

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

КЛИМАСЬ Руслан Володимирович



УДК 614.841.3:621.314

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

21.06.02 – пожежна безпека

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2022

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій (м. Київ).

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
НІЖНИК Вадим Васильович,
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту,
начальник науково-дослідного центру протипожежного захисту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КОСТЕНКО Віктор Климентович,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри природоохоронної діяльності

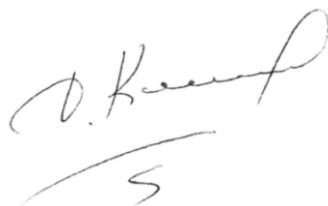
кандидат технічних наук, доцент
ВЕСЕЛІВСЬКИЙ Роман Богданович,
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
доцент кафедри наглядово-профілактичної діяльності та пожежної автоматики навчально-наукового інституту пожежної та техногенної безпеки

Захист відбудеться «02» грудня 2022 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

Автореферат розісланий «19» жовтня 2022 року

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук



Дмитро КОБИЛКІН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 $(0,80-0,89) \cdot 10^3$ кг/м³. Масло у таких установках використовується в якості охолоджувача, тобто у випадку аварійної ситуації або порушення регламенту технологічного процесу може виникнути перегрівання масла до температури більше 250 °С, 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 нормованим заходом щодо попередження розвитку таких пожеж є встановлення маслонаповнених трансформаторів у маслоприймачі. Дно маслоприймача 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 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 маслонаповнених трансформаторах, займалися такі вітчизняні та зарубіжні вчені як: Булгаков А.Б., Варнакова Д.А., Василевський В.В., Душкін А.Л., Зозуля Д.В., Кашолкін Б.І., Лінчевський Є.А., Мешалкін Є.О., Рожков А.В., Marc Foata. Питанням обмеження поширення пожеж на суміжні споруди, оцінювання ризиків виникнення пожеж на трансформаторних підстанціях присвячені роботи Антонова А.В., Ніжника В.В., Поздєєва С.В., Соколова В.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 вогнеперешкодження маслонаповнених 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 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» (держ. № 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 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;

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 вогнеперешкодження трансформаторної підстанції, що є обґрунтованою теоретичною базою для створення передумов удосконалення методу прогнозування ефективності таких систем на маслonaповнених 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 маслосбірника, 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 вогнеперешкодження 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 вогнеперешкодження маслонаповнених трансформаторних підстанцій.

Дістали подальшого розвитку:

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

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність досліджень полягає у розробленні методичної й експериментальної бази методів прогнозування ефективності системи вогнеперешкодження 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 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» 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 вогнеперешкодження маслонаповненої трансформаторної підстанції.

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 [1] встановлено залежності температури трансформаторного масла від геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції; в [2] 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 [3] за результатами вивчення процесів виникнення, перебігу та гасіння пожежі, що сталася 29.03.2013 у м. Світлодарськ Донецької області на Вуглегірській тепловій електростанції ПАТ «Центренерго», визначено причини неспрацювання системи пінного пожежогасіння, що захищала маслобаки

та кабельні канали машинного залу КТЦ № 1; у [4] проведено аналіз статистичних даних про пожежі на трансформаторному обладнанні, а також причин і передумов їх виникнення; в [5] розроблено методику експериментальних досліджень з обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції; в [6] проведено оцінювання результатів експериментальних досліджень, що дозволили обґрунтувати мінімальні геометричні параметри гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції; в [7] проаналізовано конструктивні параметри маслоприймачів трансформаторних підстанцій, що негативно впливають на ефективність обмеження поширення пожежі під час пошкодження маслонаповнених трансформаторів; у [8] 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 [9] 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-х міжнародних і національних наукових конференціях, 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» (Tallinn, 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.

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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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.

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.

Виявлено недоліки нормативних вимог щодо обмеження поширення пожежі під час аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях, наведених у *Правилах улаштування електроустановок*. Аналіз показав, що на території відкритих розподільних установок і підстанцій, на яких у нормальних умовах експлуатації у період проведення ремонтних та інших робіт можуть траплятися випадки витікання масла, для запобігання розтіканню масла і поширенню пожежі під час пошкодження маслонаповнених силових трансформаторів з кількістю масла понад 1 т в одиниці (в 1 баку) потрібно застосовувати маслоприймачі з відведенням масла масловідводами в маслосбірники.

Об'єм маслоприймача з відведенням масла потрібно розраховувати на приймання 100 % масла, залитого в трансформатор. Об'єм маслоприймача без відведення масла потрібно розраховувати на приймання 100 % масла, залитого в трансформатор, і 80 % води засобів пожежогасіння з розрахунку зрошення площ маслоприймача і бічної поверхні трансформатора (реактора) з інтенсивністю 0,2 л/см² протягом 30 хв. 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.

За результатами проведеного аналізу пожеж та їх наслідків, що виникають під час експлуатації маслонаповнених трансформаторів, вимог вітчизняної та зарубіжної нормативної бази щодо конструктивних параметрів площадок маслоприймачів 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.

Зокрема, проведений аналіз вітчизняних і зарубіжних наукових праць свідчить, що нормативні підходи щодо засипки гравієм всієї площі маслоприймача не мають відповідного наукового обґрунтування та прийняті з використанням експертного методу. Зазначене призводить, з одного боку, у разі надмірно зменшених параметрів маслоприймача – до можливості поширення пожежі територією трансформаторної підстанції та на суміжні об'єкти, повторного загоряння масла; з іншого боку, у разі надмірно збільшених параметрів маслоприймача – до необґрунтованих економічних витрат, зумовлених утриманням певного штату працівників і відповідного парку техніки, необхідного для промивання гравійної засипки.

Отже, існуючі підходи до обмеження поширення пожежі під час аварій на трансформаторних підстанціях не адаптовані та не апробовані для вирішення таких завдань, і повинні отримати подальший розвиток під час обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі, що забезпечують припинення горіння трансформаторного масла та зниження його температури нижче за температуру спалаху у 150 °С.

Виходячи з вищенаведеного, 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, а саме: висота, ширина, довжина гравійної засипки, фракція щебеню, ухил маслоприймача у бік маслозбірника, матеріал основи маслоприймача, матеріал засипки маслоприймача (його

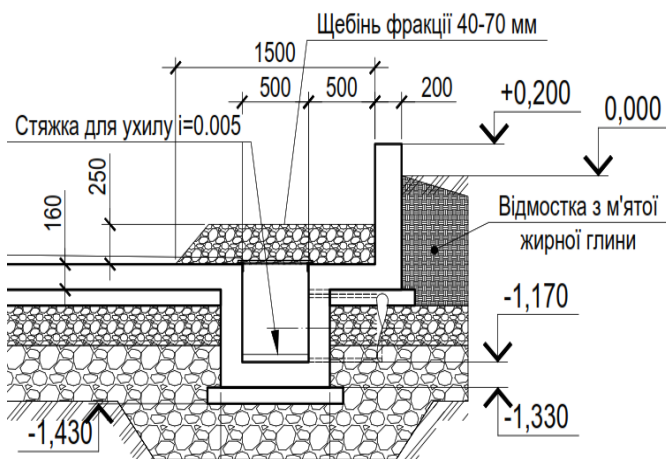


Рисунок 1 – Конструктивна схема типового вогнезагороджувача

горить, 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 (h), ширина гравійної засипки (d), ухил маслоприймача (i) 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 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для теоретичного описання процесу тепломасообміну між маслом, що горить, 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.

У векторному вигляді для нестисливої рідини їх записують у спосіб, визначений формулами (1-3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \times V] = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q_{rad}, \quad (3)$$

де: t – час;

ρ – густина;

V – вектор відносної швидкості;

p – відносний тиск;

μ – молекулярна динамічна в'язкість;

μ_t – турбулентна динамічна в'язкість;

λ – 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.

Турбулентну динамічну в'язкість (μ_t) визначали за найбільш поширеною стандартною k - ε моделлю за формулою (4):

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

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

ρ – густина;

ε – швидкість дисипації турбулентної енергії;

k – турбулентна енергія.

Статичну ентальпію (h) визначають за формулою (5):

$$h = h_0 + \int_{T_0}^T C_p dT + \sum_k Y_k H_k, \quad (5)$$

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.

Крім того, 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. Напрямок руху потоку масла співпадає з напрямом ухилу.

Розрахунки проводилися у програмному забезпеченні FlowVision 2.5.4.

Обґрунтування показника прийнятого критерію оцінювання ефективності системи припинення й обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях, тобто 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*. Визначення температури спалаху трансформаторного масла з поправкою на атмосферний тиск розраховувалося за формулою (6):

$$T_{cn.BT} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} + 0,27 \cdot (101,3 - p_a), \quad (6)$$

де: $T_{cn.BT}$ – температура спалаху у відкритому тиглі, °С;
 T_1, T_2, T_3 – виміряні значення температур спалаху, °С;
 p_a – атмосферний тиск, кПа.

Теоретичне визначення ефективного ухилу маслоприймача у бік маслозбірника проводилося за адаптивною формулою (7) для прямокутних каналів:

$$i = \frac{\lambda(a+b)}{2ab} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\varphi^{0,72}}{n_c}, \quad (7)$$

де: i – ухил маслоприймача;
 λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;
 n_c – шорсткість стінок;
 a, b – геометричні параметри лотка;
 φ – коефіцієнт переливу;
 g – прискорення вільного падіння;
 v – середня швидкість потоку.

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.

Розрахунок процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач проводився у 2 етапи. На першому етапі визначалася геометрична форма потоку масла крізь гравійну засипку (тепломасообмін між щебенем і маслом відсутній). На другому етапі проводився розрахунок температурного розподілу у потоці масла крізь щєбінь (тепломасообмін між щебенем і маслом враховувався).

Під час моделювання було прийнято, що щєбінь має однотипний розмір у ширину ≈ 35 мм та варіативний повздовжній розмір в інтервалі 35-70 мм. Параметри вогнеперешкоджувача повинні бути такими, що забезпечують охолодження масла нижче температури його спалаху, впродовж 15 хв незалежно від об'єму масла в трансформаторі.

Розрахункову схему розташування щєбеню у маслозбірнику, що наглядно демонструє розміщення щєбеню із заданими геометричними параметрами у просторі, наведено на рис. 2.

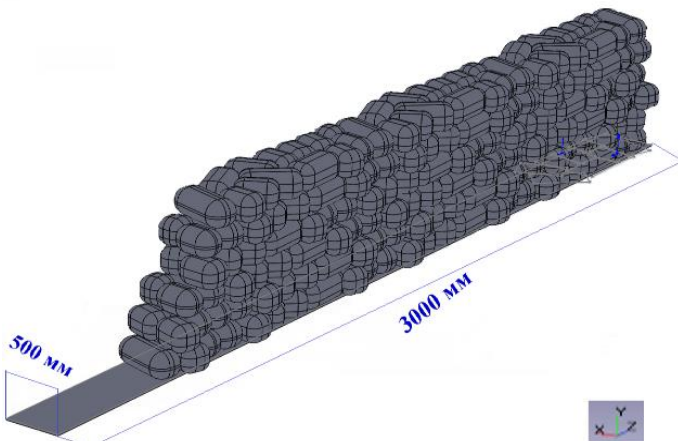


Рисунок 2 – Розрахункова схема розташування щєбеню у маслозбірнику

Геометричну схему розрахункової області (загальну й окрему для кожної області) під час проведення моделювання процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач наведено на рис. 3.

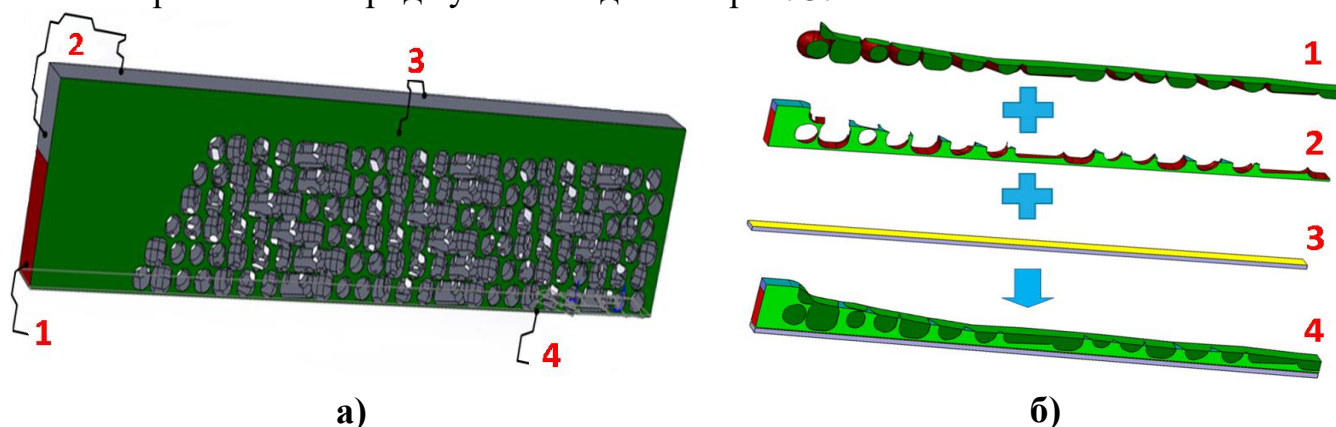


Рисунок 3 – Геометрична схема розрахункової області та її складові частини:
а) загальна схема розрахункової області:
 1) вхід масла зі сталою швидкістю 0,014 м/с;
 2) стінка з проковзуванням; 3) симетрія;
 4) вільний вихід масла
б) складові частини розрахункової області:
 1) область щебеню, що обтікається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

Під час проведення розрахунків процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач на першому етапі встановлено основні складові математичної моделі, перелік яких наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні складові математичної моделі процесу тепломасообміну 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 « $k-\varepsilon$ » модель
Метод чисельної апроксимації	Метод кінцевих різниць з адаптивною сіткою
Критерій автоматичного вибору кроку інтегрування	Критерій Куранта-Фрідріхса-Леві
Схема інтегрування	Явна схема
Розмір комірки сітки	Середнім кроком 0,2 м, кубічна

Для проведення моделювання процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач прийнято фізичні властивості масла та початкові умови, що наведено у таблиці 2 за нормальних умов навколишнього середовища.

Таблиця 2 – Фізичні властивості масла та початкові умови моделювання

Фізичні властивості масла	
Динамічна в'язкість (μ), Па·с	0,001
Густина (ρ), кг/м ³	870
Поверхневий натяг (η), мН/м	30
Теплофізичні властивості масла	
Коефіцієнт теплопровідності (λ), Вт/(м·°С)	0,11
Питома теплоємність (C_p), Дж/(кг·°С)	1680
Початкова температура масла (T_0), °С	20

Теплофізичні властивості породи щебеню (граніту) та основи лотку (бетону) наведено у таблиці 3.

Таблиця 3 – Теплофізичні властивості граніту та бетону

Теплофізичні властивості граніту	
Коефіцієнт теплопровідності (λ), Вт/(м·°С)	2
Питома теплоємність (C_p), Дж/(кг·°С)	850
Густина (ρ), кг/м ³	2600
Теплофізичні властивості бетону	
Коефіцієнт теплопровідності (λ), Вт/(м·°С)	1,6
Питома теплоємність (C_p), Дж/(кг·°С)	950
Густина (ρ), кг/м ³	2500

Результати першого етапу розрахунку процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач графічно зображено на рис. 4.

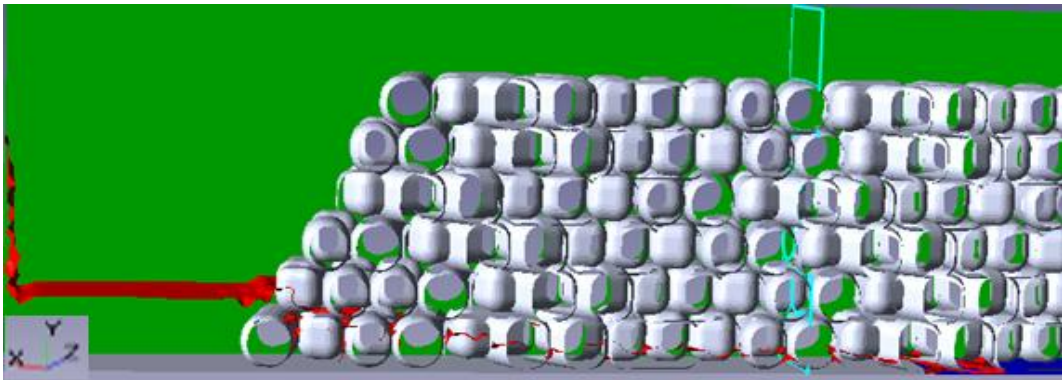


Рисунок 4 – Графічне зображення результату I етапу розрахунку

Граничні умови процесу протікання трансформаторного масла через вогнезагороджувач наведено на рис. 5.

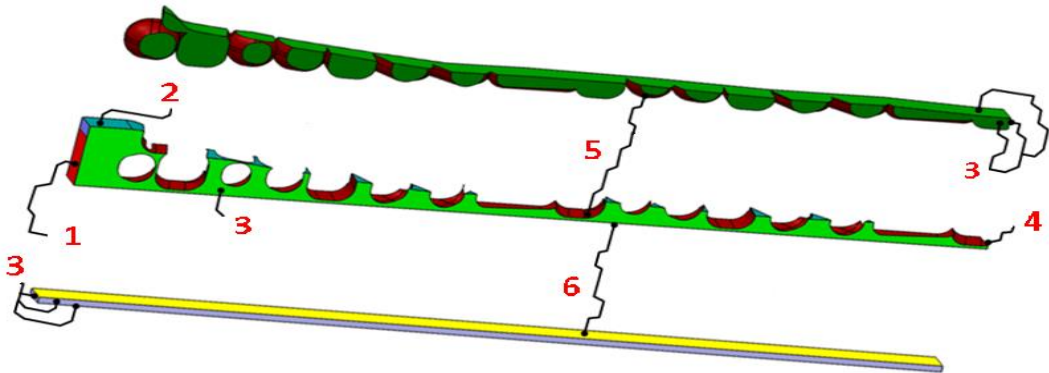


Рисунок 5 – Граничні умови процесу протікання трансформаторного масла:

- 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

Результати другого етапу розрахунку процесу проходження трансформаторного масла через вогнезагороджувач графічно зображено на рис. 6.

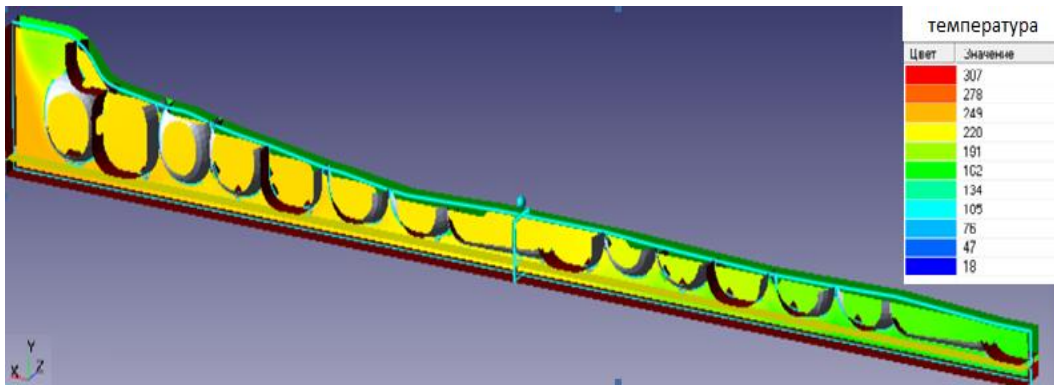


Рисунок 6 – Графічне зображення результату II етапу розрахунку

Графік розподілу температури трансформаторного масла у розрахунковій області наведено на рис. 7.

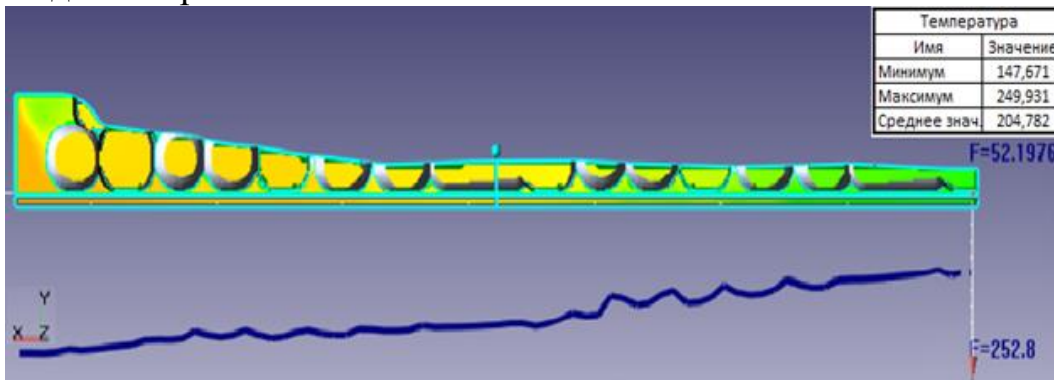


Рисунок 7 – Розподіл температури трансформаторного масла у розрахунковій області

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 шириною (d) 1500 мм і висотою (h) 250 мм охолоджується до температури (θ) 148 °С.

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 (i) для таких умов, який варіює у межах від 0,045 м/м до 0,05 м/м (рис. 8).



Рисунок 8 – Залежність витрати масла під час проходження гравійною засипкою від ухилу маслоприймача

Такий ухил забезпечує ефективне відведення масла в аварійну ємкість упродовж нормативного часу, а також забезпечує 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.

Для визначення залежності зниження температури трансформаторного масла від

геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції проведено повний факторний обчислювальний експеримент для попередньо визначених параметрів: 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 (8):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (8)$$

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 4.

Таблиця 4 – Матриця планування повного факторного 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 проєктних сценаріїв пожежі розливу масла, що наведені у таблиці 5.

Таблиця 5 – Розрахункові значення температур трансформаторного масла залежно від геометричних параметрів гравійної засипки у маслоприймачі трансформаторної підстанції

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 (9), визначено константи рівняння числової регресії, що наведені у таблиці 6.

$$\begin{aligned}
b_0 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \theta_i; & b_1 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d \cdot \theta_i; & b_2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h \cdot \theta_i; \\
b_3 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i \cdot \theta_i; & b_4 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dh \cdot \theta_i; & b_5 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N di \cdot \theta_i; \\
b_6 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N hi \cdot \theta_i; & b_7 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N dhi \cdot \theta_i,
\end{aligned} \tag{9}$$

де: $N = 8$ – кількість проєктних сценаріїв згідно з планом експерименту;
 d, h, i – значення параметрів згідно з матрицею планування (див. табл. 4);
 θ – значення температури трансформаторного масла (див. табл. 5).

Таблиця 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 (10):

$$\theta = 333,8 - 0,16d - 0,21h - 847,8i + 0,00039dh + 2,52di - 0,1hi - 0,0084dhi \tag{10}$$

У **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень з обґрунтування мінімальних геометричних параметрів гравійної засипки маслоприймача трансформаторної підстанції, проведених за попередньо розробленою методикою.

Сутність методики експериментальних досліджень 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 масла в аварійну ємкість (маслозбірник).

Експеримент імітує аварійну ситуацію у трансформаторі за підвищення температури масла до аварійного значення ($T_{\text{самозаймання}} \approx 250$ °С), його розгерметизацію з подальшим виливом масла у маслоприймач із послідуєчим загорянням масла. Враховуючи, що трансформаторне масло є горючою рідиною, показники його пожежної небезпеки було експериментально визначено шляхом проведення випробувань згідно з ДСТУ 8829:2019, у результаті чого з'ясовано, що $T_{\text{спалаху}}$ зразку трансформаторного масла типу Nyro 11GX, який використовувався в дослідженнях, складає 150 °С. Це дозволило визначити діапазон зниження значення температури трансформаторного масла: від аварійного значення до нижчої за $T_{\text{спалаху}}$ шляхом його охолодження, проходженням у маслоприймачі гравійною засипкою, що і стало критерієм оцінювання ефективності системи припинення й обмеження поширення пожежі у разі виникнення аварій на маслонаповнених трансформаторних підстанціях.

Дослідження проводилися за температури навколишнього середовища: 30 °С, відносній вологості повітря: 65 % й атмосферного тиску: 101,3 кПа.

Дослідний стенд складається з трьох основних блоків, схему якого наведено на рис. 9.

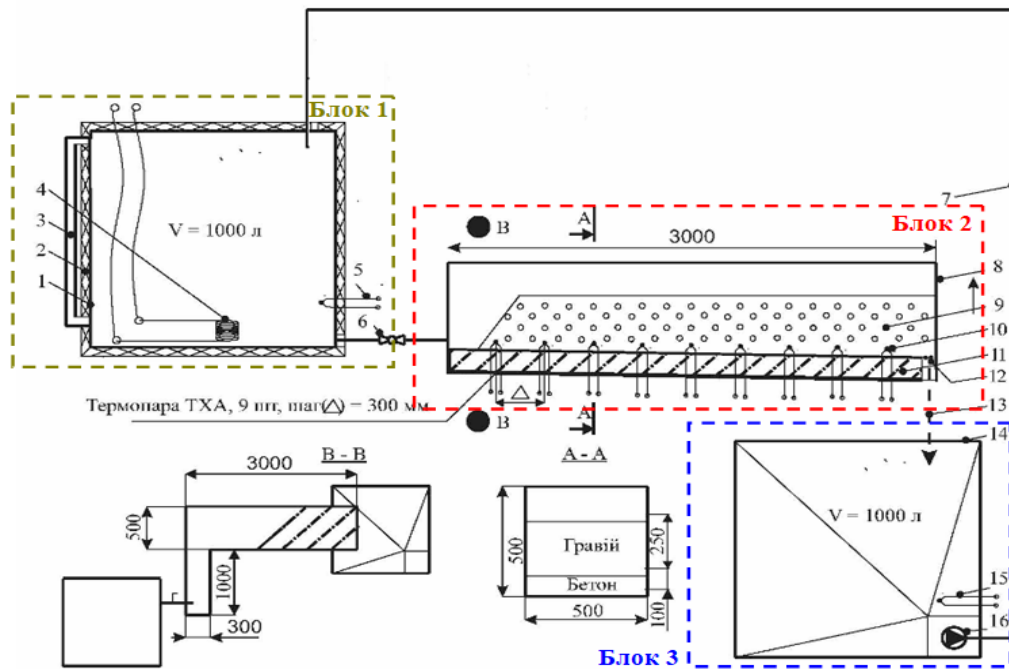


Рисунок 9 – Схема дослідного стенду:

- 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 – шар бетону; 12 – сітка; 13 – траєкторія зливання масла в аварійну ємкість;
 14 – корпус аварійної ємкості; 15 – термопара; 16 – шестеренчастий насос

Блок 1, що імітує аварію в маслонаповненому трансформаторі, складається з ємкості об'ємом 1000 л, в яку заливалося масло, із отвором, що імітує аварійний вилів масла; ТЕНу для нагрівання масла та термопари контролю температури масла.

Розмір аварійного отвору визначався з аналізу статистичних даних про аварії на трансформаторних підстанціях за останні 10 років. Об'єм масла, що заливався у ємкість, визначався із розрахунку вільного витікання масла через заданий отвір упродовж 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 термопари із кроком 300 мм на відстані 10 мм від дна маслоприймача.

Блок 3 являє собою аварійну ємкість для зливання масла.

Експериментальні дослідження проводилися, виходячи із таких принципів:

- над гравійною засипкою не повинно бути полум'яного горіння парів масла;
- температура масла у місці отвору його зливу в аварійну ємкість (маслозбірник) не повинна перевищувати 150 °С.

Вигляд стенду до та під час випробувань зображено на рис. 10.



а)

б)

Рисунок 10 – Зображення дослідного стенду:

а) до початку проведення експерименту; б) під час проведення експерименту

Проведення експерименту здійснювалось у такій послідовності:

- за досягнення маслом у ємкості (1), що імітує трансформатор, температури, наближеної до аварійних значень ($\approx 250\text{ }^{\circ}\text{C}$), 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 термометрами (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 фіксувалося візуально;

- 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, вимірюючи температуру масла в шарі гравійної засипки від входу до виходу із неї 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.

Полуменево 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.

Ефективність охолодження та припинення горіння трансформаторного масла залежно від відстані проходження гравійною засипкою ($d_{ГЗ}$) зображено на рис. 11.



а)

б)

Рисунок 11 – Візуалізація горіння трансформаторного масла під час його проходження гравійною засипкою ($d_{ГЗ}$) маслоприймача у ході проведення експерименту на дослідному стенді:

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

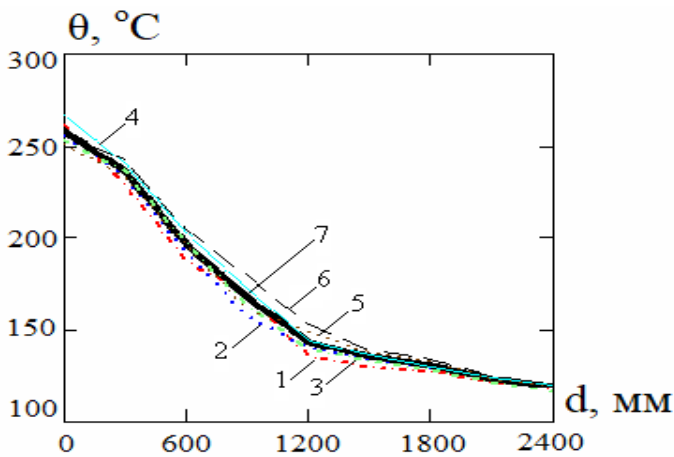


Рисунок 12 – Графік залежності зниження θ трансформаторного масла від відстані проходження гравійною засипкою:

1-6 – криві проведення 1-го – 6-го експериментів;

7 – усереднена крива всіх шести експериментів

експериментальних досліджень на наявність викидів і квазивикидів. На другому етапі проводилося порівняння результатів експериментальних досліджень для виявлення розбіжностей між дисперсіями.

Для виявлення у результатах експериментальних досліджень викидів та квазивикидів застосували критерій Граббса (11):

$$G_{\max} = \frac{y_{\max} - \bar{y}}{S} \quad \text{та} \quad G_{\min} = \frac{\bar{y} - y_{\min}}{S}, \quad (11)$$

де: \bar{y} – середнє значення;

S – середньоквадратичне відхилення.

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 застосували критерій Фішера (12), порівнявши при цьому отриману оцінку дисперсії для першого та наступних експериментів (1 та 2; 1 та 3; 1 та 4; 1 та 5, 1 та 6):

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (12)$$

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

Дисперсії відхилень по середнім значенням температур трансформаторного масла залежно від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача наведено на рис. 13.

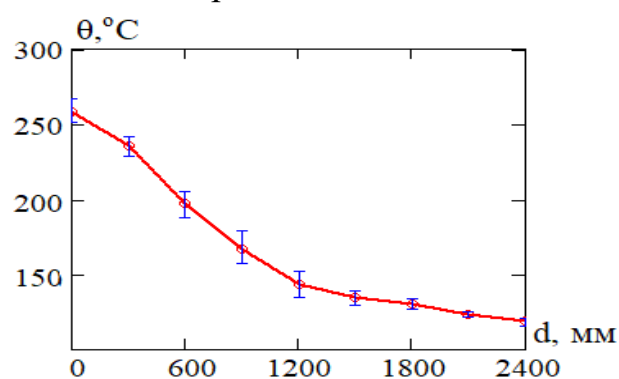


Рисунок 13 – Дисперсії відхилень по середнім значенням температур масла від відстані проходження гравійною засипкою

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

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.

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 (13):

$$\Delta\theta = 263,16 - 39,1d + 2,7d^2 - 0,005d^3 \quad (13)$$

Адекватність розробленої математичної моделі перевірялася шляхом порівняння теоретичних та експериментальних досліджень із використанням абсолютних, відносних і середньоквадратичних відхилень, результати яких наведені у таблиці 7.

Таблиця 7 – Статистичні параметри, отримані перевіркою адекватності результатів розрахунку зниження температури трансформаторного масла

Абсолютні відхилення, °C	Відносні відхилення, %	Середньоквадратичні відхилення, °C
5,501	3,379	5,852

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.

Таким чином, сформульовано третє наукове положення: уперше встановлено, що зниження температури масла від 250 °С до 150 °С забезпечують мінімальні розміри гравійної засипки шириною (d) 1500 мм і висотою (h) 250 мм; при цьому, ефективний ухил маслоприймача (i) у бік маслозбірника становить 0,05 м/м.

У **п'ятому розділі** на основі отриманих результатів досліджень і розроблених методичних підходів до прогнозування ефективності системи вогнеперешкоджання маслonaповнених 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 напрямка 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 маслозбірник для аварійного зливу.

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

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, що є завершеним науковим дослідженням, наведено результати вирішення актуального науково-прикладного завдання, що пов'язане з локалізацією пожеж на маслonaповнених 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 вогнеперешкоджання на маслonaповнених 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 маслonaповнених трансформаторних підстанціях встановлено, що основним елементом системи вогнеперешкоджання 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 вогнеперешкоджання маслonaповнених 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 масло, становить 150 °С, що і обрано за критерій ефективності охолодження та припинення горіння трансформаторного масла у гравійній засипці системи вогнеперешкоджання 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 методика 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 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 маслonaповнених 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 під час вивчення дисциплін «Моделювання процесів горіння» за програмою «Пожежна безпека».

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, 2021. Vol. 1, № 79 (79). 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., 2010. № 2 (22). 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., 2014. № 1 (29). 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, 2021. № 39. 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, 2021. Т. 4, вип. 164. 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., 2021. № 2 (12). 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: Üningu Teadus Juhatus, 2021. Pp. 574-578.

АНОТАЦІЯ

Климась Р.В. Удосконалення методу прогнозування припинення та поширення горіння системою вогнеперешкодження 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, Київ, 2022.

У роботі розв’язано актуальне завдання з розкриття закономірностей охолодження та припинення горіння трансформаторного масла від параметрів гравійної засипки. Розроблено математичну модель дослідження процесів тепломасообміну трансформаторного масла та закономірностей зниження його температури від параметрів гравійної засипки маслоприймача. У результаті проведеного експерименту отримано залежність зниження температури ($\Delta\theta$) трансформаторного масла від відстані його проходження гравійною засипкою маслоприймача. Встановлено, що припинення горіння та зниження температури трансформаторного масла забезпечують мінімальні розміри гравійної засипки шириною 1500 мм і висотою 250 мм; при цьому, ефективний ухил маслоприймача у бік маслосбірника має становити 0,05 м/м.

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.

The dissertation is devoted to the solution of an actual scientific and technical problem in the sphere of fire safety – revealing the relations between transformer oil temperature decrease and 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 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.

The scientific novelty of the obtained results is in the revelation of the trends of cooling and cessation of the combustion of the transformer oil depending on the parameters of gravel backfill of the fire prevention system of the transformer substation which is a sound theoretical basis for creating prerequisites for improving methods for predicting efficiency of such systems. At that:

- it was established for the first time that the relationship between the cooling temperature of the burning transformer oil contained in the oil receiver and width (d) and height (h) of the gravel backfill and slope (i) was as follows:

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

- it was established that the decrease in the temperature of burning transformer oil, depending on the distance (width d), which it travels from the entrance to the gravel filling of the oil receiver to the oil collector, is described by a polynomial dependence of the 3rd order, which has the form:

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

- the geometric parameters of the gravel backfill of the fire protection system of the transformer substation, under which the temperature of the transformer oil decreases to a safe value (from 250 °C to 150 °C), are substantiated, namely: the minimum dimensions of the gravel backfill: width 1500 mm, height 250 mm, the effective slope of the oil receiver in oil sump side 0,05 m/m;

- improved theoretical approaches for evaluating the conditions of the cooling and cessation of burning of the transformer oil in the gravel backfill of the fire prevention system of the transformer substations were improved;

- the parametric methods of normalization in construction in terms of reducing the temperature of transformer oil from the parameters of the gravel filling of the fire protection system of oil-filled transformer substations have been further developed in order to increase its efficiency in fire conditions.

The practical value of the research lies in the development of a methodical and experimental basis for the method of predicting the effectiveness of the fire prevention system of oil-filled transformer substations under fire conditions, as a scientific basis for their design.

During the execution of the work, an experimental stand was created to study the process of heat and mass transfer of transformer oil in the gravel backfill of the fire protection system of the oil-filled transformer substation.

During the work, a mathematical model of research of heat and mass transfer processes of transformer oil and regularities of its temperature decrease from parameters of the gravel backfill of oil receiver is developed.

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.

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; it is established that the cessation of combustion and lowering the temperature of transformer oil provide the minimum dimensions of gravel backfill with a width of 1500 mm and a height of 250 mm; at the same time, the effective inclination of the oil receiver towards the oil collector should be 0,05 m/m.

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 %.

In the appendices to the dissertation 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.

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

Підписано до друку 12.10.2022.
Формат 90×60/16. Папір офсетний.
Об'єм 0,9 ум. друк. арк.
Замовлення № 12/10/2022.
Тираж 100 прим.

Надруковано ФОП Клименко Ю.Я.
02125, м. Київ, вул. П. Запорожця, 4;
тел. моб.: /066/ 260 76 86; e-mail: Colo69@ukr.net