеристики трансформаторного масла Nytro 11GX наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Характеристики трансформаторного масла Nytro 11GX

| Властивість                               | Одиниця вимірювання | Гарантовані показники |       | Типові показники |
|---|---------------------|-----------------------|-------|------------------|
|   |                     | min                   | max   |                  |
| фізичні                                   |                     |                       |       |                  |
| Зовнішній вигляд                          | –                   | прозоре, без осаду    |       | відповідає       |
| Густина за 20 °С                          | кг/дм <sup>3</sup>  | –                     | 0,895 | 0,870            |
| В'язкість за 40 °С                        | мм <sup>2</sup> /Б  | –                     | 11,0  | 9,2              |
| В'язкість за мінус 30 °С                  | мм <sup>2</sup> /Б  | –                     | 1800  | 800              |
| Температура застигання                    | °С                  | –                     | -45   | -51              |
| хімічні                                   |                     |                       |       |                  |
| Кислотне число                            | мг КОН/г            | –                     | 0,01  | < 0,01           |
| Корозійна сірка                           | –                   | некорозійна           |       | некорозійна      |
| Масовий вміст ароматів                    | %                   | –                     | –     | < 5              |
| Антиоксидант, феноли                      | маса %              | 0,3                   | 0,4   | 0,38             |
| Вміст води                                | мг/кг               | –                     | 30    | < 20             |
| Вміст фурфурала                           | мг/кг               | –                     | 0,1   | < 0,1            |
| електричні                                |                     |                       |       |                  |
| Тангенс кута діелектричних втрат за 90 °С |                     | –                     | 0,005 | < 0,001          |
| Міжфазний натяг                           | мН/м                | 40                    | –     | 50               |
| Пробивний натяг:                          |                     |                       |       |                  |
| - перед обробленням                       | кВ                  | 30                    | –     | 40-60            |
| - після оброблення                        | кВ                  | 70                    | –     | > 70             |

## Продовження таблиці 4.2

| стабільність окисленню                        |          |             |       |             |
|---|----------|-------------|-------|-------------|
| За 120 °С, 500 год                            | –        | –           | –     | –           |
| Загальне кислотне число                       | мг КОН/г | –           | 1,2   | < 0,20      |
| Осад  | маса %   | –           | 0,8   | < 0,50      |
| Тангенс кута діелектричних втрат / 90 °С      |          | –           | 0,500 | < 0,10      |
| безпека, вплив на здоров'я людини та довкілля |          |             |       |             |
| Температура спалаху                           | °С       | 135         | –     | 148         |
| Екстрагуемі з'єднання                         | маса %   | –           | 3     | < 3         |
| ПХБ за ІЕС 61619                              | –        | не виявлено |       | не виявлено |

Фізичні та хімічні властивості трансформаторного масла Nytro 11GX наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Фізичні та хімічні властивості трансформаторного масла Nytro 11GX

| № з/п | Властивість  | Показник   |
|-------|--|--|
| 1     | Вид продукту   | ізоляційне масло   |
| 2     | Фізичний стан  | рідина   |
| 3     | Колір  | світло-жовтий  |
| 4     | Запах  | без запаху / нафтовий ефір   |
| 5     | Хімічна стабільність   | стабільне за нормальних умов   |
| 6     | Умови, що викликають небезпечні зміни  | окиснювач  |
| 7     | Точка кипіння  | > 250 °С   |
| 8     | Точка розм'якшення   | мінус 60 °С  |
| 9     | Температура розкладання  | > 280 °С   |
| 10    | Температура спалаху  | закритий тигель: > 140 °С<br>[Пенські-Мартенса]  |
| 11    | Тиск парів   | 160 Па за 100 °С   |
| 12    | Відносна густина   | 0,87 г/см <sup>3</sup> за 15 °С  |
| 13    | Розчинність  | не розчиняється у воді;<br>розчиняється у більшості органічних розчинників                               |
| 14    | В'язкість  | кінематична (за 40 °С): 0,087 см <sup>2</sup> /с   |
| 15    | Екстрагуемі суміші диметилсульфоксиду для базового масла відповідно до ІР346 | < 3 %  |
| 16    | Температура самозаймання   | > 270 °С   |
| 17    | Токсичність (наслідки для здоров'я)  | низька токсичність   |
| 18    | Екологічна токсичність   | токсичність водного середовища для базового масла: LC50 за значень > 1000 мг/л, що є низькою токсичністю |
| 19    | Здатність до розкладання   | піддається біологічному розкладанню  |

Основними показниками [8], що характеризують пожежну небезпеку речовин і матеріалів, зокрема для рідин, є група їх горючості та температури

спалаху, займання, самозаймання. З метою конкретизації показників пожежної небезпеки трансформаторного масла Nytro 11GX визначення значень його температур було проведено за методами, встановленими ДСТУ 8829 [119].

Суть методів випробувань із визначення температури спалаху у закритому тиглі, температури спалаху у відкритому тиглі, температури займання полягає у нагріванні певної кількості речовини з заданою швидкістю, періодичному запалюванні парів, що виділяються, та встановленні факту наявності чи відсутності спалаху чи займання за фіксованої температури.

Температура спалаху у закритому тиглі – це найменша температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полуменеве горіння (спалах) над частиною або над всією поверхнею речовини, що триває менше 5 с після його видалення.

Температура спалаху у відкритому тиглі – це найменша температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полуменеве горіння (спалах) над частиною або над всією поверхнею речовини, що триває менше 5 с після його видалення.

Температура займання – це найменша температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полуменеве горіння парів рідини, що триває не менше 5 с після його видалення.

Температура самозаймання – це найменша температура навколишнього середовища, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається самозаймання речовини.

Визначення температур спалаху та займання проводиться за середнім арифметичним значенням температур, отриманих на трьох зразках, із поправкою на атмосферний тиск, що розраховується за формулою (4.2).

$$\theta = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - p_a), \quad (4.2)$$

де:  $\theta$  – значення температур спалаху та займання масла, °С;

$T_1, T_2, T_3$  – вимірні значення температур спалаху та займання масла, °С;

$p_a$  – атмосферний тиск, кПа.

Дослідження проводилися за таких умов навколишнього середовища:

- температура повітря: 16,2 °С;
- відносна вологість повітря: 47 %;
- атмосферний тиск: 748 мм рт. ст.

Значення температур спалаху та займання, отриманих на трьох зразках і розрахованих за формулою (4.2) за ДСТУ 8829 [119], наведено на рисунку 4.5.

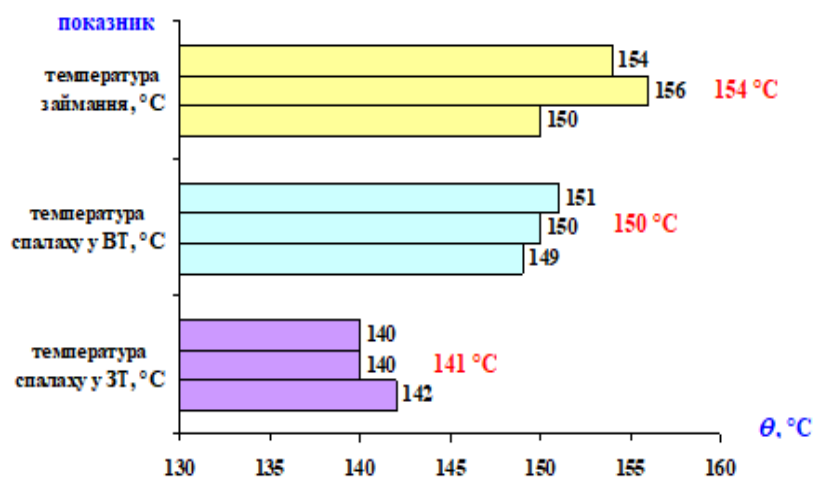


Рисунок 4.5 – Значення отриманих температур спалаху та займання трансформаторного масла Nyrto 11GX згідно з ДСТУ 8829 [119]

Зростання температури трьох зразків трансформаторного масла від швидкості його нагріву під час визначення температури спалаху у відкритому тиглі описується експоненціальною залежністю  $y = 26,028 \cdot e^{0,072 \cdot x}$  (рисунок 4.6).

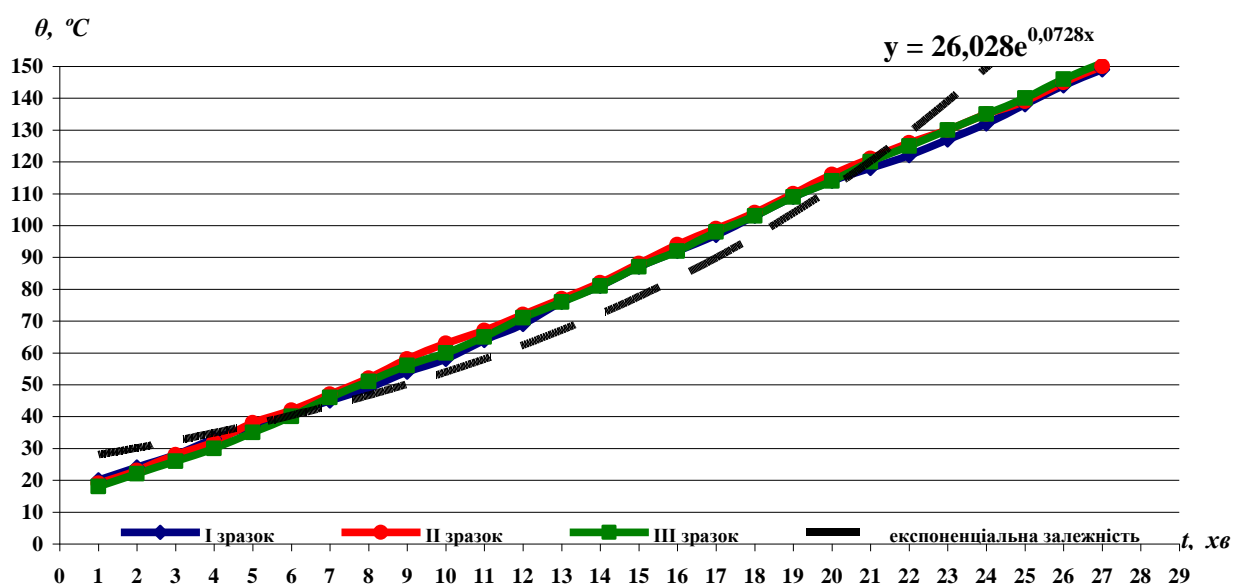


Рисунок 4.6 – Залежність зростання температури масла Nyrto 11GX від швидкості його нагріву під час визначення  $T_{спалаху}$  у відкритому тиглі

Суть методу випробувань із визначення температури самозаймання полягає у введенні визначеного об'єму речовини у нагрітий до певної температури об'єм і встановленні факту наявності чи відсутності самозаймання за фіксованої температури. Випробовування повторюють з різними об'ємами проб та температурами до досягнення мінімальної температури самозаймання.

Результати основної серії випробувань з експериментального визначення температури самозаймання зразка трансформаторного масла типу Nytro 11GX наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати основної серії випробувань зразка трансформаторного масла типу Nytro 11GX з експериментального визначення температури самозаймання

| Кількість речовини у пробі, мл | Температура випробування, °C | Період індукції, с | Результат випробування на самозаймання |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------|--|
| 0,6                            | 252                          | 40                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 56                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 38                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 44                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 51                 | самозаймання                           |
| 0,6                            | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |

Під час проведення випробувань за об'єму проби 0,6 мл і температури 250 °C впродовж періоду часу 300 с самозаймання рідини не відбувалося. Згідно з п. 7.9 ДСТУ 8829 [119] температура самозаймання трансформаторного масла Nytro 11GX становить 252 °C.

Оцінювання результатів експериментального визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла типу Nytro 11GX з урахуванням підходів, викладених у [148-150] для галузі пожежної безпеки, проведено з використанням невизначеності результатів вимірювання.

Так, розширена невизначеність результату вимірювання для температури спалаху у закритому тиглі склала  $\pm 2,7$  °C; для температури спалаху у відкритому тиглі склала  $\pm 2,8$  °C; для температури займання склала  $\pm 4,3$  °C; для температури самозаймання склала  $\pm 2,9$  °C.



Результати експериментального визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла типу Nytro 11GX оформлені відповідним протоколом випробувань (додаток Г).

Тож, за результатами проведених експериментальних досліджень отримано наступне:

- згідно з п. 7.5 ДСТУ 8829 [119] температура спалаху трансформаторного масла типу Nytro 11GX у закритому тиглі становить 141 °С;

- згідно з п. 7.6 ДСТУ 8829 [119] температура спалаху трансформаторного масла типу Nytro 11GX у відкритому тиглі становить 150 °С;

- згідно з п. 7.7 ДСТУ 8829 [119] температура займання трансформаторного масла типу Nytro 11GX становить 154 °С;

- згідно з п. 7.9 ДСТУ 8829 [119] температура самозаймання трансформаторного масла типу Nytro 11GX становить 252 °С;

- згідно з п. 6.1 і п. 7.2.2 ДСТУ 8829 [119] трансформаторне масло типу Nytro 11GX виробництва шведської компанії Nynas AB є горючою рідиною.

Визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла типу Nytro 11GX виробництва шведської компанії Nynas AB за методами, встановленими ДСТУ 8829 [119], дозволило встановити діапазон зниження його температури від аварійного значення до нижчої за  $T_{спалаху}$  у 150 °С, що і стало критерієм оцінювання ефективності системи вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях в умовах пожежі [151].

#### **4.3. Результати експериментальних досліджень параметрів гравійної засипки**

Експериментальні дослідження з виявлення закономірностей зниження температури та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції проводилися за методикою [143].

Попередньо, аналізуючи обставини виникнення пожеж на маслонаповнених трансформаторних підстанціях, було визначено, що на обмеження поширення таких пожеж можуть впливати конструктивні параметри та матеріал маслоприймача, матеріал його засипки, а також природні чинники [85]. Аналізуючи взаємозв'язки між зазначеними параметрами та їх значущість до впливу на процес тепломасообміну між маслом та гравійною засипкою, встановлено перелік параметрів, що слід враховувати під час дослідження залежності зниження температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки, а саме: висота гравійної засипки, ширина гравійної засипки, ухил маслоприймача у бік маслозбірника.

Даний експеримент імітує аварійну ситуацію у трансформаторі за підвищення температури масла до аварійного значення ( $T_{\text{самозаймання}} \approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$ ), його розгерметизацію з подальшим виливом масла у маслоприймач із наступним загорянням масла. Під час проведення експерименту використовувалося трансформаторне масло типу Nyro 11GX виробництва шведської компанії Nypas AB, що відповідає міжнародному стандарту ІЕС 60296 [147]. Визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла за методами, встановленими ДСТУ 8829 [119], дозволило встановити діапазон зниження його температури від аварійного значення до нижчої за  $T_{\text{спалаху}}$  у  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , що і стало критерієм оцінювання ефективності системи вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях в умовах пожежі [151].

Дослідження проводилися на пожежно-випробувальному полігоні Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (с. Дмитрівка, Бучанського району, Київської області) за таких умов довкілля:

- температура:  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- відносна вологість повітря: 65 %;
- атмосферний тиск: 101,3 кПа.

Створений для проведення експерименту дослідний стенд [143] складається з трьох основних блоків, схему якого наведено на рисунку 4.7.

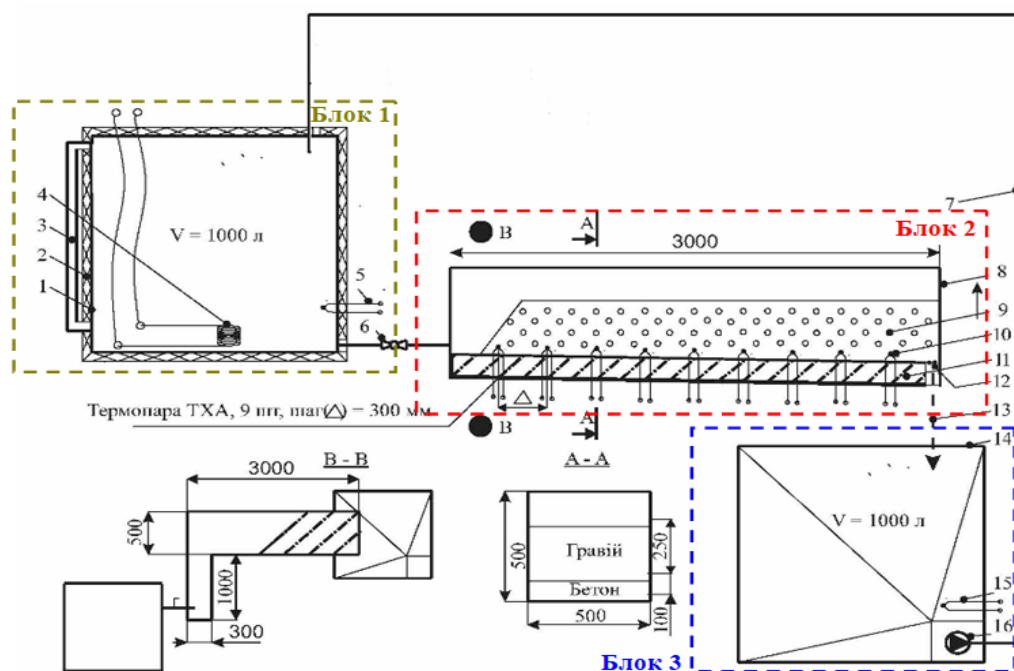


Рисунок 4.7 – Схема дослідного стенду для проведення експерименту:

- 1 – корпус ємкості для масла; 2 – теплоізоляція; 3 – кварцова трубка для візуального контролю рівня масла; 4 – ТЕН; 5 – термомпара; 6 – шаровий кран; 7 – з'єднувальна арматура; 8 – корпус маслоприймача; 9 – гравійна засипка; 10 – термомпари; 11 – бетон; 12 – сітка; 13 – траєкторія зливання масла в аварійну ємкість; 14 – корпус аварійної ємкості; 15 – термомпара; 16 – шестеренчастий насос

Блок 1, що імітує аварію в маслonaповненому трансформаторі, складається з ємкості об'ємом 1000 л, в яку заливалося масло, із отвором, що імітує аварійний вилив масла; ТЕНу для нагрівання масла та термомпари контролю температури масла. Об'єм масла, що заливався у ємкість, визначався із розрахунку вільного витікання масла через заданий отвір впродовж 15 хв, що складав 900 л.

Блок 2 складається із металевого дека, що імітує маслоприймач із гравійною засипкою, із бетонним дном. Для відтворення найбільш несприятливих умов тепломасообміну бокові стінки корпусу маслоприймача були теплоізольовані шаром мінеральної вати. Для заміру температур у гравійній засипці встановлювалися термомпари (ТХА) із кроком 300 мм на відстані 10 мм від дна маслоприймача.

Блок 3 являє собою аварійну ємкість для зливання масла.

З урахуванням визначених методикою [143] умов проведення експериментальних досліджень і визначеного критерію оцінювання ефективності

системи вогнеперешкоджання [151] принципами проведення експериментальних досліджень визначили наступне:

- над гравійною засипкою маслоприймача не повинно бути полуменевого горіння парів масла;

- температура масла у місці отвору його зливу в аварійну ємкість (маслозбірник) не повинна перевищувати температуру в 150 °С.

Вигляд дослідного стенду під час проведення експерименту зображено на рисунку 4.8.



Рисунок 4.8 – Зображення дослідного стенду під час проведення експерименту

Порядок підготовки до проведення експерименту детально описано у розділі 4.1 і в роботі [143].

Проведення експерименту здійснювалось у такій послідовності:

- за досягнення маслам у ємкості (1), що імітує трансформатор, температури, наближеної до аварійних значень ( $\approx 250$  °С), відкривався шаровий кран (6), за допомогою якого регулювалася така необхідна витрата масла, щоб ємкість була звільнена за 900 с;

- додатково дно маслоприймача (8) підігрівалося горінням бензину А92 в модельному вогнищі класу 25В;

- при потраплянні масла в маслоприймач відбувалося його займання, і в цей момент часу розпочиналося вимірювання показників температур термopарами (5, 10, 15), що розташовані у маслоприймачі (8), в отворі зливу масла в аварійну ємкість (14) і в корпусі ємкості для масла (1);

- за допомогою інформаційно-вимірювальної системи «Термоконт» фіксувалося зниження температури масла під час його проходження гравійною засипкою (9), а наявність полуменевого горіння парів масла над її поверхнею фіксувалася візуально та засобом фото-, відеофіксації (фотовідеокамера Nikon D3110 18-55VR Kit);

- експеримент тривав до моменту повного витікання масла із ємкості (1).

Експериментальні дослідження із проходження трансформаторного масла через гравійну засипку маслоприймача у маслозбірник повторювали шість разів, змінюючи ширину гравійної засипки від 300 мм до 2400 мм із кроком у 300 мм.

Повторювання експерименту забезпечувалося заповненням першої ємкості трансформаторним маслом шляхом його перекачування з аварійної ємкості (маслозбірника) за допомогою електронасосу, що приводився в дію асинхронним двигуном.

Результати кожного експерименту фіксувалися окремо з визначенням середнього значення.

Полуменева горіння парів масла над гравійною засипкою спостерігалася при її ширині ( $d$ ) менше ніж 1200 мм. При ширині ( $d$ ) гравійної засипки 1500 мм горіння парів масла над її поверхнею припинялося.

Результати експериментальних досліджень зі встановлення закономірностей зниження температури трансформаторного масла залежно від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Виміряні та середні значення температур трансформаторного масла залежно від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача

| № експер.  | Ширина гравійної засипки, мм                    |     |     |     |      |      |      |      |      |
|------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|            | 0   | 300 | 600 | 900 | 1200 | 1500 | 1800 | 2100 | 2400 |
|            | Значення температур трансформаторного масла, °С |     |     |     |      |      |      |      |      |
| 1          | 262   | 229 | 188 | 169 | 135  | 130  | 127  | 122  | 118  |
| 2          | 256   | 234 | 193 | 157 | 140  | 134  | 129  | 123  | 119  |
| 3          | 254   | 236 | 198 | 163 | 139  | 133  | 128  | 122  | 116  |
| 4          | 267   | 240 | 203 | 172 | 144  | 136  | 130  | 124  | 120  |
| 5          | 251   | 233 | 196 | 161 | 149  | 138  | 133  | 123  | 119  |
| 6          | 259   | 242 | 205 | 179 | 152  | 139  | 134  | 125  | 121  |
| Сер. знач. | 258   | 235 | 197 | 167 | 143  | 135  | 130  | 123  | 118  |

Ефективність охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від відстані проходження ( $d_{ГЗ}$ ) гравійною засипкою маслоприймача зображено на рисунку 4.9.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Візуалізація горіння трансформаторного масла під час його проходження гравійною засипкою маслоприймача у ході проведення експерименту на дослідному стенді:

а) горіння масла не припинялося ( $d_{ГЗ} \leq 1200$  мм); б) горіння масла припинялося ( $d_{ГЗ} \approx 1500$  мм)

На основі отриманих експериментальних даних, наведених у таблиці 4.5, побудовано графік залежності зниження температури трансформаторного масла від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача та їх середні значення (рисунок 4.10) [152].

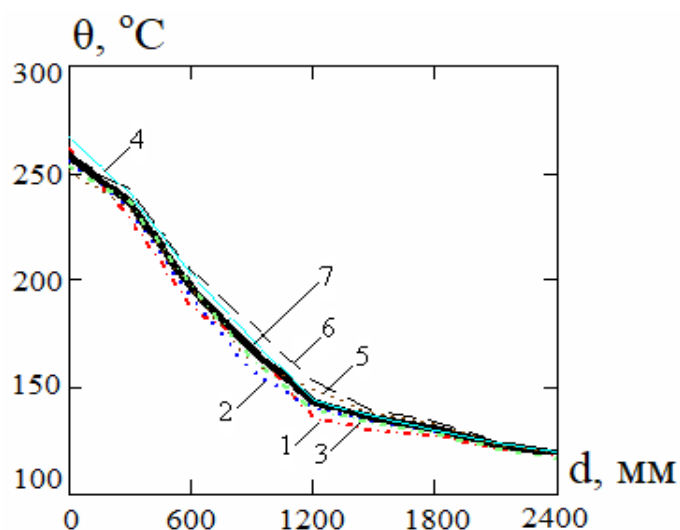


Рисунок 4.10 – Графік залежності зниження температури трансформаторного масла від відстані проходження гравійною засипкою:

1-6 – криві проведення першого – шостого експериментів;  
7 – усереднена крива всіх шести експериментів

Під час проведення експериментів діапазон коливання температур складав не більше 10 °C. Температура масла на вході до гравійної засипки перевищувала значення у 250 °C та знижувалася до 116 °C на виході з гравійної засипки (в місці зливу в аварійну ємкість).

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень встановлено, що зниження температури трансформаторного масла, що горить, залежно від відстані (ширини  $d$ ), яку воно проходить від входу у гравійну засипку маслоприймача до маслозбірника, описується поліноміальною залежністю 3-го порядку, що має вигляд рівняння (4.3):

$$\Delta\theta = 263,16 - 39,1d + 2,7d^2 - 0,005d^3 \quad (4.3)$$

#### 4.4. Оцінювання результатів експериментальних досліджень

Обробку результатів експериментальних досліджень проводили методами математичної статистики в два етапи:

I-й етап – перевірка результатів експериментальних досліджень на наявність викидів та квазівикидів;

II-й етап – порівняння результатів експериментальних досліджень для виявлення розбіжностей між дисперсіями.

Для виявлення у результатах експериментальних досліджень викидів та квазівикидів застосували критерій Граббса (4.3):

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} \text{ та } G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S}, \quad (4.3)$$

де:  $\bar{y}$  – середнє значення;

$S$  – середньоквадратичне відхилення.

Середнє значення  $\bar{y}$  розраховували за виразом (4.4):

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (4.4)$$

де  $n$  – кількість результатів експериментальних досліджень.

А оцінка дисперсії та середньоквадратичного відхилення результатів експериментальних досліджень  $S^2$  та  $S$  становили відповідно (4.5):

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ та } S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.5)$$

Для оцінювання отриманих розрахункових значень  $G_{\max}$  та  $G_{\min}$  щодо визначення в результатах експериментальних досліджень викидів та квазівикидів за критерієм Граббса використовували схему, яку наведено на рисунку 4.11.

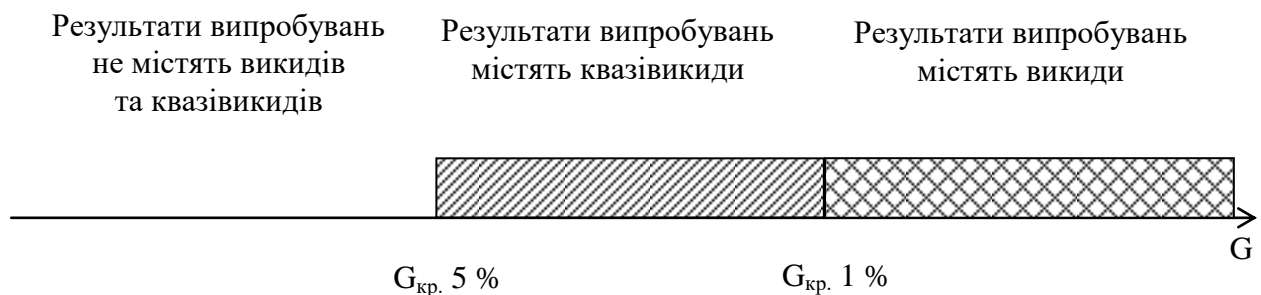


Рисунок 4.11 – Визначення в результатах випробувань викидів та квазівикидів за критерієм Граббса



За результатами застосування критерію Граббса для оцінювання температур трансформаторного масла залежно від відстані його проходження отримали такі значення:

- ширина гравійної засипки 0 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (262 + 256 + 254 + 267 + 251 + 259) = 258,167;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((262 - 258,167)^2 + (256 - 258,167)^2 + (254 - 258,167)^2 + (267 - 258,167)^2 + (251 - 258,167)^2 + (259 - 258,167)^2) = 33,367;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{33,367} = 5,776;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{267 - 258,167}{5,776} = 1,529;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{258,167 - 251}{5,776} = 1,241.$$

- ширина гравійної засипки 300 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (229 + 234 + 236 + 240 + 233 + 242) = 235,667;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((229 - 235,667)^2 + (234 - 235,667)^2 + (236 - 235,667)^2 + (240 - 235,667)^2 + (233 - 235,667)^2 + (242 - 235,667)^2) = 22,667;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{22,667} = 4,761;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{242 - 235,667}{4,761} = 1,33;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{235,667 - 229}{4,761} = 1,4.$$

- ширина гравійної засипки 600 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (188 + 193 + 198 + 203 + 196 + 205) = 197,167;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((229 - 197,167)^2 + (234 - 197,167)^2 + \\ + (236 - 197,167)^2 + (240 - 197,167)^2 + (233 - 197,167)^2 + \\ + (242 - 197,167)^2) = 39,767;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{39,767} = 6,306;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{205 - 197,167}{6,306} = 1,242;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{197,167 - 188}{6,306} = 1,454.$$

- ширина гравійної засипки 900 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (169 + 157 + 163 + 172 + 161 + 179) = 166,833;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((169-166,833)^2 + (157-166,833)^2 + \\ + (163-166,833)^2 + (172-166,833)^2 + (161-166,833)^2 + \\ + (179-166,833)^2) = 64,967;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{64,967} = 8,06;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{179-166,833}{8,06} = 1,509;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{166,833-157}{8,06} = 1,22.$$

- ширина гравійної засипки 1200 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (135 + 140 + 139 + 144 + 149 + 152) = 143,167;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((135-143,167)^2 + (140-143,167)^2 + \\ + (139-143,167)^2 + (144-143,167)^2 + (149-143,167)^2 + \\ + (152-143,167)^2) = 41,367;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{41,367} = 6,432;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{152-143,167}{6,432} = 1,509;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{143,167 - 135}{6,432} = 1,27.$$

- ширина гравійної засипки 1500 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (130 + 134 + 133 + 136 + 138 + 139) = 135;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((130-135)^2 + (134-135)^2 + (133-135)^2 + (136-135)^2 + (138-135)^2 + (139-135)^2) = 11,2;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{11,2} = 3,347;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{139 - 135}{3,347} = 1,195;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{135 - 130}{3,347} = 1,494.$$

- ширина гравійної засипки 1800 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (127 + 129 + 128 + 130 + 133 + 134) = 130,167;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((127-130,167)^2 + (129-130,167)^2 + (128-130,167)^2 + (130-130,167)^2 + (133-130,167)^2 + (134-130,167)^2) = 7,767;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{7,767} = 2,787;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{134 - 130,167}{2,787} = 1,375;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{130,167 - 127}{2,787} = 1,136.$$

- ширина гравійної засипки 2100 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (122 + 123 + 122 + 124 + 123 + 125) = 123,167;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((122 - 123,167)^2 + (123 - 123,167)^2 + (122 - 123,167)^2 + (124 - 123,167)^2 + (123 - 123,167)^2 + (125 - 123,167)^2) = 1,367;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{1,367} = 1,169;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{125 - 123,167}{1,169} = 1,568;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{123,167 - 122}{1,169} = 0,998.$$

- ширина гравійної засипки 2400 мм:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{6} (118 + 119 + 116 + 120 + 119 + 121) = 118,833;$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{5} ((118 - 118,833)^2 + (119 - 118,833)^2 + (116 - 118,833)^2 + (120 - 118,833)^2 + (119 - 118,833)^2 + (121 - 118,833)^2) = 2,967;$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \sqrt{2,967} = 1,722;$$

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} = \frac{121 - 118,833}{1,722} = 1,258;$$

$$G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S} = \frac{118,833 - 118}{1,722} = 1,645.$$

У нашому випадку критичні значення (для  $n=6$  експериментів) для критерію Граббса складають: для 5 % – 1,973 та для 1 % – 1,887 відповідно.

Отримані розрахункові значення  $G_{\max}$  та  $G_{\min}$  для всіх випадків залежно від відстані проходження трансформаторного масла гравійною засипкою є меншими за критичні. Тобто результати експериментальних досліджень не містять викидів та квазівикидів за критерієм Граббса.

Для комплексного оцінювання результатів 6 експериментів для виявлення розбіжностей між дисперсіями застосували критерій Фішера (4.6), порівнявши при цьому отриману оцінку дисперсії для першого та наступних експериментів (тобто: 1 та 2; 1 та 3; 1 та 4; 1 та 5, 1 та 6):

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (4.6)$$

де:  $S_1^2$ ,  $S_2^2$  – оцінка дисперсій для значень, отриманих під час експериментів.

У разі отримання розрахункових значень меншими від критичних за критерієм Фішера слід вважати, що отримані результати експериментальних досліджень належать до однієї генеральної сукупності та суттєво не відрізняються між собою.

Дисперсії відхилень по середнім значенням температур трансформаторного масла залежно від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача наведено на рисунку 4.12.

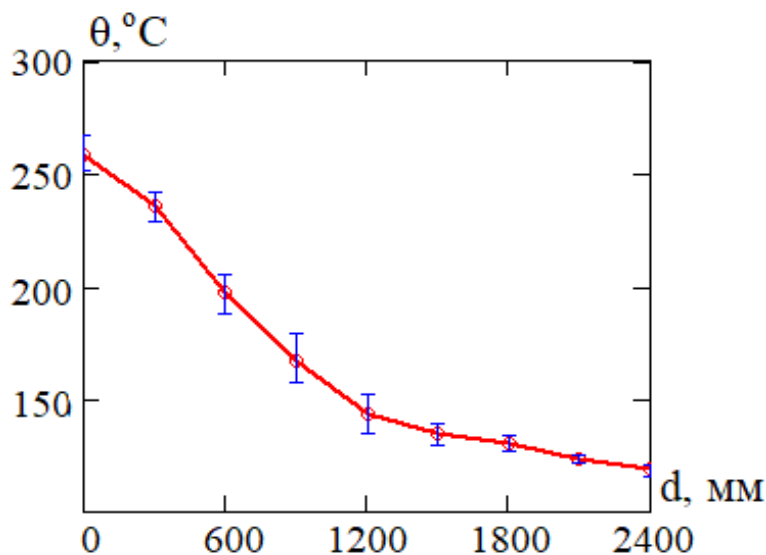


Рисунок 4.12 – Дисперсії відхилень по середнім значенням температур трансформаторного масла від відстані проходження гравійною засипкою

Отримані значення критерію Фішера, розраховані за результатами експериментальних досліджень, наведено у таблиці 4.6.

Критичним значенням для критерію Фішера для кількості ступенів  $k_1=5$  та  $k_2=5$  є значення 5,05. Отримані розрахункові значення за критерієм Фішера менші за критичні. Тобто результати експериментальних досліджень належать до однієї генеральної сукупності та суттєво не відрізняються між собою.

Таблиця 4.6 – Значення критерію Фішера, розраховані за результатами експериментальних досліджень

| № експер. | Значення температур трансформаторного масла, °С |     |     |     |      |      |      |      |      | F    |
|-----------|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
|           | Ширина гравійної засипки, мм                    |     |     |     |      |      |      |      |      |      |
|           | 0   | 300 | 600 | 900 | 1200 | 1500 | 1800 | 2100 | 2400 |      |
| 1         | 262   | 229 | 188 | 169 | 135  | 130  | 127  | 122  | 118  | -    |
| 2         | 256   | 234 | 193 | 157 | 140  | 134  | 129  | 123  | 119  | 1,05 |
| 3         | 254   | 236 | 198 | 163 | 139  | 133  | 128  | 122  | 116  | 1,01 |
| 4         | 267   | 240 | 203 | 172 | 144  | 136  | 130  | 124  | 120  | 1,08 |
| 5         | 251   | 233 | 196 | 161 | 149  | 138  | 133  | 123  | 119  | 1,15 |
| 6         | 259   | 242 | 205 | 179 | 152  | 139  | 134  | 125  | 121  | 1,02 |

Адекватність розробленої математичної моделі [153, 154] перевірялася шляхом порівняння теоретичних та експериментальних досліджень із використанням статистичного критерію Фішера, а також абсолютних, відносних і середньоквадратичних відхилень, результати яких наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Статистичні параметри, отримані перевіркою адекватності результатів розрахунку зниження температури трансформаторного масла

| Абсолютні відхилення, °С | Відносні відхилення, % | Середньоквадратичні відхилення, °С |
|--------------------------|------------------------|------------------------------------|
| 5,501                    | 3,379                  | 5,852                              |

Таким чином, абсолютні відхилення між результатами математичного моделювання й усередненими експериментальними дослідженнями не перевищують 6 °С, що у відсоткових показниках не перевищує 4 %, середньоквадратичні відхилення знаходяться у межах 6 °С, що вказує на те, що дані математичного моделювання максимально наближені до усереднених даних експерименту. Тобто розбіжність між дисперсіями експериментальних досліджень та математичного моделювання можна вважати не суттєвою.

На основі результатів експериментальних досліджень і даних математичного моделювання [85] побудовано залежність зниження температури трансформаторного масла від відстані проходження через гравійну засипку (від точки входу масла в гравійну засипку до точки виходу в місці зливу в аварійну ємкість) [155], наведену на рисунку 4.13.



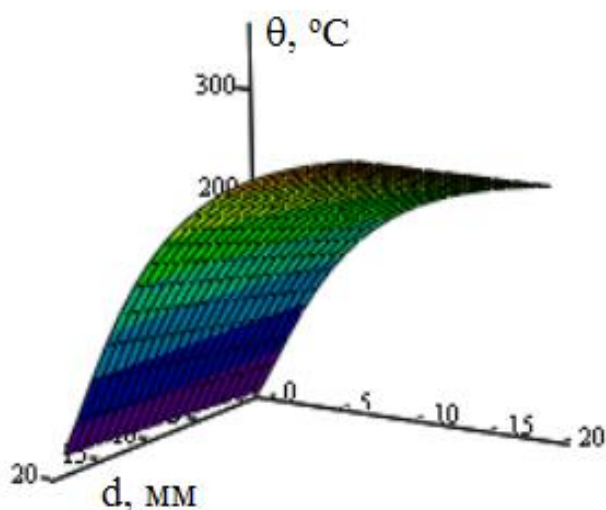


Рисунок 4.13 – Залежність зниження температури трансформаторного масла на основі даних математичного моделювання й експериментальних досліджень від параметрів гравійної засипки

Таким чином, експериментально підтверджено дані, отримані за результатами математичного моделювання [85], стосовно того, що зниження температури масла від 250 °С до 150 °С забезпечують мінімальні розміри гравійної засипки шириною 1500 мм і висотою 250 мм; при цьому, ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника становить 0,05 м/м.

#### 4.5. Висновки за четвертим розділом

Розроблена методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції дає змогу визначати зміни температури трансформаторного масла та такі параметри гравійної засипки у маслоприймачі, за яких вона виконує функцію вогнезагороджувача й охолодження масла нижче температури спалаху.

Під час проведення експериментів діапазон коливання температур складав не більше 10 °С. Температура масла на вході до гравійної засипки перевищувала

значення у 250 °С та знижувалася до 116 °С на виході з гравійної засипки (в місці зливу в аварійну ємкість).

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень з виявлення закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції встановлено, що зниження температури ( $\Delta\theta$ ) трансформаторного масла, що горить, від відстані (ширини  $d$ ), яку воно проходить від входу у гравійну засипку маслоприймача до маслозбірника, описується поліноміальною залежністю 3-го порядку, що має вигляд:

$$\Delta\theta = 263,16 - 39,1d + 2,7d^2 - 0,005d^3$$

З урахуванням даним проведеного математичного моделювання [85], експериментально підтверджено та вперше встановлено, що зниження температури трансформаторного масла від 250 °С до 150 °С забезпечують мінімальні розміри гравійної засипки шириною 1500 мм і висотою 250 мм.

## РОЗДІЛ 5. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ НАЯВНИХ РІШЕНЬ ПО ОБМЕЖЕННЮ ПОШИРЕННЯ ПОЖЕЖІ У РАЗІ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙ НА МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

### 5.1. Економічна ефективність зміни параметрів гравійної засипки маслоприймачів на прикладі трансформаторних підстанцій міста Києва

Оцінювання економічного ефекту від запропонованих параметричних рішень порівняно з існуючими підходами проведено для міста Києва із офіційною кількістю абонентів станом на 2018 рік в 1,16 млн відповідно до даних [156].

Відповідно до цих даних загальна кількість трансформаторних підстанцій ( $K_T$ ) становить 3569 од., при цьому забезпечує їх обслуговування ( $K_{IT}$ ) 3116 осіб із числа технічного персоналу із середньою заробітною платою ( $ЗП$ ) 14,900 грн на особу/місяць (745 грн/роб. день). Тобто на одну трансформаторну підстанцію в середньому приходиться ( $K_C$ ) 1,15 працівника, із числа технічного персоналу на рік.

Відповідно до вимог [56] зміна гравійної засипки або її промивка відбувається один раз на рік. Слід розуміти, що відповідно до встановлених вимог роботи з промивки гравійної засипки неможливо проводити безпосередньо на трансформаторному майданчику. Під час організації проведення робіт з промивки гравійної засипки її повністю вилучають та вивозять на спеціальні промивні площадки для подальшого промивання, висушування та транспортування назад для заповнення маслоприймачів. Загальна тривалість такої роботи становить 7 днів, із якої 2 дні є трудовими ( $T_{роб}$ ) та безпосередньо займають на здійснення процесу транспортування та промивки, а 5 днів – сушіння на відкритій площадці.

Проведемо порівняльний аналіз доцільності здійснення промивки гравійної засипки ( $G_{промивки}$ ) або її повного вилучення та засипки нової гравійної засипки ( $G_{заміни}$ ) за допомогою виразів (5.1) та (5.2):

$$G_{промивки} = K_C \cdot T_{роб} \cdot ЗП + (E_T + E_B + E_H) \cdot 116, \quad (5.1)$$

де:  $K_C$  – середня кількість працівників залучених в рік (1,15);

$T_{роб}$  – кількість робочих днів (2);

$ЗП$  – середня заробітна палата за один робочий день (745 грн);

$E_T$  – затрати на транспортування 1 т вантажу на 1 км (170 грн);

$E_B$  – затрати на подачу та відведення води промивки 1 т щебеню (35 грн);

$E_H$  – витрати на експлуатацію насосного обладнання промивки 1 т щебеню (12 грн).

Таким чином  $G_{промивки}$  для однієї трансформаторної підстанції становить 26885,5 грн на рік. Витратами на вилучення та засипання гравійної засипки в даному випадку можна знехтувати, враховуючи, що даний тип роботи присутній для обох типів експлуатації трансформаторів маслоприймачів.

Проведемо розрахунки вартості повного вилучення та засипки нової гравійної засипки ( $G_{заміни}$ ):

$$G_{заміни} = K_c \cdot T_{роб} \cdot ЗП + (E_T + E_B + E_{ГЗ}) \cdot 116, \quad (5.2)$$

де:  $E_B$  – затрати на утилізацію 1 т забрудненого щебеню (20 грн/т);

$E_{ГЗ}$  – затрати на закупівлю нової гравійної засипки (305 грн/т).

Таким чином  $G_{промивки}$  для однієї трансформаторної підстанції становить 59133,5 грн на рік.

За результатом проведених розрахунків за формулами (5.1) та (5.2) визначено, що щорічні витрати на експлуатаційне обслуговування одного маслоприймача трансформаторних підстанцій складає 26885,5 грн на рік – у разі промивки щебеню, та 59133,5 грн на рік – у разі повної заміни гравійної засипки.

Таким чином, загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі промивки щебеню можна виразити рівнянням (5.3):

$$\sum E = K_T \cdot G_{промивки} \quad (5.3)$$

Загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі заміни щебеню можна виразити рівнянням (5.4):

$$\sum E = K_T \cdot G_{заміни} \quad (5.4)$$

Тобто загальні експлуатаційні витрати для всіх трансформаторів у місті в разі промивки щебеню складатимуть 95 954 349,5 грн, а загальні експлуатаційні

витрати для всіх трансформаторів у місті Києві у разі заміни щебеню складатимуть 211 047 461,5 грн, тобто промивання гравійної засипки є на 45 % вигіднішим, ніж його заміна на новий.

Візуально зменшення кількості щебеню зображено на рисунку 5.1.

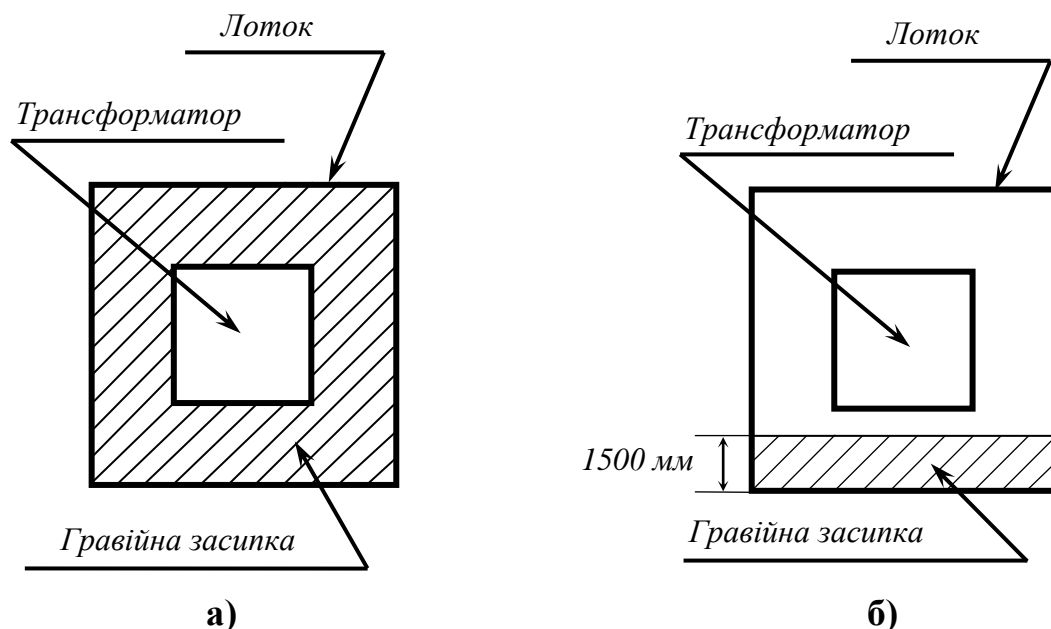


Рисунок 5.1 – Схеми маслонаповнених трансформаторних підстанцій із гравійною засипкою:

а) існуюче регулювання щодо обмеження поширення пожежі трансформаторних підстанцій  
 б) регулювання щодо обмеження поширення пожежі трансформаторних підстанцій, що пропонується

Маса гравійної засипки, що використовується для заповнення однієї площадки за нормованими параметрами в середньому становить  $86,4 \text{ м}^3$  або 116 т.

Маса гравійної засипки, що використовується для заповнення однієї площадки за розрахованими параметрами в середньому становить  $5,4 \text{ м}^3$  або 7 т.

Із урахуванням отриманих нових параметрів гравійної засипки маслоприймачів та відповідно зміни її кількості з 116 тон до 7 тон проведемо аналогічні розрахунки за формулами (5.1) та (5.2) та визначимо, що вартість промивки 1 т щебеню  $G_{\text{промивки}}$  складатиме 3232,5 грн, а вартість заміни  $G_{\text{заміни}}$  – 4478,5 грн. Таким чином, економічний ефект від зміни параметрів гравійної засипки одного маслоприймача на прикладі трансформаторних підстанцій міста складатиме до 72 %.

Зменшення геометричних розмірів гравійної засипки в маслоприймачі зменшує експлуатаційні витрати на технічне обслуговування трансформаторної підстанції при збереженні рівня пожежної безпеки.

Тож, економічний ефект від запропонованих технічних рішень порівняно з існуючими підходами за розрахунком техніко-економічного обґрунтування параметрів гравійної засипки у маслоприймачах маслонаповнених трансформаторних підстанцій на прикладі довготривалої експлуатації для міста Києва, з урахуванням зменшення кількості щебеню й експлуатаційних витрат, складає до 72 %.

## **5.2. Встановлення мінімально-необхідних параметрів гравійної засипки системи вогнеперешкодження маслонаповнених трансформаторних підстанцій**

Ризик виникнення загоряння на підстанціях не настільки великий, але можливі наслідки пожежі можуть бути катастрофічними. Пожежі на підстанціях можуть виникати на трансформаторах, масляних вимикачах і в кабельному господарстві. Особливості розвитку пожеж трансформаторів залежать від місця його виникнення [157].

В Україні вимоги щодо непоширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях наведені у *Правилах улаштування електроустановок* [56], а саме зазначено, що на території відкритих розподільчих установок і підстанцій, на яких у нормальних умовах експлуатації із маслонаповнених силових трансформаторів і вимикачів у період проведення ремонтних та інших робіт можуть траплятися випадки витікання масла, потрібно передбачати пристрої для збирання і видалення масла для унеможливлення розтікання його по території і попадання у водойми.

Підпунктом 4.2.67 [56] передбачено, що для запобігання розтіканню масла і поширенню пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів (шунтувальних реакторів) з кількістю масла понад 1 т в одиниці (в одному баку) потрібно застосовувати маслоприймачі з відведенням масла

масловідводами в маслозбірники. Для трансформаторів (реакторів) потужністю до 10 МВ·А і маслонаповнених бакових вимикачів на напругу 110 кВ і вище дозволено виконувати маслоприймачі без відведення масла.

Об'єм маслоприймача з відведенням масла потрібно розраховувати на приймання 100 % масла, залитого в трансформатор (реактор).

Об'єм маслоприймача без відведення масла потрібно розраховувати на приймання 100 % масла, залитого в трансформатор (реактор), і 80 % води засобів пожежогасіння з розрахунку зрошення площ маслоприймача і бічної поверхні трансформатора (реактора) з інтенсивністю 0,2 л/см<sup>2</sup> протягом 30 хв.

Об'єм маслоприймача для бакових вимикачів потрібно розраховувати на приймання 80 % масла, яке знаходиться в одному баку.

Габарити маслоприймача повинні виступати за габарити одиничного устаткування не менше ніж на 0,6 м за маси масла до 2 т; 1,0 м – за маси масла понад 2 т до 10 т; 1,5 м – за маси понад 10 т до 50 т; 2,0 м – за маси понад 50 т. У цьому разі габарит маслоприймача дозволено приймати менше на 0,5 м з боку стіни або перегородки, розташовуваної від трансформатора (реактора) на відстані, меншій ніж 2,0 м.

Маслоприймачі з відведенням масла може бути виконано як заглибленого типу (дно – нижче рівня навколишнього планування землі), так і незаглибленого типу (дно – на рівні навколишнього планування землі).

Незаглиблений маслоприймач потрібно виконувати у вигляді бортових огорож маслонаповненого електроустаткування. Висота бортових огорож повинна бути не менше ніж 0,25 м і не більше ніж 0,5 м над рівнем навколишнього планування землі.

У разі виконання заглибленого маслоприймача облаштування бортових огорож дозволено не виконувати.

Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м.

Верхній рівень гравію (щебеню) повинен бути не менше ніж на 7,5 см нижче від верхнього краю борта (у разі улаштування маслоприймачів з бортовими огороженнями) або рівня навколишнього планування (у разі улаштування маслоприймачів без бортових огорожень).

Дозволено не засипати дно маслоприймачів по всій площі гравієм. У цьому разі на системах відведення масла від трансформаторів (реакторів) потрібно передбачати установаження вогнезагороджувачів.

Маслоприймачі без відведення масла в маслосбірник потрібно виконувати заглибленої конструкції з металевою решіткою, поверх якої потрібно насипати шар чистого гравію, промитого гранітного щебеню або непористого щебеню іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм товщиною, не менше ніж 0,25 м. Крім того потрібно передбачати пристрої для видалення масла і води з маслоприймачів і контролю наявності масла і води в маслоприймачі.

Облаштування маслоприймачів і масловідводів повинне унеможлилювати витікання масла чи масловодяної емульсії з одного маслоприймача в інший, розтікання масла по кабельних та інших підземних спорудах, поширення пожежі, засмічення масловідводу і забивання його снігом, льодом тощо.

Масловідводи повинні забезпечувати відведення з маслоприймача масла і води, застосовуваної для гасіння пожежі автоматичними стаціонарними установками, в об'ємі 50 % масла і повного об'єму води за час, не більший ніж 15 хв на безпечну в пожежному відношенні відстань від устаткування і споруд (але не меншу ніж 10 м). Масловідводи дозволено виконувати у вигляді підземних трубопроводів або відкритих кюветів і лотків.

Проведені теоретичні та експериментальні наукові дослідження в даній роботі [85, 143, 146] виявили можливість зміни умов розміщення гравійної засипки та її геометричних параметрів без зміни розміру фракції гравійної засипки та конструкції маслоприймача.

При цьому необхідно дотримуватися таких умов:

- дно маслоприймача, що засипається повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік приямка та бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним



щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм;

- висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м (рисунок 5.2).

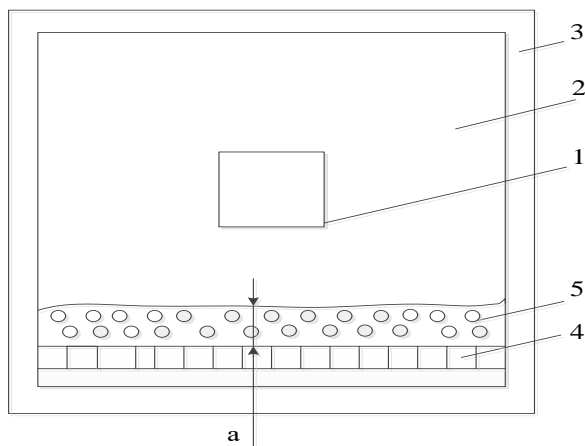


Рисунок 5.2 – Схема улаштування гравійної засипки у маслоприймачі (вид зверху):

1 – трансформаторна підстанція, 2 – маслоприймач, 3 – бортове огородження,  
4 – сітка масловідводу, 5 – гравійна засипка, а – ширина гравійної засипки

Під шириною гравійної засипки слід вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслозбірник для аварійного зливу.

За результатами проведених досліджень розроблено методичну базу, що є підґрунтям для створення нормативного забезпечення щодо визначення мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

У результаті чого сформульовано пропозиції щодо внесення змін до *Правил улаштування електроустановок (ПУЕ)*, а саме: вважаємо за доцільне дев'ятий абзац п. 4.2.67 [56] викласти в такій редакції:

*«Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. При цьому, висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м. Під шириною гравійної засипки слід*

*вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу».*

Для порівняння сформульованої пропозиції й існуючої редакції дев'ятого абзацу п. 4.2.67 *Правил улаштування електроустановок* [56] запропоновану зміну наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Зміст пропозиції в абзац дев'ятий  
п. 4.2.67 *Правил улаштування електроустановок* [56]

| Існуюча норма  | Запропонована зміна   |
|--|---|
| <p>Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік напрямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м.</p> | <p>Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,05 м/м, у бік напрямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. <i>При цьому, висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м. Під шириною гравійної засипки слід вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу.</i></p> |

Запропоновані пропозиції щодо внесення змін до *Правил улаштування електроустановок*, подані в редакції Національної енергетичної компанії «Укренерго», наведено в додатку Д.

### 5.3. Висновки за п'ятим розділом

Економічний ефект від запропонованих технічних рішень порівняно з існуючими підходами за розрахунком техніко-економічного обґрунтування параметрів гравійної засипки у маслоприймачах маслонаповнених трансформаторних підстанцій на прикладі довготривалої експлуатації для міста Києва, з урахуванням зменшення кількості щебеню й експлуатаційних витрат, складає до 72 %.

На основі отриманих результатів досліджень і розроблених методичних підходів до прогнозування ефективності системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій на відміну від застосовуваних на практиці унормованих вимог щодо запобігання розвитку пожеж на таких об'єктах встановлено мінімально-необхідні параметри гравійної засипки маслоприймача. У результаті чого сформульовано пропозиції щодо внесення змін до *Правил улаштування електроустановок (ПУЕ)*, а саме:

1) дно маслоприймача, що засипається, повинне мати ухил не менше ніж 0,05 м/м у бік приямка та бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи фракцією від 30 мм до 70 мм;

2) висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м. Під шириною гравійної засипки слід вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння масла в маслосбірник для аварійного зливу.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеним науковим дослідженням, наведено результати вирішення актуального науково-прикладного завдання, що пов'язане з локалізацією пожеж на маслонаповнених трансформаторних підстанціях на основі розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача, що є обґрунтованою теоретичною базою та створює передумови для підвищення ефективності системи вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях в умовах пожежі; при цьому одержано такі науково-практичні результати:

1. За результатами аналізу сучасного стану припинення горіння й обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях встановлено, що основним елементом системи вогнеперешкодження є гравійна засипка з необґрунтованими параметрами, утримання якої по всій площі маслоприймача є трудомістким та економічно затратним, тому існує необхідність з розроблення методів прогнозування ефективності системи вогнеперешкодження маслонаповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі.

2. Обґрунтовано перелік найбільш значущих параметрів, що впливають на охолодження та припинення горіння трансформаторного масла, а саме: висота гравійної засипки; ширина гравійної засипки; ухил маслоприймача у бік маслозбірника.

За результатами лабораторних досліджень із визначення показників пожежної небезпеки трансформаторного масла встановлено, що безпечна температура, до якої має бути охолоджено трансформаторне масло, становить 150 °С, що і обрано за критерій ефективності охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкодження трансформаторної підстанції.

3. Розроблено математичну модель процесу тепломасообміну у потоках трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції під час пожежі та проведено чисельний експеримент, у результаті чого виявлено закономірності охолодження трансформаторного масла до безпечного значення температури у 150 °С.

4. На основі проведеного повного факторного експерименту запропоновано математичну модель залежності температури охолодження трансформаторного масла, що горить, у маслоприймачі, від ширини ( $d$ ), висоти ( $h$ ) гравійної засипки та ухилу ( $i$ ) у вигляді:

$$\theta = 333,8 - 0,16d - 0,21h - 847,8i + 0,00039dh + 2,52di - 0,1hi - 0,0084dhi$$

5. Розроблено методику експериментальних досліджень охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкоджання трансформаторної підстанції та проведено відповідні експерименти, у ході яких отримано розподіл температур по ширині гравійної засипки.

6. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що залежність зниження температури трансформаторного масла, що горить, залежно від відстані (ширини  $d$ ), яку воно проходить від входу у гравійну засипку маслоприймача до маслозбірника, описується поліноміальною залежністю 3-го порядку, що має вигляд:

$$\Delta\theta = 263,16 - 39,1d + 2,7d^2 - 0,005d^3$$

7. При порівнянні експериментальних досліджень із результатами, що отримані розрахунковим шляхом, доведено адекватність результатів розрахунку, оскільки відносні відхилення не перевищують 4 %, а критерій Фішера не перевищує критичних значень.

8. На основі отриманих результатів досліджень, на відміну від існуючих вимог щодо запобігання розтіканню масла та поширенню пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів, обґрунтовано параметри гравійної засипки системи вогнеперешкоджання трансформаторної

підстанції, за яких температура трансформаторного масла знижується до безпечної величини (від 250 °С до 150 °С), а саме: мінімальні розміри гравійної засипки: ширина 1500 мм, висота 250 мм, ефективний ухил маслоприймача у бік маслозбірника 0,05 м/м.

9. Розроблено методичні підходи до прогнозування ефективності системи перешкоджання пожежі маслонаповнених трансформаторних підстанцій, що стало науковим підґрунтям для їх проектування. Також під час виконання роботи створено експериментальний стенд, що дозволяє досліджувати процеси тепломасообміну трансформаторного масла у гравійній засипці маслоприймача.

10. Результати проведених досліджень впроваджені у практичну діяльність компанії ТОВ «Проенерджі», головним напрямом якої є проектування повітряних ліній електропередачі, підстанцій та інших об'єктів електромереж напругою 35-750 кВ, а також науково-випробувального центру Інституту держаного управління та наукових досліджень з цивільного захисту (м. Київ) у сфері проведення випробувань на пожежну небезпеку. Результати проведених досліджень також впроваджені у діяльність Департаменту запобігання надзвичайним ситуаціям Державної служби України з надзвичайних ситуацій і в освітній процес Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України за освітньо-науковою програмою «Пожежна безпека» підготовки здобувачів третього рівня вищої освіти (доктор філософії) під час вивчення дисциплін «Моделювання процесів горіння».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13 квітня 2017 р. № 2019-VIII. *Офіційний вісник*, 2017, № 49, ст. 1506.
2. Про засади функціонування ринку електричної енергії України: Закон України від 24 жовтня 2013 р. № 663-VII. *Офіційний вісник*, 2013, № 95, ст. 3521.
3. Про затвердження Порядку підготовки системним оператором плану розвитку об'єднаної енергетичної системи України на наступні десять років та Порядку оприлюднення плану розвитку об'єднаної енергетичної системи України на наступні десять років: наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 29 вересня 2014 р. № 680 (zareєстрований у Мін'юсті 01.12.2014 за № 1532/26309). *Офіційний вісник України*, 2014, № 99, ст. 2938.
4. План розвитку Об'єднаної енергетичної системи України на 2016-2025 роки. К.: ДП «Національна енергетична компанія «Укренерго», 2016. 91 с.
5. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність: розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. *Урядовий кур'єр*, 2017, № 167.
6. Інтегрований звіт за 2017 рік. Фінансові та нефінансові результати. К.: Група ДТЕК. 146 с.
7. Інтегрований звіт за 2020 рік. Фінансові та нефінансові результати. К.: Група ДТЕК. 200 с.
8. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: в 2 книгах; кн. 1. М.: Химия, 1990. 496 с.
9. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013-2016 роки: Статистичний збірник аналітичних матеріалів. За заг. ред. В.С. Кропивницького. К.: УкрНДІЦЗ, 2018. 100 с.
10. Климась Р.В., Михайлова А.В., Матвійчук Д.Я. Результати розрахунків імовірності виникнення пожеж у будівлях і спорудах різного призначення. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 2 (22), 2010. С. 173-176.

11. Бегун В.В., Науменко І.М. Безпека життєдіяльності: [навч. посіб.]. К.: УАННП «Фенікс», 2004. 328 с.

12. Державна служба України з надзвичайних ситуацій: офіційний веб-портал. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dsns.gov.ua>.

13. Телевізійна служба новин: офіційний веб-портал. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://tsn.ua/video/video-novini/spalahnula-meksikanska-pidzemka-schonaumenshe-30-osib-otruyilisya-dimom.html>.

14. Інформаційно-аналітичні матеріали Міністерства енергетики України щодо 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) (245293185).

15. Климась Р.В., Одинець А.В. Аналіз стану з пожежами та їх наслідків в Україні у 2020 році. *Пожежна та техногенна безпека*. К.: № 3 (90), 2021. С. 3-5.

16. ДСТУ 2815-94 Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни та визначення. Чинний від 1996-01-01. К.: Держстандарт України, 1994. 114 с.

17. Трансформатор. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансформатор>.

18. Power transformer. Wayback Machine: у Міжнародному електротехнічному словнику IECV 421-01-01. Publication date: 1990-10 (IEC 60050 International Electrotechnical Vocabulary).

19. Семичаевский С.В. О пожарной опасности трансформаторов и маслонеполненных аппаратов на энергетических объектах. *Охорона праці і пожежна безпека*. К.: № 2 (лютий), 2017. С. 64-69.

20. Adrian Haenni Early Fire Detection on Power Transformers: White Paper. Zollikofen, Switzerland: Securiton AG. January, 2017. 12 p.

21. Risk Equals Probability Times Consequences, Arne Petersen, AP Consulting, April, 2014. *Transmission & Distribution World*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://tdworld.com/substations/risk-equals-probability-times-consequences>.



22. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Risk and Consequences of Transformer Explosions and Fires in Nuclear Power Plants. *Journal of KONBiN*. Warszawa: No. 3 (23), 2012. Pp. 5-16. DOI: <https://doi.org/10.2478/jok-2013-0034>.

23. Авария в энергосистеме в Москве 2005 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария\\_в\\_энергосистеме\\_в\\_Москве\\_2005](https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария_в_энергосистеме_в_Москве_2005).

24. Кашолкин Б.И., Мешалкин Е.А. Тушение пожаров в электроустановках. М.: Энергоатомиздат, 1985. 112 с.

25. Варнакова Д.А. Тушение пожаров на трансформаторных подстанциях. *Научный Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. М.: Академия ГПС МЧС России, вып. № 6 (70), 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.academygps.ucoz.ru/ttb/2016-6/2016-6.html>.

26. Филянович Л.П., Злотникова Е.М., Яковчик Е.В. Пожарная опасность силовых трансформаторов. *Новые материалы и технологии их обработки*: сборник научных работ XVI Республиканской студенческой науч.-техн. конференции. Минск: БНТУ, 2015. С. 243-244.

27. Черкасов В.Н., Зыков В.И. Пожарная безопасность электроустановок: учебник; под общ. ред. В.Н. Черкасова. 5-е изд. перераб. и доп. М.: Академия ГПС МЧС России, 2012. 391 с.

28. Хисматуллин А.С., Камалов А.Р. Повышение эффективности системы охлаждения мощных силовых трансформаторов. *Фундаментальные исследования*. Пенза: № 6 (часть 2), 2015. С. 316-319.

29. Камалов А.Р., Хисматуллин А.Г., Хайруллина Д.Д., Хисматуллин А.С. Повышение эффективности охлаждения силовых масляных трансформаторов при помощи элегаза. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. М.: № 1, 2017. С. 54-56.

30. Соколов В.В. Проблемы надежности мощных трансформаторов после длительной эксплуатации. *Трансформаторостроение*: Тезисы докладов XI международной науч.-техн. конф. Запорожье: ОАО ВИТ, 2005. С. 12-15.

31. V. Sokolov et. al. Reliability problems in large power transformers and shunt reactors, typical failure modes and failure causes, CIGRÉ A2 Colloquium, Moscow, Russia, 2005.

32. Зозуля Д.В. Разработка и научное обоснование технических предложений по повышению надёжности, энергетической эффективности и продлению ресурса трансформаторов ТНЦ-1250000/330 на блоках АЭС Украины. *Збірник: Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. Чорнобиль: вип. 20, 2013. С. 57-67.

33. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Reliability and vulnerability of transformers for electricity transmission and distribution. *Journal of Polish Safety and Reliability Association Summer Safety and Reliability Seminars*. Vol. 6, № 3, 2015. Pp. 15-24.

34. Heinz-Peter Berg, Nicole Fritze Risk and Consequences of Transformer Explosions and Fires in Nuclear Power Plants. *Journal of KONBiN*. Warszawa: No. 3 (23), 2012. Pp. 5-16. DOI: <https://doi.org/10.2478/jok-2013-0034>.

35. Marc Foata, Jean-Bernard Dastous Power Transformers Tank Rupture Prevention, CIGRÉ Session. Paris, 2010.

36. 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. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-11-5113>.

37. Ніжник В.В., Балло Я.В., Поздєєв С.В., Некора В.С. Оцінка обмеження поширення пожежі між житловим будинком та автозаправною станцією. *Науково-технічний збірник: Містобудування та територіальне планування*. К.: КНУБА. № 69, 2019. С. 278-290.

38. Душкин А.Л., Ловчинский С.Е., Рязанцев Н.Н. Экспериментальные исследования метода подавления возгорания маслonaполненного трансформатора тонкораспыленной водой. *Пожаровзрывоопасность*. М.: № 1 (25), 2016. С. 54-60. DOI: <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.01.54-60>.

39. Рожков А.В., Передня Д.А., Ройтман В.М. Защита масляных силовых трансформаторов установками водяного пожаротушения. *Пожары и чрезвычайные*

ситуації: предотвращение и ликвидация. М.: № 4 (18), 2018. С. 37-42.  
DOI: <https://doi.org/10.25257/FE.2018.4.37-47>.

40. Thomas Leibfried, Online monitors keep transformers in service. *IEEE Computer Applications in Power*. Vol. 11, Issue 3, 1998. Pp. 36-42.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/67.694934>.

41. Oleksandr Matuskevych, Mykola Khvorost, Viktoriya Malysheva Method for determining a technical resource of the power transformer of traction substations under operating conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Energy-saving technologies and equipment*. Kharkiv. Vol. 3, № 8 (87), 2017. Pp. 4-9. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017103750>.

42. Поляков М.А., Василевский В.В. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учёта индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора. *Електротехніка і електромеханіка*. Харків: № 3, 2014. С. 33-36.

43. Поляков М.А., Андрияс И.С., Конограй С.П., Василевский В.В. Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. Харків: № 5 (1281), 2018 С. 90-96.

44. Васин В.П., Долин А.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов. *ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. М.: № 3, 2008. С. 12-17.

45. Василевський В.В. Прогнозування строку служби силового трансформатора за допомогою комплексної моделі технічного стану целюлозної ізоляції: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.09.01 / Володимир Валентинович Василевський; [наук. керівник Поляков М.О.]; Нац. техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2019. 20 с. Бібліогр.: с. 16-18 (укр.).

46. Некора В.С., Стилик І.Г., Ніжник В.В. Аналіз нормативних підходів щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях. *Проблеми та перспективи розвитку системи*

*безпеки життєдіяльності*: Зб. наук. праць XVI Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2021. С. 84-85.

47. Булгаков А.Б. Охрана окружающей среды в электроэнергетике: учебное пособие. Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2020. 89 с.

48. Рекомендации по проектированию систем отвода масла от трансформаторов на подстанциях от 03.12.1990 № 11099ТМ-Т1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.texdokument.ru/katalog-ИТЕМ\\_7141/](http://www.texdokument.ru/katalog-ИТЕМ_7141/).

49. Масаев С.Н., Минкин А.Н., Едимичев Д.А. Оценка пожарных рисков и поражающих факторов закрытого распределительного устройства 220 кВ. *Научно-аналитический журнал: «Сибирский пожарно-спасательный вестник»*. Серия: *Пожарная и промышленная безопасность*. (05.26.03, технические науки). Железногорск: № 4 (11), 2018. С. 29-38.

50. NFPA (2020), NFPA 850 Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations, Quincy, MA, USA. 82 p.

51. NFPA (2010), NFPA 851 Recommended Practice for Fire Protection for Hydroelectric Generating Plants, Quincy, MA, USA. 27 p.

52. FM Global (2012), DS 5-4 Transformers, Norwood, MA, USA. 41 p.

53. CIGRE (June 2013), Guide for Transformer Fire Safety Practices, Working Group A2.33, Paris, France. 139 p.

54. IEEE (2012), IEEE 979 Guide for Substation Fire Protection, New York, USA. 99 p.

55. RailCorp (May 2010), EP 99 00 00 08SP Substations Fire Protection and Detection Standard, Sydney, Australia. 32 p.

56. Правила улаштування електроустановок. К.: Міненерговугілля України, 2017. 617 с.

57. Правила устройства электроустановок. Астана: Министерство энергетики и минеральных ресурсов республики Казахстан, 2015. 391 с.

58. Правила устройства электроустановок. М.: Министерство энергетики Российской Федерации, 2003. 499 с.

59. ТКП 339-2011 (02230) Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний. Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь. 2011. 600 с.

60. Transformer Fire Protection. Facilities Instructions, Standards and Techniques. Volume 3-32. [Протипожежний захист трансформатору. Інструкції з обслуговування, стандарти та методи]. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Denver, Colorado, January 2005. 43 p. (США).

61. Construction of 33/11kv substations. Section (1). Technical specifications [Будівництво підстанцій 33/11 кВ. Розділ 1. Технічні характеристики]. The Republic of Iraq Ministry of electricity (MoE) energy distribution office, March 2012. 222 p. (Республіка Ірак).

62. Guide for Transformer Fire Safety Practices [Практичний посібник з пожежної безпеки трансформаторів]. Working Group A2.33. Cigre, Paris, France, June 2013. 139 p. (Франція).

**63.** Климась Р.В., Балло Я.В. До питань підвищення ефективності запобігання поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених трансформаторів. International scientific and practical conference «*Technical sciences: the analysis of trends and development prospects*»: conference proceedings. Prague: «Baltija Publishing», 2021. С. 47-50. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-109-1-11>.

64. ДСТУ Б В.2.7-119:2011 Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній та аеродромний. Чинний від 2012-10-01. К.: Мінрегіон України, 2012. 59 с.

65. Державні будівельні норми ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення до проектування. Чинні від 2014-01-01. К.: Мінрегіон України, 2013. 180 с.

66. Климась Р.В., Ніжник В.В. Дослідження існуючих підходів до обмеження поширення пожеж на трансформаторних підстанціях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 31-33.

67. 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>.

68. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Издание 4-е перераб. и дополненное. М.: Энергоиздат, 1981. 415 с.

69. Гільчук А.В., Халатов А.А., Доник Т.В. Теорія теплопровідності: навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 4.56 Мбайт). К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 153 с.

70. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Курс теоретической физики. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.

71. Шмиг Р.А., Боярчук В.М., Добрянський І.М., Барабаш В.М.; за заг. ред. Р.А. Шмига. Теплопровідність. Львів, 2010. 222 с.

72. Баранов В.М., Коньяков А.Ю. Термодинамика и теплопередача: учебное пособие: 2-е изд., переработанное. Хабаровск: Издательство ДВГУПС, 2004. 91 с.

73. Терехнев В.В., Подгрушний А.В. Пожарная тактика. Екатеринбург: Издательство «Калан», 2007. 538 с.

74. Алексашенко А.А., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Тепломассоперенос при пожаре. М.: Стройиздат, 1982. 173 с.

75. Борисова А.С., Ніжник В.В. Сучасний стан щодо визначення критичного значення поверхневої густини теплового потоку. *Геотехнічна механіка*. № 152, 2020. С. 99-106.

76. Мала гірнича енциклопедія: у.3-х т. / за ред.. В.С. Білецького. Донецьк: Донбасс, 2004. Т. 1: А-К. 640 с.

77. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики: у 3-х т. / за ред. І.М. Кучерука. 2-ге вид. К.: Техніка, 2006. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. 532 с.

78. Ошовский В.В., Охрименко Д.И., Сысоев А.Ю. Использование компьютерных систем конечноэлементного анализа для моделирования гидродинамических процессов. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія*. Донецьк: вип. 15 (163), 2010. С. 163-173.

79. Пашков Л.Т. Основы теории горения: учебное пособие. М.: МЭИ (ТУ), 2002. 125 с.

80. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1959. 321 с.

81. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В., Шепелева А.І., Коврегін В.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина І. Харків: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2010. 309 с.

82. Тарахно О.В., Трегубов Д.Г., Жернокльов К.В., Шепелева А.І., Коврегін В.В. Теорія розвитку та припинення горіння. Практикум. Частина ІІ. Харків: НУЦЗУ, КП «Міська друкарня», 2010. 513 с.

83. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении: Учебное пособие. М.: Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.

84. Ніжник В.В. Розвиток наукових основ оцінювання небезпеки поширення пожежі на суміжні будівельні об'єкти: дис. ... доктора техн. наук: 21.06.02 / Ніжник Вадим Васильович. Харків, 2020. 409 с.

**85.** 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 [Обґрунтування мінімальних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції]. *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>.

86. 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>.
87. Пузач С.В. Математическое моделирование газодинамики и тепломассообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности: Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2002. 149 с.: ил.
88. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. 444 с.
89. Круковский П.Г. Обратные задачи тепломассопереноса (общий инженерный подход). К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 1998. 218 с.
90. G. Stokes On the theories of the internal friction of fluids in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids. *Mathematical and Physical Papers*. Cambridge: Cambridge University Press, September, 2010 (rint publication year: 2009; first published in: 1880). Pp. 75-129. DOI: <https://10.1017/CBO9780511702242.005>.
91. Коркодинов Я.А. Обзор семейства  $k$ - $\varepsilon$  моделей для моделирования турбулентности. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета*. Пермь: № 2, 2013. С. 5-16.
92. Сычѳв В.В. Дифференциальные уравнения термодинамики: 3-е изд., перераб. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 252 с.: ил.
93. Александренко М.В., Акулова М.В., Ибрагимов А.М. Математическое моделирование пожаров. *Международный научно-исследовательский журнал*. Серия: *Технические науки*. Екатеринбург. Вып. №4 (35), часть 1, 2015. С. 28-29.
94. Гордиенко Д.М., Шебеко Ю.Н., Малкин В.Л., Леончук П.А. Оценка влияния уклона и систем дренажа на величину пожарного риска при транспортировке легковоспламеняющихся и горючих жидкостей железнодорожным транспортом. *Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы: XXXI Междунар. науч.-практ. конф.* М.: ВНИИПО, 2019. С. 161-164.
95. Болодьян И.А., Барановский А.С., Карпов А.В. Моделирование развития пожара в автодорожных тоннелях: анализ влияния продольного уклона. *Тезисы*



*XV Всероссийского симпозиума по горению и взрыву. Том II / под ред. В.Г. Султанова, Е.А. Салганского. М.: ООО «Медиа-Мастер», 2020. С. 22-23.*

96. Welch S, Rubini P. SOFIE. Simulations of Fires in Enclosures / User Guide. South England, United Kingdom: Cranfield University, 1996. 340 p.

97. Bolodian I.A., Borodkin A.N., Karpov A.V., Ushakov D.V., Baranovski A.S., Abashkin A.A. CFD Modelling of Fires in Full-Scale Tunnels. *Fourth International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*. Paris, France, 2005. Pp. 668-672.

98. Шебеко Ю.Н., Малкин В.Л., Угорелов В.А., Леончук П.А. Влияние уклона территории и систем дренажа на величину пожарного риска при перевозке горючих жидкостей автомобильным транспортом. *Научно-технический журнал: Пожарная безопасность*. М.: № 1 (102), 2021. С. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipro.pb.2021.98.11.003>.

99. Болодьян И.А., Пузач С.В., Барановский А.С. Применение численного моделирования для оценки влияния продольного уклона в автотранспортном тоннеле на распространение опасных факторов пожара. *Научно-технический журнал: Пожарная безопасность*. М.: № 4 (105), 2021. С. 31-39. DOI: <https://doi.org/10.37657/vniipro.pb.2021.95.98.003>.

100. Лукиных А.А., Лукиных Н.А. Таблицы для гидравлического расчёта канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского. Изд. 4-е, доп. М.: Стройиздат, 1974. 156 с.

101. 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.

102. Рожков А.В., Передня Д.А., Дюжаков О.А. Экспериментальное исследование тушения масляных силовых трансформаторов. *Технологии техносферной безопасности*. М.: № 2 (84), 2019. С. 27-34. DOI: <https://doi.org/10.25257/TTS2019.84.27-34>.

103. Семичаєвський С.В., Копильний М.І. Аналіз підходів щодо визначення площі аварійних розливів горючих рідин. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. К.: т. 1, № 16 (78), 2019. С. 60-63.

104. Гурьянова Н.Н. Процесс горения органических жидкостей в условиях аварийного разлива /дис. ... канд. техн. наук. М.: МИХТ, 1984. 189 с.

105. Иванов Е.Н. Противопожарная защита открытых технологических установок / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1986. 286 с.

106. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Количественный анализ риска возможных разливов нефти и нефтепродуктов. *Международный научный сборник: Управление промышленной и экологической безопасностью производственных объектов на основе риска*. Саратов: СГТУ. 2005. С. 135-160.

107. Семичаєвський С.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В. Щодо аварійного розливу горючих рідин. *Науковий журнал: Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. К.: Видавничий центр «Гельветика», т. 32 (71), № 3, 2021. С. 219-225.

108. O. Keski-Rahkonen, E. Eloranta, R. Huhtanen, Use of numerical simulation computer codes to fire problems in nuclear power plants in Finland. *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 125, Issue 3, March, 1991. Pp. 15-24.

109. Огурцов С.Ю., Семичаєвський С.В. К вопросу необходимости обоснования исходных данных для моделирования процессов горения турбинного масла. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (2), 2016. С. 44-48.

110. Горшков В.И. Тушение пламени горючих жидкостей. М.: Пожнаука, 2007. 267 с.

111. Блинов В.И., Худяков Г.Н. Диффузионное горение жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 1961, 208 с.

112. Павлов П.П., Хованова А.М. О горении нефти и нефтепродуктов со свободной поверхности. Баку: ЦНИПО, 1955, 79 с.

113. Bakhman N.N., Kondikov B.N., Streck L.Ya., Aldabaev L.I. Burning of liquid fuels; effect of burner on burning rate an measurement of quenching diameter. *Fuel*. London. Vol. 55, Issue 3, July, 1976, Pp. 243-249.

114. Блинов В.И., Худяков Г.Н. О влиянии ветра на скорость сгорания нефтепродуктов в резервуарах. Инф. письмо № 8 АН СССР, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского. М.: 1958. 12 с.

115. Семичаєвський С.В., Огурцов С.Ю. Експериментальне обґрунтування вихідних даних для моделювання горіння турбінної оливи марки ТП-22. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (4), 2017. С. 85-89.

**116.** Антонов А.В., Якименко О.П., Климась Р.В. Аналізування ефективності виконання функцій системами протипожежного захисту на основі даних досліджень особливо великих пожеж. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 1 (29), 2014. С. 4-10.

117. Гаврилюк А.Ф., Гудым В.И., Паснак И.В., Дурнота Т.П. Экспериментальное исследование показателей пожарной опасности моторных масел. *Научный журнал: Вестник Кокшетаутского технического института Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан*. Кокшетау: КТИ КЧС МВД РК, № 2 (22), 2016. С. 33-38.

118. Федоровський В.В., Веселівський Р.Б. Підходи до визначення температур спалаху та займання горючих рідин. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (2), 2016. С. 49-54.

119. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний від 2020-01-01. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 78 с.

120. Дуглас Драйздейл Введение в динамику пожаров / пер. с англ. Бомштейна К.Г.; под ред. Кошмарова Ю.А. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.

121. Балло Я.В., Яковчук Р.С., Ніжник В.В., Сізіков О.О., Кузик А.Д. Дослідження конструктивних параметрів протипожежних карнизів для запобігання поширенню пожежі фасадними конструкціями висотних будинків. *Збірник наукових праць: Пожежна безпека*. Львів: № 37, 2020. С. 16-23. DOI: <https://doi.org/10.32447/20786662.37.2020.03>.

122. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. М.: Издательство «Химия», 1966. 142 с.

123. Система моделирования движения жидкости и газа. FlowVision. Версия 2.5.4. Руководство пользователя. М.: ТЕСИС. 2008. 284 с.

124. Serhii Pozdieiev, Vadym Nizhnyk, Yurii Feshchuk, Valeriia Nekora, Oleksandr Nuianzin, Taras Shnal Investigation of the influence of the configuration of the fire furnace chamber on the temperature regime during the implementation of tests for fire resistance. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv. Vol. 4, № 1 (112), 2021. Pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239235>.

125. Львович Я.Е., Литвиненко Ю.В. Оптимизация в системах автоматизированного проектирования: учеб. пос. [Электронный ресурс]. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2015. 333 с. Режим доступа: <http://www.cchgeu.ru>.

126. R. Courant, K. Friedrichs, H. Lewy. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik. *Mathematische Annalen*. Т. 100, № 1, 1928. Pp. 32-74.

127. Килимник О.В. Применение методики оценки пожарного риска на электроподстанциях единой национальной электрической сети. *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики*. Отв. ред. Н.И. Воропай, А.Д. Тевяшев. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. С. 62-67.

128. Червенчук В.Д., Иванов А.Л. Термодинамика и теплопередача [электронный ресурс]: учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2016. 123 с. Режим доступа: <http://www.bek.sibadi.org/fulltext/esd242.pdf>.

129. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы: Учеб. пособие. М.: Наука, 1987. 600 с.

130. Гайдадин А.Н., Ефремова С.А. Применение полного факторного эксперимента при проведении исследований: метод. указания. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. 16 с.

131. Д. Мэтьюз, Г. Цинк, Д. Куртис. Численные методы. Использование Matlab. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 720 с.

132 Фельдман Л.П., Петренко А.І., Дмитрієва О.А. Чисельні методи в інформатиці. К.: Видавнича група ВНУ, 2006. 480 с.

133. Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А. Чисельні методи: навч. пос. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с.

134. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности). М.: Лёгкая индустрия, 1974. 262 с.

135. Жартовський В.М, Откідач М.Я., Орел В.П., Антонов А.В., Цапко Ю.В. Розроблення розрахунково-аналітичного методу визначення параметрів флегматизування горючих газових середовищ. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 1 (7), 2003. С. 21-27.

136. Шейх-Заде М.И. Вычислительный эксперимент, моделирующий категорирование производственных помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 1 (15), 2007. С. 52-55.

137. Валиев Э.В., Шейх-Заде М.И. Применение факторного анализа для выявления условий эксперимента, минимизирующих относительную погрешность определения константы равновесия образования комплексов с водородной связью. *Учёные записки Таврического национального университета им В.И. Вернадского. Серия: Биология, химия*. Симферополь: Том 25 (64), № 3, 2012. С. 267-270.

138. Дубовський С.В., Туваржієв В.К., Лінчевський Є.А., Коберник В.С. Багатофакторний аналіз і вибір когенераційних теплоелектростанцій потужністю до 25 МВт для інвестиційних проєктів. *Праці Інституту електродинаміки НАНУ*: К.: № 1, 2004 С. 99-108.

**139.** Климась Р.В., Ніжник В.В., Балло Я.В. Методика та обладнання експериментальних досліджень щодо обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті: Тези доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 123-124.

140. Аптов И.С., Хомяков М.В. Химические материалы в электрохозяйстве. М.: «Энергия», 1969, 280 с.: ил.

141. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1963. 408 с.

142. Справочник по гидравлике. Под реакцией Большакова В.А. К.: ИО «Вища школа», 1977. 280 с.

**143.** Климась Р.В., Ніжник В.В., Балло Я.В., Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б., Ільченко Н.М. Методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. *Науково-технічний збірник: Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура*. Харків: т. 4, вип. 164, 2021. С. 158-165. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-4-164-158-165>.

144. Про затвердження Правил безпеки праці в органах і підрозділах МНС України: наказ МНС України від 07 травня 2007 р. № 312. К.: МНС, 2007. 196 с.

145. Про затвердження Положення про службу охорони праці МНС України: наказ МНС України від 30 січня 2012 р. № 81 (zareєстрований у Мін'юсті 20.02.2012 за № 241/20554) *Офіційний вісник України*, 2012, № 19, ст. 717.

**146.** Климась Р.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф., Крикун О.М., Середа Д.В., Цимбалістий С.З. Експериментальні дослідження встановлення закономірності зниження температури і припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (12), 2021. С. 101-110. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2.101-110>.

147. IEC 60296:2003 Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear [міжнародний стандарт: Рідини для застосування в електротехніці. Невикористані нафтові ізоляційні масла для трансформаторів і вимикачів]. Edition 3.0, 2003-11. IEC, 2003. 23 p.

148. Харченко І.О., Коцюба А.М., Згуря В.І. Використання невизначеності результатів міжлабораторних порівняльних випробувань для оцінки

неоднорідності зразків під час міжлабораторних порівняльних випробувань. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 1 (13), 2006. С. 5-12.

149. Запольський Л.Л. Оцінювання результатів міжлабораторних порівняльних випробувань у галузі пожежної безпеки. *Пожежна безпека: теорія і практика*: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. С. 90-92.

150. Запольський Л.Л. До питання оцінювання результатів міжлабораторних порівняльних випробувань у галузі пожежної безпеки. *Пожежна безпека – 2011*: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗ України, 2011. С. 32-33.

151. 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.

152. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15: Учебный курс. СПб.: БГТУ Военмех, 2011. 345 с.

153. Романенко П.Н., Бубырь Н.Ф., Башкирцев М.П. Теплопередача в пожарном деле. М.: Высшая школа МВД СССР, 1969. 425 с.

154. Романенко П.Н., Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле. М.: ВИПТШ МВД РФ, 1977. 416 с.

155. Model Code on Fire Engineering. Brussels: European Convention for Constructional Steelwork. ECCS, 2001. 220 p.

156. План розвитку електричних мереж оператора системи розподілу ПРАТ «ДТЕК Київські електромережі» на 2020-2024 роки / технічний звіт, 2019. 208 с.

157. Амирханов Ф.Н. Пожарная безопасность на понижающих подстанциях. *Наука, техника и образование*. М.: № 4 (45), 2018. С. 40-42.

## ДОДАТКИ

### Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації

#### *Статті, що індексуються в міжнародних наукометричних базах (МНБ):*

1. **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. **Видання включено до МНБ – Index Copernicus, Google Scholar, Scientific Indexing Service.**

#### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

2. **Климась Р.В.**, Михайлова А.В., Матвійчук Д.Я. Результати розрахунків імовірності виникнення пожеж у будівлях і спорудах різного призначення. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 2 (22), 2010. С. 173-176.

3. Антонов А.В., Якименко О.П., **Климась Р.В.** Аналізування ефективності виконання функцій системами протипожежного захисту на основі даних досліджень особливо великих пожеж. *Науковий вісник УкрНДІПБ*. К.: № 1 (29), 2014. С. 4-10.

4. **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.

5. **Климась Р.В.**, Ніжник В.В., Балло Я.В., Хроменков Д.Г., Гулик Ю.Б., Ільченко Н.М. Методика експериментальних досліджень обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. *Науково-технічний збірник: Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура*. Харків: т. 4, вип. 164, 2021. С. 158-165.

6. **Климась Р.В.**, Ніжник В.В., Нікулін О.Ф., Крикун О.М., Серета Д.В., Цимбалістий С.З. Експериментальні дослідження встановлення закономірності зниження температури і припинення горіння трансформаторного масла залежно від параметрів гравійної засипки маслоприймача. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. К.: № 2 (12), 2021. С. 101-110.



**Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

7. **Климась Р.В.,** Балло Я.В. До питань підвищення ефективності запобігання поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених трансформаторів. International scientific and practical conference «*Technical sciences: the analysis of trends and development prospects*»: conference proceedings. Prague: «Baltija Publishing», 2021. Pp. 47-50.

8. **Климась Р.В.,** Ніжник В.В. Дослідження існуючих підходів до обмеження поширення пожеж на трансформаторних підстанціях. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист*: Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2021. С. 31-33.

9. **Климась Р.В.,** Ніжник В.В., Балло Я.В. Методика та обладнання експериментальних досліджень щодо обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції. *Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті*: Тези доповідей 9-ої Міжнародної науково-технічної конференції. Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 123-124.

10. **Климась Р.В.** Визначення безпечної величини температури трансформаторного масла. Scientific Collection «InterConf», (94): with the Proceedings of V International scientific and practical conference «*Science, education, innovation: topical issues and modern aspects*». Tallinn, Estonia: Üingu Teadus Juhatus, 2021. Pp. 574-578.

## **Додаток Б. Відомості про апробацію результатів дисертації**

1. Міжнародна науково-практична конференція «Technical sciences: the analysis of trends and development prospects»

Prague, Czech Republic: Czech Technical University in Prague, 02-03 липня 2021 р., форма участі – заочна.

2. XI Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»

м. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, 28-29 жовтня 2021 р., форма участі – очна (онлайн).

3. IX Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»

м. Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 17-19 листопада 2021 р., форма участі – очна (онлайн).

4. V Міжнародна науково-практична конференція «Science, education, innovation: topical issues and modern aspects»

Tallinn, Estonia: Ühingu Teadus Juhatus, 25-26 грудня 2021 р., форма участі – заочна.

## Додаток В. Акти впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор  
ТОВ «Проенерджі»



Олександр КАРПЕНКО

29 2021 року

### АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи

Климася Руслана Володимировича за темою:

«Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях»

Комісія у складі: голови комісії – Карпенка Олександра Васильовича та членів комісії – Коника Станіслава Вікторовича та Артющенко Володимира Олександровича склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи КЛИМАСЯ Руслана Володимировича за темою: «Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях» впроваджено у практичну діяльність компанії ТОВ «Проенерджі» під час проектування підстанцій та інших об'єктів електромереж напругою 35-750 кВ.

Голова комісії:



Олександр Карпенко

Члени комісії:

Станіслав Коник

Володимир Артющенко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Інституту державного  
управління та наукових досліджень  
з цивільного захисту,  
д-р наук з держ. упр., професор



Петро ВОЛЯНСЬКИЙ

2021 року

**АКТ**

впровадження результатів дисертаційної роботи

Климася Руслана Володимировича за темою:

«Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях»

Складено комісією:

голова комісії: начальник науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. КОВАЛЕНКО Віталій Володимирович;

члени комісії:

головний науковий співробітник науково-випробувального центру ІДУ НД ЦЗ, д-р техн. наук, ст. наук. співроб. ЖАРТОВСЬКИЙ Сергій Володимирович;

заступник начальника науково-випробувального центру – начальник відділу речовин і матеріалів ІДУ НД ЦЗ, канд. техн. наук, ст. досл. ДОБРОСТАН Олександр Васильович.

Комісія перевірила та цим Актом засвідчує, що результати дисертаційної роботи КЛИМАСЯ Руслана Володимировича за темою: «Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкоджання на маслонаповнених трансформаторних підстанціях» впроваджено у випробувальну діяльність науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту шляхом застосування розробленої методичної й експериментальної бази методів прогнозування ефективності системи вогнеперешкоджання маслонаповнених трансформаторних підстанцій в умовах пожежі.

Акт складено для надання в спеціалізовану вчену раду у зв'язку із захистом дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Голова комісії:

канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Віталій КОВАЛЕНКО

Члени комісії:

д-р техн. наук, ст. наук. співроб.

Сергій ЖАРТОВСЬКИЙ

канд. техн. наук, ст. досл.

Олександр ДОБРОСТАН

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Тимчасово виконуючий обов'язки  
директора Департаменту  
запобігання надзвичайним ситуаціям

Олександр ЧЕКРИГІН

\_\_\_\_\_ 2021 року



впровадження результатів дисертаційної роботи  
Климася Руслана Володимировича за темою:  
«Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння  
системою вогнеперешкодження на масло наповнених трансформаторних  
підстанціях»

Цей акт засвідчує, що результати дисертаційної роботи Климася Р.В. за темою: «Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях» впроваджено шляхом розроблення пропозицій щодо внесення змін до «Правил улаштування електроустановок» в частині уточнення ухилу дна маслоприймача у бік приямка технологічного майданчику та геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача.

Заступник начальника управління –  
начальник відділу по роботі з органами  
влади та стратегічними об'єктами  
управління пожежної безпеки  
Департаменту запобігання  
надзвичайним ситуаціям ДСНС України  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

Євген ЛІНЧЕВСЬКИЙ

«30» 12 2021 року

ЗАТВЕРДЖУЮ

Начальник Черкаського інституту  
пожежної безпеки імені Героїв  
Чорнобиля Національного університету  
цивільного захисту України,  
кандидат технічних наук, професор,  
генерал-майор служби цивільного захисту



Віктор ГВОЗДЬ

2022 року

**АКТ**

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
КЛИМАСЯ Руслана Володимировича на тему «Удосконалення методу  
прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження  
на маслонаповнених трансформаторних підстанціях»

Розробник Руслан КЛИМАСЬ, з однієї сторони, та начальник кафедри фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж, кандидат технічних наук, доцент Віталій НУЯНЗІН, з іншої сторони, склали цей акт про те, що результат дисертаційної роботи на тему «Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслонаповнених трансформаторних підстанціях» мають теоретичне та практичне значення для освітнього процесу.

У дисертаційній роботі вдосконалено метод припинення й обмеження поширення пожежі на суміжні об'єкти та територією підприємств електричних мереж. Це дає змогу підвищити пожежну безпеку маслонаповнених трансформаторних підстанцій та підприємств енергетичних мереж.

З метою підвищення ефективності підготовки фахівців для ДСНС України результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес за освітньо-науковою програмою «Пожежна безпека» підготовки здобувачів третього (доктор філософії) рівня вищої освіти під час вивчення дисциплін «Моделювання процесів горіння» (протокол засідання кафедри фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж № 11 від «14» червня 2022 року). Впровадження результатів дисертаційної роботи забезпечує актуальний характер навчання та високий науково-методичний рівень викладання дисципліни, дозволяє підвищити якість проведення занять для здобувачів вищої освіти з питань, що стосуються припинення й обмеження поширення пожежі на суміжні об'єкти та територією підприємств електричних мереж.

Начальник кафедри:

Віталій НУЯНЗІН

Розробник:

Руслан КЛИМАСЬ

**Додаток Г. Протокол випробувань трансформаторного масла****ІНСТИТУТ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ТА НАУКОВИХ  
ДОСЛІДЖЕНЬ З ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ****ЗАТВЕРДЖУЮ**Начальник науково-  
випробувального центру  
канд. техн. наук, с. н. с.**Віталій КОВАЛЕНКО**

19 квітня 2021 року

**ПРОТОКОЛ**ВИПРОБУВАНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЗГІДНО З  
п. 6.1, п. 7.2.2, п. 7.5, п. 7.6, п. 7.7, п. 7.9 ДСТУ 8829:2019  
ЗРАЗКА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ТИПУ NUTRO 11GX

Київ-2021

**ВИПРОБУВАЛЬНИЙ ЦЕНТР:** Науково-випробувальний центр.

Адреса: 01011, м. Київ, вул. Рибальська, 18.

Телефон: (094) 831-81-07.

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ:** Пожежно-випробувальний полігон ІДУ НД ЦЗ (вул. Центральна, комплекс 60, с. Дмитрівка Києво-Святошинського району Київської області).

**ЗАМОВНИК ВИПРОБУВАНЬ:**

Випробування проведено у рамках виконання дисертаційних досліджень за темою: «Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження на маслonaповнених трансформаторних підстанціях».

**МЕТА ВИПРОБУВАНЬ:** Визначення показників пожежної безпеки згідно з ДСТУ 8829:2019 (температура спалаху у закритому тиглі, температура спалаху у відкритому тиглі, температура займання, температура самозаймання, група горючості) зразка трансформаторного масла типу Nymro 11GX виробництва шведської компанії Nynas AB.

**ОБ'ЄКТ ВИПРОБУВАНЬ:** Трансформаторне масло типу Nymro 11GX виробництва шведської компанії Nynas AB.

**ДАТА ОТРИМАННЯ ЗРАЗКА:** 02 квітня 2021 року.

**ЗРАЗОК ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ:** Випробуванням піддавали зразок трансформаторного масла типу Nymro 11GX. Прозора в'язка рідина. Зразок для випробувань був отриманий від ТОВ "Проенерджи" (м. Київ) у скляній тарі місткістю 1 л.

## 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ У ЗАКРИТОМУ ТИГЛІ ЗГІДНО З П. 7.5 ДСТУ 8829:2019

**Дата проведення  
випробувань:** 23 квітня 2021 року

**Умови у приміщенні:**  
температура повітря 16,2 °С  
атмосферний тиск 748 мм рт. ст.  
відносна вологість повітря 47 %.

**МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ:**

Суть методу випробувань полягає у нагріванні певної кількості речовини з заданою швидкістю, періодичному запалюванні парів, що виділяються, та встановленні факту наявності чи відсутності спалаху за фіксованої температури. Спалах парів над поверхнею кришки тигля не враховується.

Температура спалаху у закритому тиглі – це найменша температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полумене горіння (спалах) над частиною або над всією поверхнею речовини, яке триває протягом менше ніж 5 с після його видалення.

За температуру спалаху беруть середнє арифметичне значення температур, отриманих на трьох зразках, з поправкою на атмосферний тиск, що розраховується за формулою (1).

$$T_{сп.зт} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - p_a), \quad (1)$$

де:  $T_{сп.зт}$  – температура спалаху у закритому тиглі, °С;  
 $T_1, T_2, T_3$  – виміряні значення температур спалаху, °С;  
 $p_a$  – атмосферний тиск, кПа.

Метод реалізується в діапазоні температур від мінус 15 °С до 360 °С.



**ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:**  
Для випробувань використовували установку з визначення спалаху рідини (у Закритому тиглі) ТВЗ згідно з п. 7.5 ДСТУ 8829:2019 (свідоцтво про верифікацію № 69, термін дії до 07.2021 р.) і засоби вимірювальної техніки, які перелічено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Засоби вимірювальної техніки

| № з/п | Найменування ЗВТ             | Заводський номер | Діапазон вимірювання                                  | Клас точності, невизначеність/похибка засобу вимірювальної техніки  | Дата наступного калібрування/ повірки |
|-------|------------------------------|------------------|---|---|---------------------------------------|
| 1     | Термометр ТН-2М              | 204              | Від 0 °С до 360 °С<br>від 0 °С до 150 °С              | U = 1,16 °С<br>Δ = ± 0,5 °С   | 07.2021                               |
| 2     | Секундомір СОС пр. 2Б-2-000  | 4240             | Від 0 с до 3600 с;<br>від 0 с до 60 с;<br>більше 60 с | 2 клас точності; U = 0,163 с/<br>Δ = ± (0,4 · τ <sub>вим</sub> / 60) с;<br>U = (0,4 + 1,5 · (τ <sub>вим</sub> - 60) / 3540) с | 12.2021                               |
| 3     | Барометр-анероїд М67         | 927              | Від 610 мм рт. ст.<br>до 790 мм рт. ст.               | U = 0,52 мм рт. ст.<br>Δ = ± 1 мм рт. ст.   | 11.2021                               |
| 4     | Термогірометр "Testo" 608-H1 | 45038120         | Від 0 °С до 50 °С<br>від 2 % до 98 %                  | U = 0,3 °С/Δ = ± 0,5 °С<br>U = 1,3 %/Δ = ± 3 %  | 12.2021                               |

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ:** Результати випробувань з експериментального визначення температури спалаху у закритому тиглі зразка трансформаторного масла типу Nytro 11GX наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати випробувань зразка трансформаторного масла типу Nytro 11GX з експериментального визначення температури спалаху у закритому тиглі

| № зразка для випробувань | Швидкість нагрівання зразка, °С · хв. <sup>-1</sup> | Температура випробування, °С | Результат випробування на спалах |
|--------------------------|---|------------------------------|----------------------------------|
| 1                        | 6   | 142                          | спалах                           |
| 2                        | 6   | 140                          | спалах                           |
| 3                        | 6   | 140                          | спалах                           |

*Розширена невизначеність результату вимірювання температури спалаху складала ± 2,7 °С.*

Згідно з п. 7.5.4.1 ДСТУ 8829:2019 температура спалаху випробуваної рідини у закритому тиглі з урахуванням поправки на атмосферний тиск за формулою (1) приймається:

$$T_{сп.тл} = \frac{142 + 140 + 140}{3} + 0,27 \times (101,3 - 99,7) = 141,1 \text{ °С}$$

Значення температури спалаху випробуваної рідини у закритому тиглі (округлене до цілого числа) становить 141 °С.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ СПАЛАХУ У ВІДКРИТОМУ ТИГЛІ ЗГІДНО З П. 7.6 ДСТУ 8829:2019

**Дата проведення  
випробувань:** 23 квітня 2021 року

**Умови у приміщенні:**  
температура повітря 16,2 °С  
атмосферний тиск 748 мм рт. ст.  
відносна вологість повітря 47 %.

### МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ:

Суть методу випробувань полягає у нагріванні певної кількості речовини з заданою швидкістю, періодичному запалюванні парів, що виділяються, та встановленні факту наявності чи відсутності спалаху за фіксованої температури.

Температура спалаху у відкритому тиглі – це найменша температура, за якої під впливом подум'я газового пальника виникає полуменеве горіння (спалах) над частиною або над всією поверхнею речовини, яке триває протягом менше ніж 5 с після його видалення.

За температуру спалаху беруть середнє арифметичне значення температур, отриманих на трьох зразках, з поправкою на атмосферний тиск, що розраховується за формулою (2).

$$T_{\text{сп.вт}} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - p_a), \quad (2)$$

де:  $T_{\text{сп.вт}}$  – температура спалаху у відкритому тиглі, °С;

$T_1, T_2, T_3$  – виміряні значення температур спалаху, °С;

$p_a$  – атмосферний тиск, кПа.

Метод реалізується в діапазоні температур від мінус 15 °С до 360 °С.

### ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Для випробувань використовували установку з визначення спалаху рідини (у Відкритому тиглі) ТВО згідно з п. 7.6 ДСТУ 8829:2019 (свідоцтво про верифікацію № 68, термін дії до 07.2021 р.) і засоби вимірювальної техніки, які перелічено в таблиці 1.1.

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ:** Результати випробувань з експериментального визначення температури спалаху у відкритому тиглі зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати випробувань зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX з експериментального визначення температури спалаху у відкритому тиглі

| № зразка для випробувань | Швидкість нагрівання зразка, °С·хв. <sup>-1</sup> | Температура випробування, °С | Результат випробування на спалах |
|--------------------------|---|------------------------------|----------------------------------|
| 1                        | 6   | 149                          | спалах                           |
| 2                        | 6   | 150                          | спалах                           |
| 3                        | 6   | 151                          | спалах                           |

*Розширена невизначеність результату вимірювання температури спалаху склала  $\pm 2,8$  °С.*

Згідно з п. 7.6.4.1 ДСТУ 8829:2019 температура спалаху випробуваної рідини у відкритому тиглі з урахуванням поправки на атмосферний тиск за формулою (2) приймається:

$$T_{\text{сп.вт}} = \frac{149 + 150 + 151}{3} + 0,27 \times (101,3 - 99,7) = 150,4 \text{ °С}$$

Значення температури спалаху випробуваної рідини у відкритому тиглі (округлене до цілого числа) становить 150 °С.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗАЙМАННЯ ЗГІДНО З П. 7.7 ДСТУ 8829:2019

**Дата проведення  
випробувань:** 23 квітня 2021 року

**Умови у приміщенні:**  
температура повітря 16,2 °С  
атмосферний тиск 748 мм рт. ст.  
відносна вологість повітря 47 %.

#### МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ:

Суть методу випробувань полягає у нагріванні певної кількості рідини з заданою швидкістю, періодичному запалюванні парів, що виділяються, та встановленні факту наявності чи відсутності займання за умови фіксованої температури.

Температура займання – це температура, за якої під впливом полум'я газового пальника виникає полуменеве горіння парів рідини та триває протягом не менше ніж 5 с після його видалення.

За температуру займання беруть середнє арифметичне значення температур, отриманих на трьох зразках, з поправкою на атмосферний тиск, що розраховується за формулою (3).

$$T_{\text{займ}} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - p_a), \quad (3)$$

де:  $T_{\text{займ}}$  – температура займання, °С;

$T_1, T_2, T_3$  – виміряні значення температур займання, °С;

$p_a$  – атмосферний тиск, кПа.

Метод реалізується в діапазоні температур від мінус 15 °С до 360 °С.

#### ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Для випробувань використовували установку ТВО (Відкритий тигель) згідно з 7.6 ДСТУ 8829:2019 (свідоцтво про верифікацію № 68, термін дії до 07.2021 р.) і засоби вимірювальної техніки, які перелічено в таблиці 1.1.

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ:** Результати випробувань з експериментального визначення температури займання зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати випробувань зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX з експериментального визначення температури займання

| № зразка для випробувань | Швидкість нагрівання зразка, °С·хв. <sup>-1</sup> | Температура випробування, °С | Результат випробування на займання |
|--------------------------|---|------------------------------|------------------------------------|
| 1                        | 6   | 150                          | займання                           |
| 2                        | 6   | 156                          | займання                           |
| 3                        | 6   | 154                          | займання                           |

*Розширена невизначеність результату вимірювання температури займання склала ± 4,3 °С.*

Згідно з п. 7.7.4.1 ДСТУ 8829:2019 температура займання випробуваної рідини у відкритому тиглі з урахуванням поправки на атмосферний тиск за формулою (3) приймається:

$$T_{\text{займ}} = \frac{150 + 156 + 154}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - 99,7) = 153,8 \text{ °С}$$

Значення температури займання випробуваної рідини у відкритому тиглі (округлене до цілого числа) становить 154 °С.

#### 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ САМОЗАЙМАННЯ ЗГІДНО З П. 7.9 ДСТУ 8829:2019

Дата проведення  
випробувань: 23 квітня 2021 року

Умови у приміщенні:  
температура повітря 16,2 °С  
атмосферний тиск 748 мм рт. ст.  
відносна вологість повітря 47 %.

##### МЕТОД ВИПРОБУВАНЬ:

Суть методу випробувань полягає у введенні визначеного об'єму речовини у нагрітий до певної температури об'єм і встановленні факту наявності чи відсутності samozаймання за фіксованої температури.

Випробовування повторюють з різними температурами й об'ємами проб до досягнення мінімальної температури samozаймання.

Температура samozаймання – це найменша температура навколишнього середовища, за якої в умовах спеціальних випробувань спостерігається samozаймання речовини.

Відповідно до п. 7.9.2.6 ДСТУ 8829:2019 основну серію випробувань проводять з найлегше samozаймистою кількістю речовини через інтервали температур 2 °С до того часу, доки не буде визначена найменша температура, за якої спостерігається samozаймання зразка, а при температурі на 2 °С нижче при п'ятикратному повторюванні випробування samozаймання не відбувається.

За температуру samozаймання досліджуваної речовини беруть найменшу температуру випробувань, за якої спостерігалось samozаймання зразка в умовах, передбачених у п. 7.9.2.6 ДСТУ 8829:2019.

##### ВИПРОБУВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ:

Випробування проводили на установці СТС-2 згідно з п. 7.9 ДСТУ 8829:2019 (свідцтво про верифікацію № 83, термін дії до 07.04.2023 р.) із застосуванням засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), які перелічено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Засоби вимірювальної техніки

| № з/п | Найменування ЗВТ             | Заводський номер | Діапазон вимірювання                                  | Клас точності, невизначеність/похибка засобу вимірювальної техніки   | Дата наступного калібрування/повірки  |
|-------|------------------------------|------------------|---|--|---|
| 1     | Секундомір СОС пр. 2Б-2-000  | 4240             | Від 0 с до 3600 с;<br>від 0 с до 60 с;<br>більше 60 с | 2 клас точності; $U = 0,163 \text{ с}/$<br>$\Delta = \pm (0,4 \cdot \tau_{\text{вим}} / 60) \text{ с};$<br>$U = (0,4 + 1,5 \cdot (\tau_{\text{вим}} - 60) / 3540) \text{ с}$ | 12.2021   |
| 2     | Барометр-анероїд М67         | 927              | Від 610 мм рт. ст.<br>до 790 мм рт. ст.               | $U = 0,52 \text{ мм рт. ст.}$<br>$\Delta = \pm 1 \text{ мм рт. ст.}$   | 11.2021   |
| 3     | Термогірометр "Testo" 608-H1 | 45038120         | Від 0 °С до 50 °С<br>від 2 % до 98 %                  | $U = 0,3 \text{ °С}/\Delta = \pm 0,5 \text{ °С}$<br>$U = 1,3 \%/\Delta = \pm 3 \%$   | 12.2021   |
| 4     | ІВС "Термоконт"              | б/н              | Від 0 °С до 1200 °С                                   | $U = \pm 0,14 \text{ °С}/\Delta = \pm 0,35 \%$   | 12.2021   |
| 5     | Термопара ТХА                | б/н              | від 0 °С до 333 °С<br>від 334 °С до 1200 °С           | $U = 1,05 \text{ °С}$  | $\Delta = \pm 2,5 \text{ °С};$<br>$\Delta = \pm 0,0075 \cdot T_{\text{вим}}$<br>12.2021 |

**РЕЗУЛЬТАТИ ПОПЕРЕДНЬОЇ СЕРІЇ ВИПРОБУВАНЬ:** Результати попередньої серії випробувань з експериментального визначення температури samozаймання зразка трансформаторного масла типу Nuro 11GX наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати попередньої серії випробувань зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX з експериментального визначення температури самозаймання

| Кількість речовини у пробі, мл | Температура випробування, °С | Період індукції, с | Результат випробування на самозаймання |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------|--|
| 1,2                            | 200                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 220                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 240                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 260                          | 35                 | самозаймання                           |
|                                | 280                          | 12                 | самозаймання                           |
| 0,8                            | 280                          | 5                  | самозаймання                           |
|                                | 270                          | 10                 | самозаймання                           |
|                                | 260                          | 14                 | самозаймання                           |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 255                          | 21                 | самозаймання                           |
| 1,0                            | 255                          | 34                 | самозаймання                           |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 254                          | 30                 | самозаймання                           |
|                                | 258                          | 24                 | самозаймання                           |
|                                | 262                          | 16                 | самозаймання                           |
| 0,6                            | 255                          | 16                 | самозаймання                           |
|                                | 253                          | 35                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 46                 | самозаймання                           |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 251                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |

**РЕЗУЛЬТАТИ ОСНОВНОЇ СЕРІЇ ВИПРОБУВАНЬ:** Результати основної серії випробувань з експериментального визначення температури самозаймання зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати основної серії випробувань зразка трансформаторного масла типу Nyro 11GX з експериментального визначення температури самозаймання

| Кількість речовини у пробі, мл | Температура випробування, °С | Період індукції, с | Результат випробування на самозаймання |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------|--|
| 0,6                            | 252                          | 40                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 56                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 38                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 44                 | самозаймання                           |
|                                | 252                          | 51                 | самозаймання                           |
| 0,6                            | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |
|                                | 250                          | –                  | самозаймання відсутнє                  |

*Розширена невизначеність результату вимірювання температури самозаймання складала  $\pm 2,9$  °С.*

Під час проведення випробувань за об'єму пробі 0,6 мл і температури 250 °С впродовж періоду часу 300 с самозаймання рідини не відбувалося. Згідно з п. 7.9 ДСТУ 8829:2019 температура самозаймання випробуваної рідини становить 252 °С.

По завершенню проведення кожного виду випробування зразок трансформаторного масла типу Nyro 11GX набував світло-жовтого кольору.

## 5. НЕПРЯМЕ ВИЗНАЧЕННЯ ГРУПИ ГОРЮЧОСТІ ЗГІДНО З П. 6.1 ТА П. 7.2.2 ДСТУ 8829:2019

Для непрямого визначення групи горючості рідин беруть результати експериментального визначення показників пожежної небезпеки за пп. 7.5, 7.6, 7.7, 7.9 ДСТУ 8829:2019.

За наявності температури займання рідину відносять до групи горючих.

За відсутності температури займання та наявності температури самозаймання рідини відносять до групи важкогорючих.

За відсутності температури спалаху, займання, самозаймання рідину відносять до групи негорючих.

Горючі рідини з температурою спалаху не більше ніж 61 °С у закритому тиглі або не більше ніж 66 °С у відкритому тиглі відносять до легкозаймистих. Особливо небезпечними називають легкозаймісті рідини з температурою спалаху не більше ніж 28 °С у закритому тиглі.

### ВИСНОВКИ:

1. За результатами випробувань згідно з п. 7.5 ДСТУ 8829:2019 температура спалаху випробуваної рідини у закритому тиглі становить 141 °С.

2. За результатами випробувань згідно з п. 7.6 ДСТУ 8829:2019 температура спалаху випробуваної рідини у відкритому тиглі становить 150 °С.

3. За результатами випробувань згідно з п. 7.7 ДСТУ 8829:2019 температура займання випробуваної рідини становить 154 °С.

4. За результатами випробувань згідно з п. 7.9 ДСТУ 8829:2019 температура самозаймання випробуваної рідини становить 252 °С.

5. Згідно з п. 6.1 та п. 7.2.2 ДСТУ 8829:2019 зразок трансформаторного масла типу Nuro 11GX виробництва шведської компанії Nupas AB є **горючою рідиною**.

Керівник випробувань:

Заступник начальника науково-дослідного центру  
протипожежного захисту – начальник відділу  
нормативно-технічного забезпечення



Юрій ФЕЩУК

Випробування провів:

Начальник відділу досліджень, статистики  
пожеж та надзвичайних ситуацій  
науково-дослідного центру  
протипожежного захисту



Руслан КЛИМАСЬ

Представник сектору метрології:

Начальник сектору метрології



Ігор СТИЛИК

**Додаток Д. Пропозиції до Правил улаштування електроустановок**

**Міністерство енергетики України  
ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
НАЦІОНАЛЬНА ЕНЕРГЕТИЧНА КОМПАНІЯ  
«УКРЕНЕРГО»**

**ПРОПОЗИЦІЇ  
до ПРАВИЛ УЛАШТУВАННЯ  
ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК**

**Київ – 2021**

| Ч.ч. | Структурний елемент | Чинна редакція  | Пропонована НЕК «Укренерго» редакція   | Обґрунтування рішення   |  |
|------|---------------------|---|--|---|--|
| 135  | 4.2.67              | <p><b>4.2.67</b></p> <p>...<br/> Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м.</p> <p>Верхній рівень гравію (щебеню) повинен бути не менше ніж на 7,5 см нижче від верхнього краю борта (у разі улаштування маслоприймачів з бортовими огороженнями) або рівня навколишнього планування (у разі улаштування маслоприймачів без бортових огорожень).</p> <p>Дозволено не засипати дно маслоприймачів по всій площі гравієм. У цьому разі на системах відведення масла від трансформаторів (реакторів) потрібно передбачати установлення вогнезагороджувачів.</p> <p>...</p> | <p><b>4.2.67</b></p> <p>...<br/> Дно оливоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м.</p> <p>Верхній рівень гравію (щебеню) повинен бути не менше ніж на 7,5 см нижче від верхнього краю борта (у разі улаштування оливоприймачів з бортовими огороженнями) або рівня навколишнього планування (у разі улаштування оливоприймачів без огорожень).</p> <p>Дозволено не засипати дно оливоприймача по всій площі гравієм або щебенем. У цьому разі в системі відведення оливи від трансформатора (реактора) потрібно передбачати вогнезагороджувач у вигляді гравійної засипки сітки оливовідводу.</p> <p>Сітка оливовідводу в оливоприймачі повинна бути засипана чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. Товщина гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а відстань від краю сітки оливовідводу до краю гравійної засипки – не менше ніж 1,5 м.</p> | <p>Департамент з промислової безпеки (п. 215 ЗК) пропонує:</p> <p>Дев'ятий абзац п. 4.2.67 ПУЕ викласти в наступній редакції:</p> <p>«Дно маслоприймача (заглибленого і незаглибленого) повинне мати ухил, не менше ніж 0,005, у бік приямка і бути засипаним чистим гравієм чи промитим гранітним щебенем або непористим щебенем іншої породи з частками розміром від 30 мм до 70 мм. При цьому, висота гравійної засипки повинна бути не менше ніж 0,25 м, а ширина не менше ніж 1,5 м. Під шириною гравійної засипки слід вважати відстань від краю сітки масловідводу до краю гравійної засипки. Гравійна засипка заданих параметрів улаштовується по всій довжині сітки масловідводу до потрапляння мастила в маслосбірник для аварійного зливу»;</p> <p>- одинадцятий абзац п. 4.2.67 ПУЕ вилучити.</p> | <p>Звіт про НДР Обґрунтувати мінімальні геометричні параметри (висота та периметр) засипки гравію у масло- приймачі над маслоприймальним каналом, яка повинна виконувати функцію вогнезагороджувача та охолодження мастила до температури спалаху, 150 градусів Цельсія в рамках розробки робочої документації по об'єкту «Реконструкція ПС 330 кВ Броварська з установкою АТ-3а» (параметри гравію ПС).</p> |



|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
|  |  |  | <p>Відділ підстанцій (п. 213 ЗК) пропонує:<br/>Одинадцятий абзац п. 4.2.67 ПУЕ<br/>вмкласти у вигляді:</p> <p><b>Дозволено не засипати дно</b><br/>маслоприймачів по всій площі гравієм або<br/>щебенем. У цьому разі на системах<br/>відведення масла від трансформаторів<br/>(реакторів) потрібно передбачати<br/>установлення вогнезагороджувачів у вигляді<br/>гравійної засипки сітки масловідводу.</p> <p>Стіна масловідводу в маслоприймачі<br/>повинна бути засипана чистим гравієм чи<br/>примитим гранітним щебенем або<br/>мелористим щебенем іншої породи з<br/>частками розміром від 30 мм до 70 мм. При<br/>цьому, товщина гравійної засипки повинна<br/>бути не менше ніж 0,25 м, а ширина від краю<br/>сітки масловідводу до краю гравійної<br/>засипки – не менше ніж 1,5 м по всій<br/>довжині сітки масловідводу.</p> <p>ВП «Будівництво і ремонт» (п. 214 ЗК)<br/>щодо пропозиції Департаменту з промислової<br/>безпеки НЕК «Укренерго» пропонує:<br/>Одинадцятий абзац п. 4.2.67 ПУЕ<br/>залишити без змін.</p> <p><b>Дозволено не засипати дно</b><br/>маслоприймачів по всій площі гравієм. У<br/>цьому разі на системах відведення масла від<br/>трансформаторів (реакторів) потрібно<br/>передбачати<br/>установлення<br/>вогнезагороджувачів.</p> <p>Пропозицію ураховано в редакції<br/>відділу підстанцій.</p> |
|--|--|--|---|