

**Тема: «Забезпечення надійності будівельних конструкцій кабельних  
тунелів»**

**Шифр: «Кабельний тунель»**

## План

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ПОЖЕЖНА НЕБЕЗПЕКА КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛІВ	9
1.1. Прокладка кабелів у тунелях і колекторах	9
1.2. Температурний режим пожежі в кабельних тунелях	11
1.3. Теоретичне дослідження сценарію розвитку пожежі у кабельному тунелі	13
РОЗДІЛ 2. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ У КАБЕЛЬНОМУ ТУНЕЛІ	16
2.1. Вихідні умови обчислювального експерименту	16
2.2. Алгоритм проведення обчислювального експерименту	20
2.3. Результати обчислювального експерименту	20
ВИСНОВКИ	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	29

## ВСТУП

Проблема пожежної безпеки електричних кабелів загострилася в 70-х роках минулого століття, в зв'язку з ростом числа пожеж на теплових електростанціях, атомних станціях (АЕС) та інших великих енергетичних об'єктах, що призводило до пошкодження міцності конструкцій і споруд в цілому. Значною мірою зростання числа пожеж в кабельних комунікаціях був обумовлений збільшенням кількості кабелів, які використовуються з метою живлення, контролю та управління електрообладнання на сучасних виробництвах, а також використанням при ґрунтових прокладках кабелів загальнопромислового виконання без додаткових заходів по їх вогнезахисту, а за рахунок щільної забудови міст ліквідація пожежі та її наслідків призводять до розкриття ґрунту, що унеможлиблює роботу. Розгалужені кабельні комунікації є не тільки носіями пожежної навантаження, але і направляючими системами, за якими вогонь може поширюватися на будівлях і спорудах.

Яскраві приклади пожеж:

- Запорізькій АЕС (м. Енергодар, 1984 р.) вигоріла траса із сумарною довжиною кабелів 800 км. У головному кабельному каналі експериментальної установки прискорювача DESY Гамбургського університету (ФРН) виникла пожежа, в результаті якої було зруйновано кабельну мережу і обладнання, пошкоджено будівлю та конструкції тунелю, а роботу на установці було припинено на тривалий час.
- м. Сіетл (США, 1988 рік) пожежа у підземному комунікаційному тунелі з частковим обвалом будівельних конструкцій тунелю паралізувала енергозабезпечення в декількох районах.
- Курахівська ТЕС в Мар'їнському районі Донецька обл. 29 квітня 2014 року пожежа у кабельному тунелі 4-го енергоблоку.
- м. Черкаси 12 травня 2017 року пожежа у кабельному тунелі житлового сектору по вулиці Самійла Кішки, неподалік від ПАТ “Азот”.

За статистичними даними можна зробити висновок, що основними причинами пожеж на промислових підприємствах є:

- 25–35 % — незадовільний стан електротехнічних пристроїв та порушення правил їх монтажу та експлуатації;
- 25–30 % — необережне поводження з вогнем;
- 10–12 % — порушення правил пожежної безпеки під час проведення різних вогневих робіт (електрогазозварювання, різка металу, паяльні роботи, розігрівання бітуму тощо);
- до 10 % — порушення технологічного процесу виробництва;
- 4–6 % — несправність опалювальних приладів та порушення правил їх експлуатації;
- 2–3 % — підпали;
- до 2 % — іскри теплового та механічного походження. [1].

Це свідчить про те, що пожежі виникають внаслідок несправностей і порушення правил експлуатації електротехнічних, електронагрівальних приладів, пристроїв та устаткування, а саме через виникнення коротких замикань, перевантаження електродвигунів, освітлювальних та силових мереж внаслідок великих місцевих опорів, роботу несправних або залишених без нагляду електроприладів, складають більше 25 % всіх випадків.

Горіння електричних кабелів супроводжується виділенням значної кількості тепла, яке визначається питомою теплотою згорання матеріалів ізоляції, захисних оболонок кабелів і масою цих матеріалів, що містяться в одиниці довжини кабелю. Як показали дослідження зі спалювання потоків кабелів в умовах кабельного тунелю температура в зоні горіння кабелів з ізоляцією з поліетилену або з паперовою просоченою ізоляцією досягає 1000 - 1200 ° С, що може спричинити нагрів будівельних елементів та конструкцій, втрату їх цілісності та поширення вогню на більшу площу. При цьому спостерігається виділення значного обсягу чорного диму і інших

газоподібних продуктів, що призводить до зниження видимості й ускладнює дії персоналу з гасіння пожежі та евакуації людей [2].



Рисунок 1 – Небезпечні фактори пожежі у кабельному тунелі.

Відомо, що при горінні полімерних композицій можуть утворюватися задушливі і токсичні речовини, такі як оксид вуглецю, оксид азоту, сірководень, хлористий водень, формальдегіди та ряд інших, які при вдиханні можуть викликати пошкодження дихальних шляхів або привести до летального результату. Особливо небезпечним є оксид вуглецю, який утворюється при горінні практично всіх матеріалів і в більшості випадків є причиною нещасних випадків при пожежах.

При деструкції і горінні полімерних композицій ізоляції і оболонки кабелю виділяються газоподібні речовини, наприклад, хлор, бром, фтор, діоксид сірки та інші, які з'єднуючись з парами води утворюють кислоти або лугу, здатні викликати корозію металевих конструкцій і корозійне пошкодження електронного обладнання. Хоча корозійна активність продуктів горіння безпосередньо не впливає на розвиток пожежі, проте, необхідно враховувати цей фактор при конструюванні кабелів, так як корозійне руйнування металоконструкцій і обладнання впливає на міцність споруди та викликає додатковий збиток від пожежі, який значно перевищує в ряді випадків вартість згорілих кабелів.

**Мета роботи** – дослідити температурний режим при пожежі у різних зонах кабельного тунелю за допомогою засобів комп’ютерної газогідродинаміки (CFD), як наукове підґрунтя забезпечення надійності будівельних конструкцій кабельних тунелів.

**Для досягнення поставленої мети були сформовані наступні завдання:**

1. Проаналізувати пожежну небезпеку кабельних тунелів.
2. Теоретично дослідити сценарій розвитку пожежі у кабельному тунелі.
3. Розробити алгоритм обчислювального експерименту з моделювання пожежі у кабельному тунелі.
4. Провести обчислювальний експеримент з визначення температурного режиму пожежі у різних зонах кабельного тунелю при горінні кабелю ВВГнг-П 3×2,5.

**Об’єкт роботи** – процеси тепломасопереносу та напружено-деформованого стану будівельних конструкцій у кабельному тунелі під час пожежі.

**Предмет роботи** – температурний режим пожежі у кабельному тунелі.

**Методи досліджень.** Математичне моделювання процесів нестационарного теплообміну із застосуванням методу кінцевих елементів з використанням комп’ютерного комплексу Fire Dynamics Simulator 6.2.

**Наукова новизна:**

1. Отримано подальший розвиток застосування обчислювальних експериментів для моделювання процесів тепломасопереносу під час пожежі.
2. Запропоновано алгоритм проведення обчислювального експерименту з моделювання пожеж у кабельних тунелях за допомогою використання законів нестационарного теплообміну засобами CFD-програм.

3. Досліджено температурний режим пожежі при горінні кабелю ВВГнг-П 3×2,5 у кабельному тунелі.

### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Отримано графіки температурного режиму пожежі у різних зонах кабельного тунелю при горінні кабелю ВВГнг-П 3×2,5, що можуть бути використані для дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів.

2. Запропоновано алгоритм проведення обчислювального експерименту з моделювання пожеж у кабельних тунелях, за допомогою якого можливо визначити температурний режим у кабельних тунелях з різним пожежним навантаженням та конструктивними особливостями.

**Апробація результатів наукової роботи.** Основні результати досліджень доповідалися і обговорювалися на:

1. Небезпечні фактори пожежі у підземних спорудах кабельних тунелів / Володіна В. В., Нуянзін О. М. // Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика» — Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ: 15 - 16 травня 2018 р. — с. 12-13.

2. Дослідження температурного режиму пожежі у кабельному тунелі / Шоріс Н. Ю., Володіна В. В., Нуянзін О. М. // Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матеріали XII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів – Львів: ЛУБЖД, 2018. – С. 41-42.

**Структура і обсяг роботи.** Наукова робота складається зі вступу, двох розділів і загальних висновків, перспектив подальших досліджень, списку використаних літературних джерел із 2 найменувань; містить 30 сторінок основного друкованого тексту та 3 сторінки літератури, 2 таблиця та 18 рисунків.

## РОЗДІЛ 1

### ПОЖЕЖНА НЕБЕЗПЕКА КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛІВ

#### 1.1. Прокладка кабелів у тунелях і колекторах

Кабельним тунелем називається закрита споруда (коридор) з розташованими в ньому опорними конструкціями для розміщення на них кабелів і кабельних муфт, з вільним проходом по всій довжині, що дозволяє виробляти прокладку кабелів, ремонти та огляди кабельних ліній. Його споруджують із збірних залізобетонних елементів, рідше з монолітного залізобетону. Зовні тунель покривають гідроізоляцією, щоб виключити можливість проникнення в них ґрунтових або технологічних вод. Над тунелем укладають шар землі не менш 0.5 м [2].



Рисунок 1.1 – Кабельний тунель з односторонньою укладкою кабелів:  
1 – кабельні лінії, 2 – арматура для прокладки кабельних ліній

Кабель складається з однієї або декількох ізольованих і скручених між собою жил, закручених в герметичну оболонку, поверх якої можуть бути накладений захисні покрити.



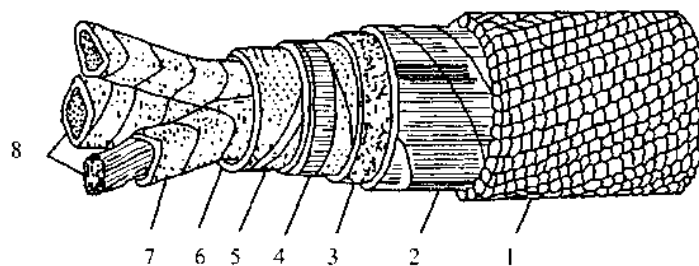


Рисунок 1.2 – Будова кабелю: 1 - струмопровідні жили; 2 - ізоляція жили (фазна); 3 – міжфазні заповнення; 4 – поясна ізоляція; 5 – металева герметична оболонка; 6 – подушка під бронею; 7 – сталева броня; 8 – зовнішній захисний покрив.

Кабельні тунелі і колектори рекомендується споруджувати в містах та на підприємствах з ущільненої забудовою території або при великому насиченні території підземними інженерними комунікаціями, а також на територіях великих металургійних, машинобудівних та інших підприємств [2].

Тунелі і колектори круглого перетину прохідного виконання мають внутрішній діаметр 2,6 м і призначені для двосторонньої прокладки кабелів.

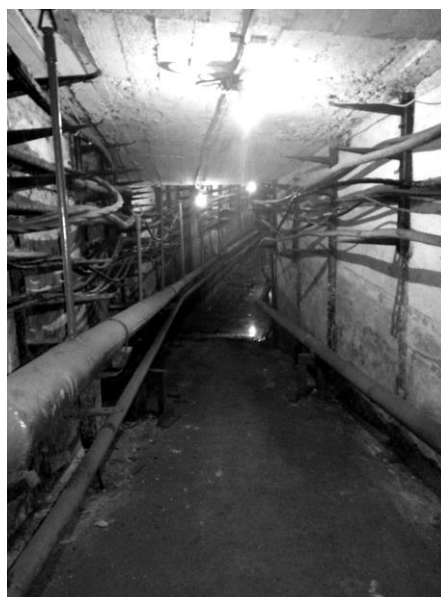


Рисунок 1.3 –Кабельний тунель з двосторонньою укладкою кабелів

Кабельні тунелі і колектори прямокутного перетину призначені для двосторонньої і односторонньої укладання кабелів і бувають прохідного і напівпровідного виконань. При великому числі кабелів тунелі і колектори прямокутного перетину можуть бути тризмінному (здвоєними).

На випадок пожежі кабельні тунелі відділяють від сусідніх приміщень негорючими перегородками, в самих тунелях на відстані не більше 150 м встановлюють розділювальні вогнестійкі перегородки. Для відводу тепла, що виділяють кабелі, тунелі обладнують вентиляцією, а також пожежною сигналізацією і протипожежними пристроями.

На рис.1.4. показано типове розміщення кабелів у тунелях прямокутного перетину.

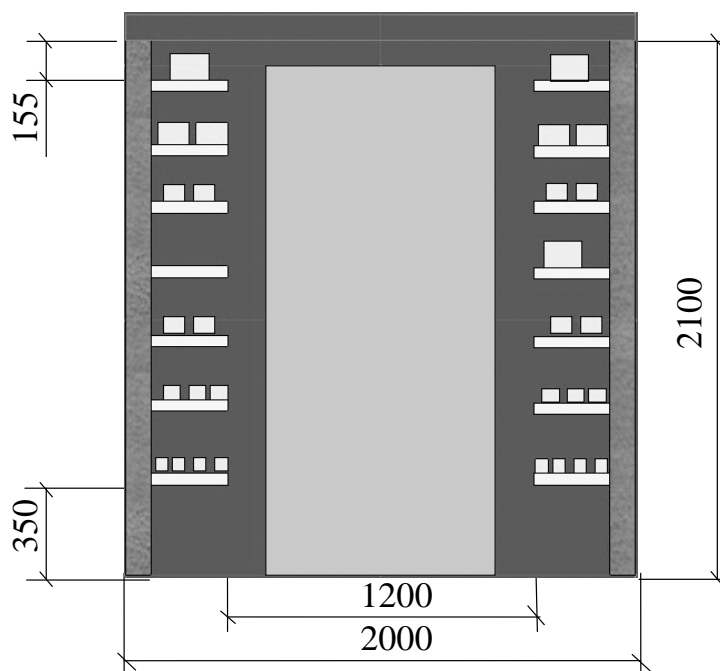


Рисунок 1.4 – Типове розміщення кабелів у тунелях і колекторах прямокутного перетину [2].

## 1. 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У останні роки ширше застосування отримали як експериментальні випробування, так і чисельне моделювання [3–18]. Зокрема дані методи використовуються з метою дослідження параметрів пожеж у кабельних тунелях.

У роботі [3] запропоновано температурний режим пожежі у тунелях. При цьому не враховано залежність температури від пожежного навантаження та геометричних розмірів тунелю, а аеродинамічні показники усереднено.

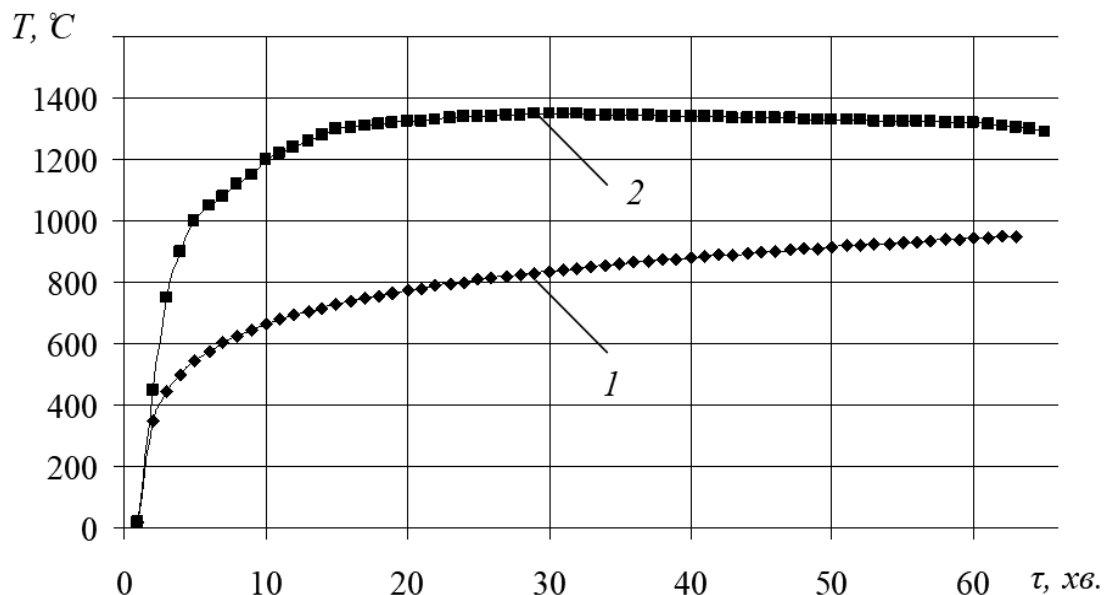


Рисунок 1.5 – Температурні режими пожежі: 1 – стандартний температурний режим пожежі [2]; 2 – режим пожежі в тунелях відповідно до [3]

У роботі [4] розглянуто розповсюдження димових газів та зміни їх температури під час пожежі у кабельному тунелі. Однак слід зазначити, що у

даній роботі досліджується лише початкова стадія пожежі. Це означає, що не визначено температурний режим протягом усього часу пожежі.

У роботі [5] проведено польові випробування у комунальному тунелі. Моделювалась пожежа при розливі горючої рідини. Завдяки цій роботі визначено необхідний об'єм палива, що використано під час проведення експерименту у даному дослідженні.

Дослідження [6] показує, що температура в осередку реальної пожежі сягала 800–900 °С. На основі даної інформації було обрано вид термопар для заміру температур під час експерименту.

В роботі [7] встановлено, що ширина тунелю мало впливає на швидкість вигорання пожежного навантаження. Робота [8] описує групу повномасштабних експериментів. Вимірювались розподіли температури в тунелях з різними умовами вентиляції. Проведені дослідження дали змогу визначити необхідний підпір повітря для експериментальних досліджень.

У чисельному моделюванні [9] проаналізовано причини пожеж у тунелях. Таким чином було обрано джерело початку пожежі.

Робота [10] присвячена аналізу параметрів швидкості вигорання ізоляції ПВХ-кабелю. Було розглянуто лінійна швидкість поширення пожежі при різному виді укладки кабелів. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, не розглянуто в достатній мірі методи укладки кабелів у тунелях прямокутного перерізу.

Вплив двох систем вентиляції на розподіл температури у моделі тунелю невеликого перерізу досліджено у роботі [11]. Це дозволяє зробити висновок, що аеродинаміка у просторі тунелю впливає на температурний режим пожежі.

Дослідження [12] присвячене механізму генерації потоку біфуркації диму на розподіл температури в димовому шарі за висотою. Проаналізовано у роботі вплив лише горизонтальної складової швидкості повітрообміну.

Експериментальні дослідження часто проводилися в зменшених масштабах модельних тунелях, які були виготовлені з вогнетривкого скла [13] або оцинкованої сталі [14].

Висновок, до якого прийшли дослідники у роботі [15], говорить, що обчислювальна газогідродинаміка (CFD) пропонує може бути доповненням до експериментів. Fire Dynamic Simulator (FDS), пропонується як один з інструментів CFD, що дозволяє забезпечити надійні та точні результати з моделювання пожеж у тунелях. Проте, будь які чисельні експерименти необхідно верифікувати на основі реальних експериментів.

У дослідженні [16] описано серію експериментальних випробувань в тунелі з обмеженим масштабом. Результати показали, що температура стіни всередині тунелю змінюється залежно від швидкості розповсюдження пожежі та максимальної температури осередку. Відповідно до роботи [17], дисперсія температур при пожежі впливає на межу вогнестійкості будівельних конструкцій. У роботі [18] проведено аналіз метрологічного забезпечення натурних експериментів. Завдяки цьому можливо правильно обрати засоби виміральної техніки.

Тому є підстави вважати, що досліджень у даному напрямку недостатньо. Необхідно провести додаткові. На даний час у країнах ЄС не існує єдиної затвердженої методики експериментів для кабельних тунелів. Подібну методику необхідно обґрунтувати та апробувати

### **1.3. Температурний режим пожежі в кабельних тунелях**

Пожежу умовно поділяють на три стадії (рис. 1.5): загоряння, розвиненого горіння й загасання [3]. Для більш точного моделювання пожежі можливе застосування і більш складних фізичних моделей, що реалізуються в складних комп'ютерних програмах. В алгоритми цих програм закладені сучасні чисельні методи.

Розроблено два методи переходу від реальних режимів пожежі до єдиного «стандартного» режиму пожежі [19]. Одним з методів переходу від реальних пожеж до стандартного є метод рівності площ під кривими «температура-час». Інший метод приведення реальних пожеж до стандартної проводиться за методом досягнення в якій-небудь конструкції критичних температур, що визначають її вогнестійкість.

У випадку пожежі в житлових будинках, та будівлях загального користування у горінні беруть участь схожі матеріали, кількість яких на одиницю площі приблизно однакова. Схожі також умови теплогазообміну, Пожежі в кабельних тунелях на відміну від пожеж у приміщеннях, у вугільних шахтах і на інших об'єктах, мають свою специфіку. З метою встановлення ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях різними засобами проведені паралельно експерименти в лабораторних умовах без впливу на осередок пожежі будь-якого засобу і з впливом на нього різних засобів пожежогасіння. Експериментальні дослідження в лабораторних умовах виникнення і розвитку пожеж в кабельних тунелях з геометричним масштабом моделювання 1:4, що відповідає реальному об'єкту з наведеним діаметром 2 м і довжиною тунелю до 10 м при числі Рейнольдса до 10000, що знаходиться в турбулентній області течії газів. Встановлено в лабораторних умовах, що концентрація кисню в зоні горіння може знизитися до 5%, що підтверджується даними дослідження великомасштабних пожеж, а також даними математичного моделювання, вказуючи тим самим на нерозривний зв'язок процесів газообміну і теплообміну при пожежах.

Для правильного прогнозу процесів горіння та гасіння в закритих об'ємах необхідно розробити математичну модель, яка враховує піроліз твердих горючих матеріалів, вступ в хімічні реакції з киснем газоподібних продуктів які розкладаються, їх вплив на температуру з урахуванням надходження повітря збіднілого на кисень на осередок пожежі, а це неможливо зробити достовірно без експериментальних досліджень [20].

#### **1.4. Теоретичне дослідження сценарію розвитку пожежі у кабельному тунелі**

Загоряння кабелів часто виникає внаслідок перегріву від коротких замикань між жилами кабелів. Короткі замикання виникають внаслідок неправильного монтажу або експлуатації електроустановок, старіння або пошкодження ізоляції. Струм короткого замикання залежить від потужності джерела струму, відстані від джерела струму до місця замикання та виду замикання. Горіння супроводжується високою температурою, розльотом розтопленого металу, займанням горючих будівельних конструкцій, які знаходяться поряд, великою швидкістю розповсюдження вогню та диму, додаткову небезпеку становлять електроустановки під високою напругою та можливе ураження особового складу електричним струмом. В горизонтальних кабельних тунелях лінійна швидкість поширення вогню по кабелям при знятій напрузі становить 0,15 – 0,3 м/хв, а під напругою 0,2-0,8 м/хв.

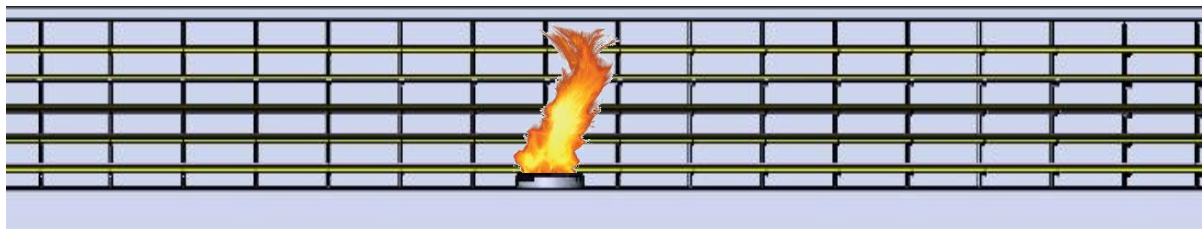
В тунелях з маслонаповненими кабелями крім ізоляції може горіти трансформаторне мастило, яке знаходиться в трубах при температурі 35-40С і надлишковому тиску. В цих тунелях, особливо при аваріях, горюче масло швидко розтікається по ухілам, що значно збільшує швидкість і площу горіння.

Пожежі які трапляються на трансформаторах мають особливості в залежності від місця виникнення горіння. При короткому замиканні в результаті дії електричної дуги на трансформаторне масло і розкладання його на горючі гази можуть відбуватися вибухи, які призводять до втрати несучої здатності будівельних конструкцій, руйнування трансформатора, масляних вимикачів і розтіканню горючого масла. Пожежі із камер де розташовані трансформатори, можуть розповсюджуватися в приміщення

розподільчого щита і кабельні тунелі, а також складати загрозу сусіднім спорудам, установкам і трансформаторам [21].

На рис. 1.6 показані схематичні зображення основних етапів пожежі у фрагменті кабельного тунелю.

1 етап – початковий розвиток пожежі



2 етап – охоплення полум'ям кабелів на полках



3 етап – перехідний до етапу розвиненої пожежі



4 етап – розвинена пожежа

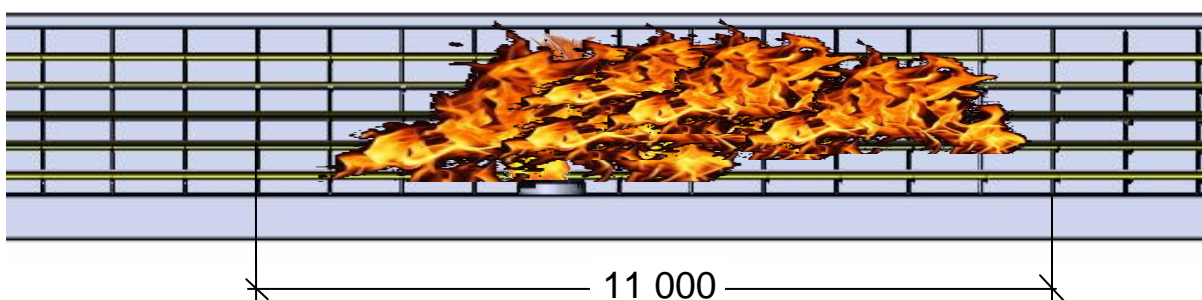


Рисунок 1.6 – Основні етапи розвитку пожежі у кабельному тунелі.

Відповідно до спостережень пожежі у кабельних тунелях протікають у декілька етапів. Перший етап - початковий розвиток пожежі, що



моделюється модельним вогнищем типу В. Наступний етап початкового загоряння кабелів на полках. Третій етап – перехідний до розвиненої стадії. Наступний етап є етапом розвиненої стадії пожежі. У режимі розвиненої пожежі відбувається вигоряння основного пожежного навантаження. Останній етап – це поступове згасання пожежі.

Згідно із запропонованою схемою розглядається фрагмент фіксованої ділянки кабельного тунелю, що охоплює джерело запалення. При цьому враховано, що підпір повітря зміщує факел полум'я до відкритої частини фрагменту кабельного тунелю.

## РОЗДІЛ 2

### ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ З ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОЖЕЖІ У КАБЕЛЬНОМУ ТУНЕЛІ

#### 2.1. Вихідні умови обчислювального експерименту

Фізико-хімічні властивості матеріалів зразків пожежного навантаження кабельного тунелю для проведення обчислювального експерименту задавались відповідно до характеристик кабелю ВВГнг-П 3×2,5. Параметри кабелю пожежного навантаження кабельного тунелю наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри кабелів для пожежного навантаження кабельного тунелю

№ п/п	Неметалевий матеріал	Довжина відрізка кабелю, мм	Маса матеріалу, г	Густина матеріалу, г/см <sup>3</sup>	Об'єм неметалевого матеріалу в 1 м кабелю, дм <sup>3</sup>
1	Оболонка	1000	40,02	1,43	0,0280
2	Ізоляція жил	1000	18,90	1,43	0,0132
Загальний об'єм неметалевих матеріалів у 1 м кабелю					0,0412

На рис. 2.1 наведений вигляд кабелів у спеціальній рамі для формування пучка категорії А за [22].



Рисунок 2.1 – Вигляд кабелів у спеціальній рамі для формування пучка категорії А за [22].

Горючим матеріалом кабелю ВВГнг-П 3×2,5 є полівінілхлорид (ПВХ), матеріал сталевих стінок є конструкційна сталь звичайної якості марки Ст. 3.

Для дослідження температурних режимів пожежі у кабельному тунелі моделюється фрагмент кабельного тунелю із внутрішнім простором розмірами 2150×1900×28000 мм. Товщина огороження кабельного тунелю складає: бокових стінок – 250 мм; верхньої кришки – 150 мм. У просторі фрагменту кабельного тунелю розташовані кронштейни для встановлення на них пожежного навантаження у вигляді рам із пучками кабелів категорії А згідно із [22]. З одного боку кабельний тунель закритий торцевою залізобетонною стінкою товщиною 1900 мм. З іншого боку кабельний тунель є відкритим. З боку закритого торця кабельного тунелю на його кришці є спеціальний отвір куди має нагнітатись повітря для створення підпору. На рис. 2.2 зображена конструктивна схема фрагменту кабельного тунелю.

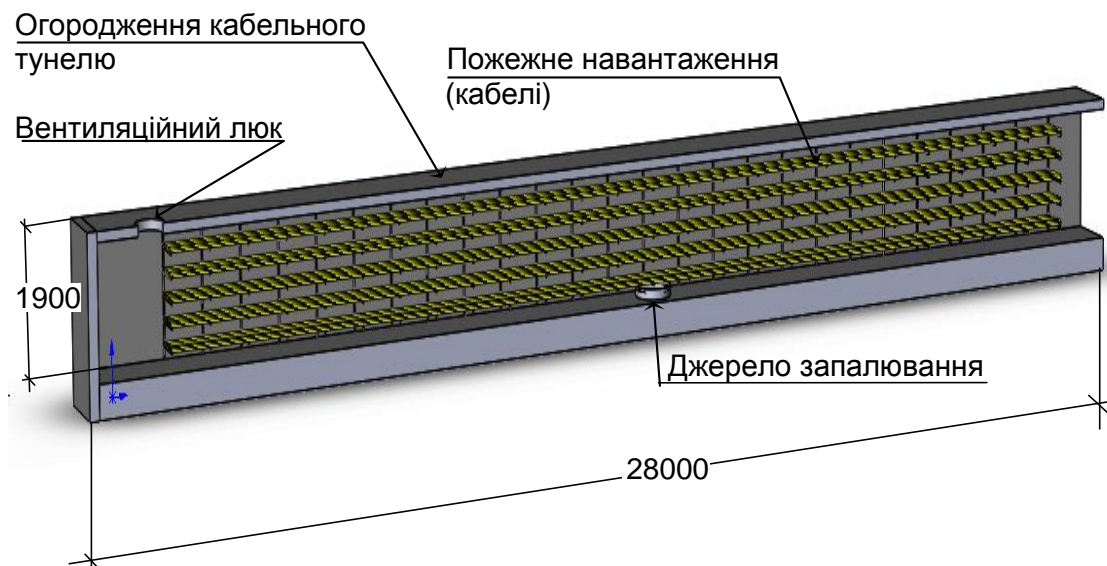


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема фрагменту кабельного тунелю.

На рис. 2.3 наведена схема розташування кабелів на полицях, які використовуються у якості пожежного навантаження.

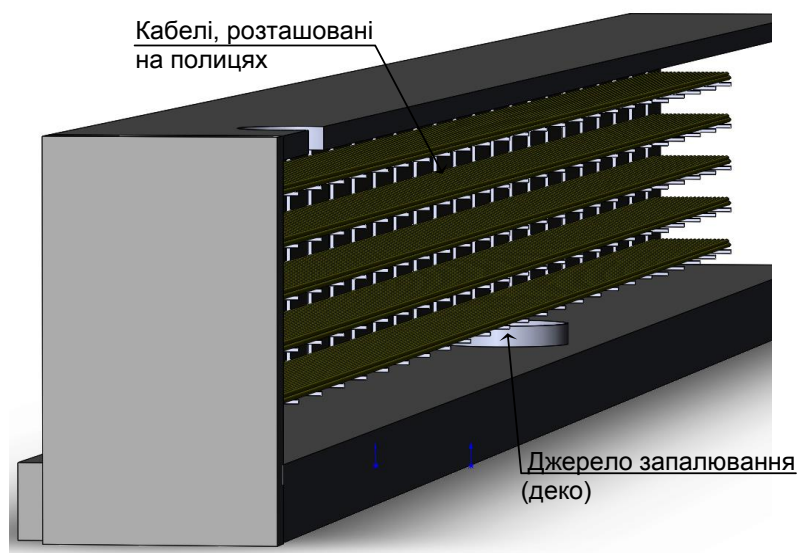


Рисунок 2.3 – Схема розташування кабелів на полицях

Згідно із схемою на рис. 2.3 кабелі розташовані на полицях, що виготовлені із сталевого кутика  $30 \times 30$  мм за [23].

У якості джерела запалювання кабелів використовується модельне вогнище класу В. На рис. 2.4 показана схема розташування джерела запалювання під кабелями.

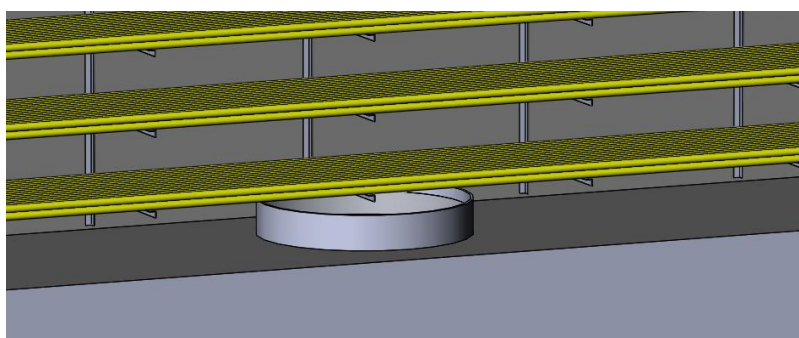


Рисунок 2.4 – Схема розташування джерела запалювання під кабелями.

Розміри та основні параметри джерела запалювання наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні технічні параметри джерела запалювання

Об'єм рідини, л		Розмір дека для модельних вогнищ пожежі
Вода	Пальне	Площа горіння (наближена), м <sup>2</sup>
7	14	0,36

У якості пального використовується дизельне паливо.

Загальний об'єм неметалевих матеріалів у 1 м кабелю ( $V$ ) розраховано за формулою:

$$V = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j \cdot L}, \quad (2.1)$$

де  $m_j$  – маса  $j$ -го неметалевого матеріалу відрізка кабелю довжиною ( $L$ ) не менше ніж 300 мм, г;  $\rho_j$  - густина  $j$ -го неметалевого матеріалу відрізка кабелю, г/см<sup>3</sup>;  $L$  – довжина відрізка для визначення об'єму неметалевих матеріалів кабелю, мм;  $N$  – кількість неметалевих матеріалів кабелю.

Кількість відрізків кабелю ВВГнг-П 3×2,5 виробництва ТОВ «220» у пучку категорії А за [22] розраховано за формулою:

$$n = \frac{V_A}{V} = \frac{7,0}{0,0412} \approx 169,89 = 170 \quad (2.2)$$

де  $V_A$  – нормований об'єм неметалевих матеріалів для пучка категорії А, дм<sup>3</sup>/м.

## **2.2. Алгоритм проведення обчислювального експерименту**

Для проведення обчислювального експерименту з використанням створеної математичної моделі кабельного тунелю для випробувань використана нижченаведена послідовність розрахункових процедур.

1. За допомогою САД програми створюється геометрична конфігурація кабельного тунелю необхідних розмірів. Всередині створюються моделі кабелів, сталених кутків, отвору для виходу продуктів горіння та місця підпору повітря. Геометрична модель імпортується в середовище розрахункового комплексу.

2. Вводяться початкові параметри моделювання, як неможливо змінити у процесі розрахунку: початкова температура середовища, підпір повітря з одного боку тунелю, необхідний час пожежі (30 хв.).

3. Ініціюється процес горіння у середній частині тунелю безпосередньо під кабелями. З цією метою моделюється осередок пожежі розміром  $0,6 \times 0,6$  м.

4. При проведенні розрахунку відбувається спостереження за температурою відповідних точок у тунелі та температурного градієнту в режимі он-лайн.

## **2.3. Результати обчислювального експерименту**

За допомогою програми Fire Dynamics Simulator 6.2 (далі – FDS) проведено обчислювальний експеримент і проаналізувано динаміку зміни температури у різних частинах кабельного тунелю.

З метою побудови всіх можливих умов пожежі було потрібно розрахувати час вільного горіння в кабельному тунелі без впливу на горіння сторонніх чинників та аналіз динаміки пожежі при підвищенні тяги, за

допомогою надходження свіжого повітря в кабельний тунель в процесі горіння на певній стадії пожежі.

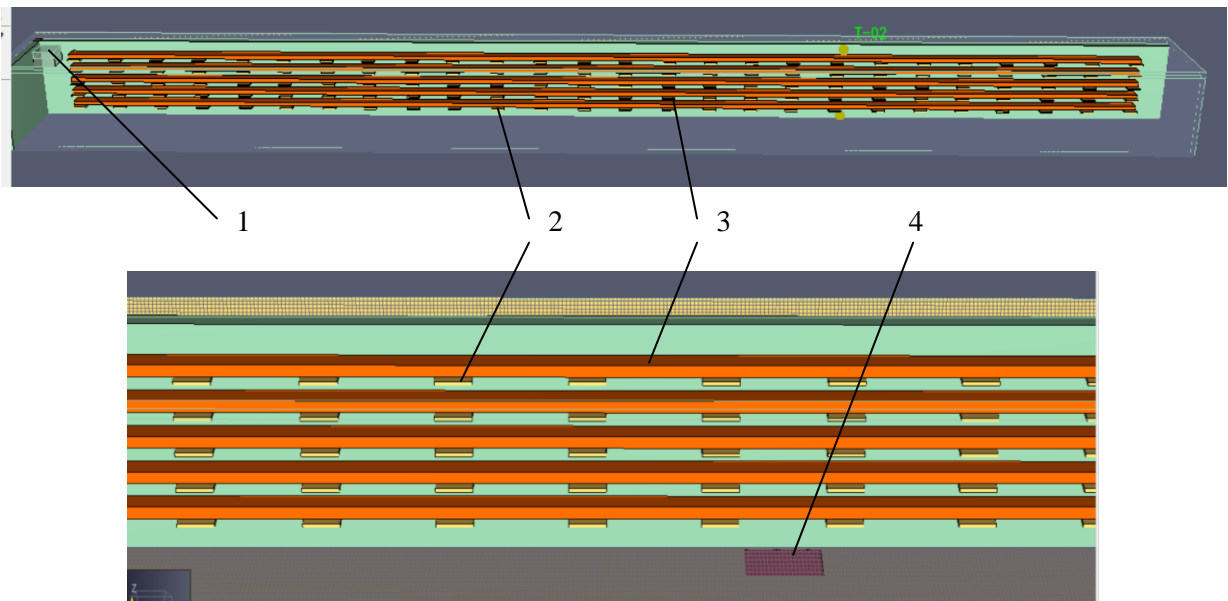


Рисунок 2.5 – Вигляд моделі кабельного тунелю що використовувався для обчислювального експерименту: 1- отвір виходу продуктів горіння; 2 – металевий куток; 3 – кабелі; 4 – осередок пожежі.

Принципова схема розташування місць контролю температури наведена на рис. 2.6.

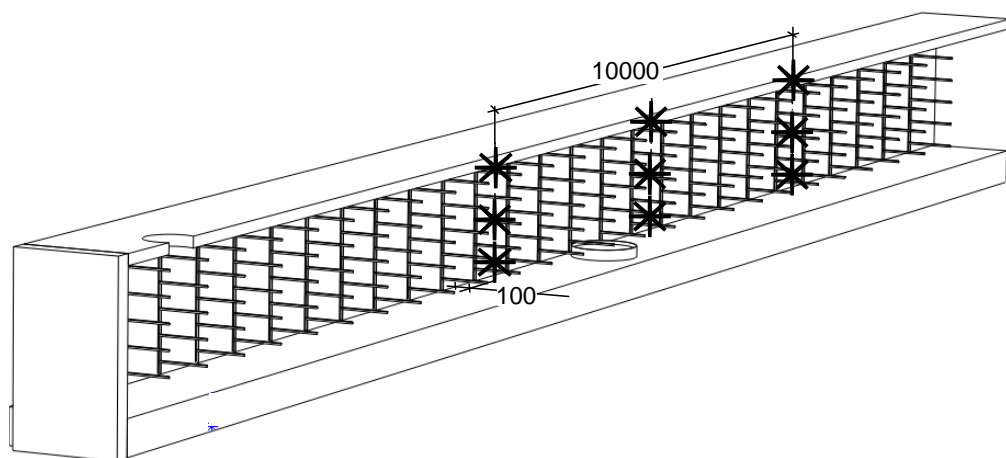


Рисунок 2.6 – Схема розташування місць контролю температури у кабельному тунелі.

З метою контролю температурного режиму засобами комп'ютерного комплексу FDS було створено 98 місць її контролю. Датчики розміщені вздовж двох стін тунелю на відстані 0,1 м від них (рис. 2.6). Обрано 3 рівня по висоті: 0,1, 0,9 та 1,7 м від дна тунелю. Крок розстановки датчиків склав 2 м (таким чином було отримано по 13 датчиків вздовж тунелю, на трьох рівнях по висоті і двох по ширині тунелю). Дані щодо температури у місцях вказаних на рис. 2.7 точками жовтого кольору та відповідним номером.

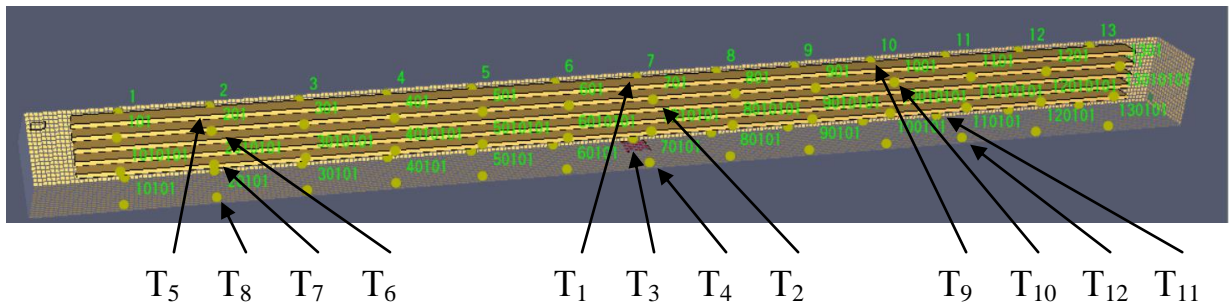


Рисунок 2.7 – Місця контролю температури:  $T_1 - T_{12}$  – місця обрані для побудови графіків.

Для наочності процесів прогрівання простору кабельного тунелю під час обчислювального експерименту у комп'ютерні моделі були створені площини на яких значення температури візуалізується за допомогою кольорів («заливки температури»).

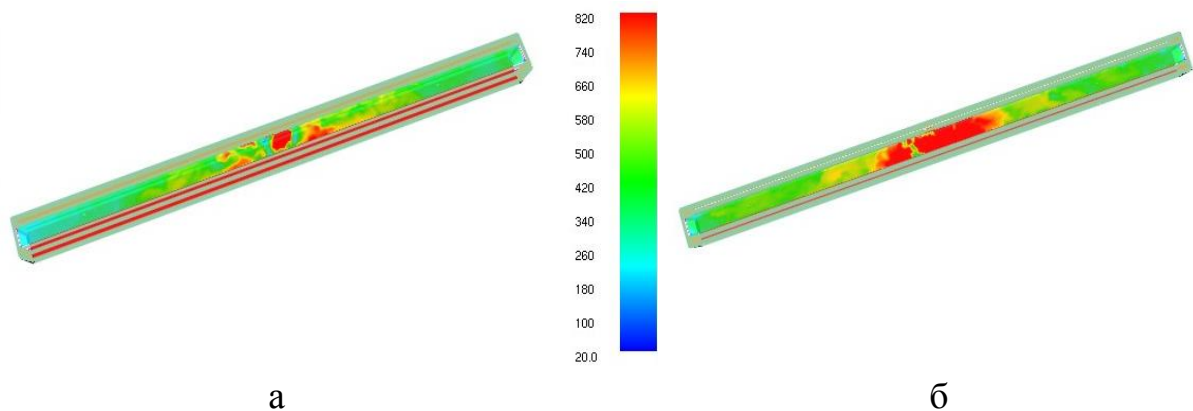


Рисунок 2.8 – Градієнт температур у просторі моделі кабельного тунелю: а – 15 хвилина, б – 30 хвилина.



Враховуючи розподіл температур що показано на рис. 2.8 кабельний тунель умовно можливо поділити на 3 зони:

1. Зона осередку пожежі.
2. Зона між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння;
3. Зона між осередком пожежі та місцем підпору повітря.

Після завершення обчислювального експерименту було побудовано графіки середньої температури в різних частинах кабельного тунелю (рис. 2.9 – рис. 2.11).

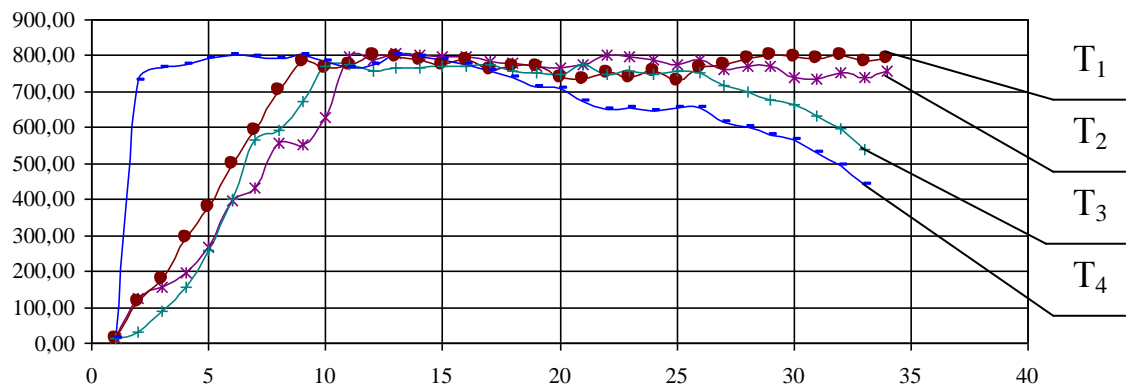


Рисунок 2.9 – Температура у зоні осередку пожежі:  $T_1 - T_4$  – місця обрані для побудови графіків (див. рис. 2.7).

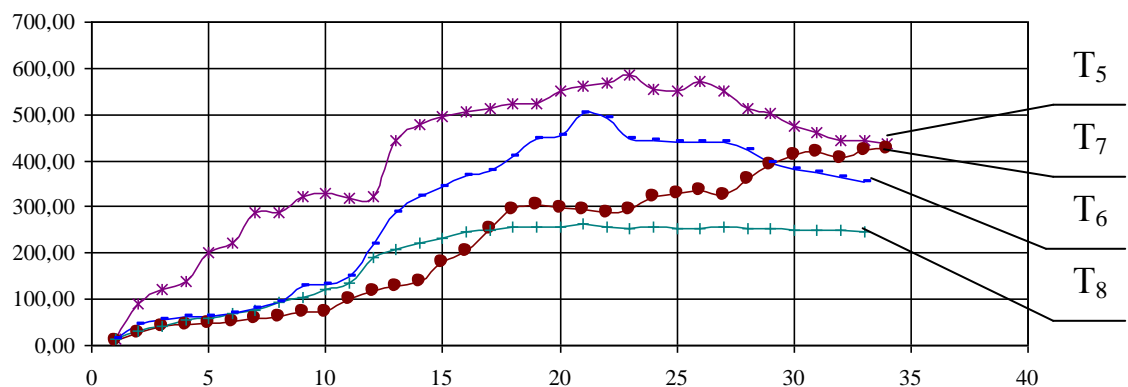


Рисунок 2.10 – Температура у зоні між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння:  $T_5 - T_8$  – місця обрані для побудови графіків (див. рис. 2.7).

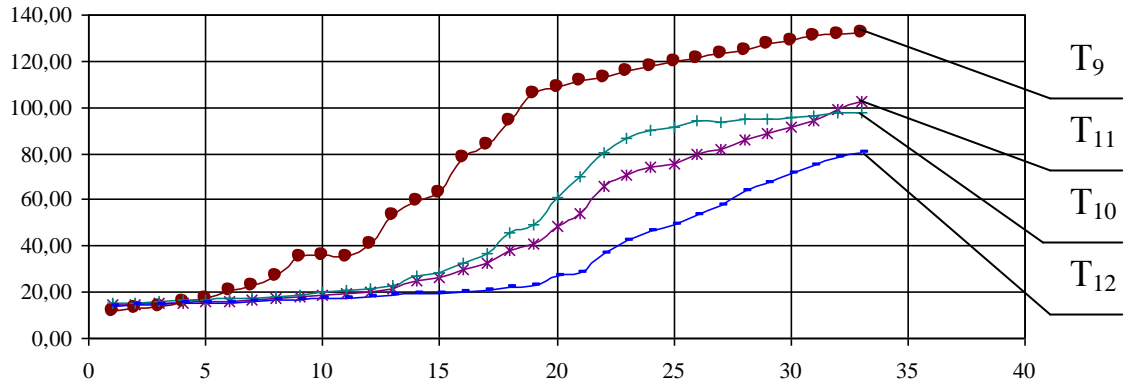


Рисунок 2.11 – Температура у зоні між осередком пожежі та місцем підпору повітря:  $T_9 - T_{12}$  – місця обрані для побудови графіків (див. рис. 2.7).

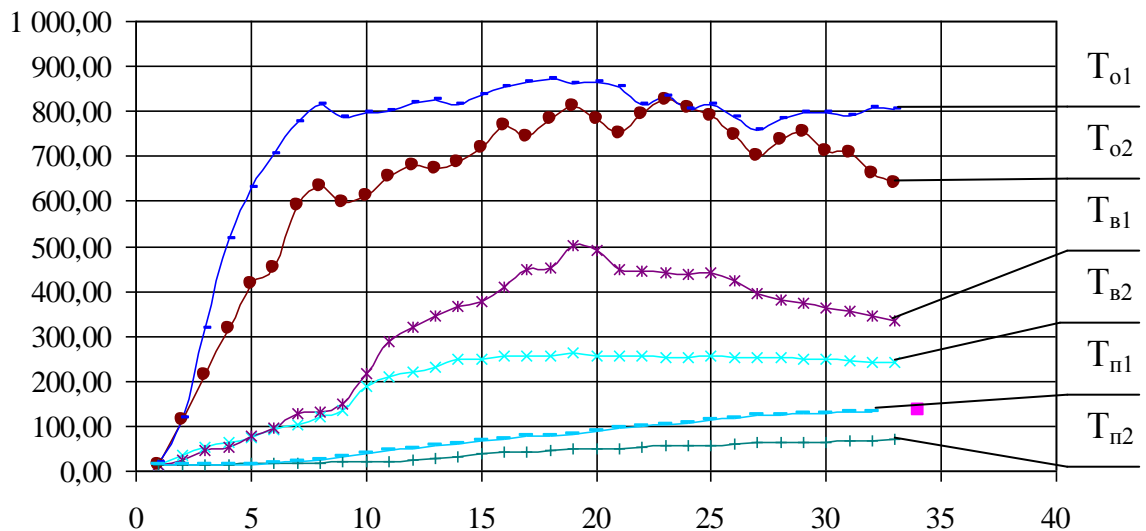


Рисунок 2.12 – Середня температура у 3-х зонах кабельного тунелю:  $T_{o1}$  – у верхній частині тунелю зони осередку пожежі;  $T_{o2}$  – у нижній частині тунелю зони осередку пожежі;  $T_{b1}$  – у верхній частині тунелю зони між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння;  $T_{b2}$  – у нижній частині тунелю зони між осередком пожежі та отвором для виходу продуктів горіння;  $T_{n1}$  – у верхній частині тунелю зони між осередком пожежі та місцем підпору повітря;  $T_{n2}$  – у нижній частині тунелю зони між осередком пожежі та місцем підпору повітря.

Аналізуючи отримані графіки температури у кабельному тунелі, можна констатувати, що найвища температура спостерігається в зоні осередку пожежі біля кабелів. Вона знаходиться в межах 700-800 °C в залежності від розташування місця контролю (рис. 2.9, рис. 2.12). Теплова енергія розповсюджується інтенсивніше в бік отвору виходу продуктів горіння. Температура знаходиться в межах 300-500 °C (рис. 2.10, рис. 2.12). У зоні між осередком пожежі та місцем підпору повітря температура знаходиться в межах 80-120 °C (рис. 2.11, рис. 2.12).

Таким чином, для випробування будівельних конструкцій на вогнестійкість необхідно обирати найжорсткіший температурний режим. Відповідно до обчислювального експерименту найвища температура спостерігається у зоні осередку горіння (рис. 2.9, рис. 2.12).

## ВИСНОВКИ

Проаналізовано конструктивні особливості кабельних тунелів, їх пожежне навантаження, існуючий температурний режим при пожежі у тунелі та описано пожежну небезпеку кабельних тунелів. Виходячи з прикладів пожеж, зроблено висновок у разі обрушення конструкцій можуть припинитись роботи цілих підприємств, залишатись без світла райони міст, вихід з ладу обладнання та ін. Тому для забезпечення пожежної та техногенної безпеки необхідно гарантувати необхідну межу вогнестійкості кабельних тунелів.

Проведено теоретичні дослідження сценарію розвитку пожежі у кабельному тунелі та описані основні етапи пожежі у фрагменті кабельного тунелю.

Розроблено алгоритм проведення обчислювального експерименту з моделювання пожеж у кабельних тунелях, за допомогою якого можливо визначити температурний режим у кабельних тунелях з різним пожежним навантаженням та конструктивними особливостями.

Проведено обчислювальний експеримент та отримано графіки температурного режиму пожежі у різних зонах кабельного тунелю при горінні кабелю ВВГнг-П 3×2,5 (5 кабельних ліній), що можуть бути використані для дослідження вогнестійкості будівельних конструкцій кабельних тунелів. Виходячи з нашого дослідження температурний режим може відрізнятися від стандартного. Оскільки залежить від пожежного навантаження та інших параметрів тунелю. Як видно з рисунку 2.9 і рисунку 2.12 температура в осередку пожежі може досягати 800-900 °С, що негативно впливає на будівельні конструкції тунелю.

Переважаю у кабельних тунелях промислових підприємств проходить не одна кабельна лінія, а декілька. Найчастіше максимальна допустима кількість, тому температурний режим пожеж для таких споруд потрібно

вибирати найжорсткіший. Необхідні додаткові дослідження з обов'язковою верифікацією результатів, щоб гарантувати цілісність конструкцій тунелів при пожежі. При невірному визначенні температурного режиму пожежі тривалий вплив високих температур негативно позначиться на несучій здатності будівельних конструкцій, що може призвести до їх руйнування.

Виходячи з результатів експериментів потрібно обирати вищий температурний режим для визначення пожежного навантаження та конкретні аеродинамічні та геометричні параметри кабельного тунелю. Якщо задані параметри будуть відрізнятись від розрахованих або буде змінено пожежне навантаження, то температурний режим також зміниться. Відповідно до результатів необхідно буде обирати інші будівельні конструкції

## ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На даний момент дослідження проводились на конкретному прикладі кабелю ВВГнг-П 3×2,5 нового зразка в подальшому планується проаналізувати і дослідити більшу кількість незалежно від виду і марки. Відповідно до розробленого алгоритму можливо визначити температурний режим пожежі, що може створюватися у тунелі при відомому пожежному навантаженні, а також інших параметрах.

Дослідження планується проводити не тільки на прикладі горизонтальних кабельних тунелів, а й вертикальних, бо на пожежне навантаження впливають аеродинамічні та геометричні параметри та їх дія на несучу здатність будівельних конструкцій. А розробка детального алгоритму обчислювального експерименту може ввійти в оцінку кабельної лінії, дозволить встановити раціональну область їх застосування.

За даними напрямки вже проводяться дослідження [23,24].

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. <http://www.undicz.mns.gov.ua>.
2. ГБН В. 2.2-34620942-002:2015. Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування.
3. Ройтман В. М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / Владимир Миронович Ройтман. – М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. – 382 с.
4. Niu Y., Li W. Simulation Study on Value of Cable Fire in the Cable Tunnel //Procedia Engineering. – 2012. – Т. 43. – С. 569-573.
5. Zhao Y., Zhu G., Gao Y. Experimental Study on Smoke Temperature Distribution under Different Power Conditions in Utility Tunnel //Case Studies in Thermal Engineering. – 2018.
6. Hsu W. S. et al. Analysis of the Hsuehshan Tunnel Fire in Taiwan //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 69. – С. 108-115.
7. Ji J. et al. Influence of aspect ratio of tunnel on smoke temperature distribution under ceiling in near field of fire source //Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 106. – С. 1094-1102.
8. Tian X. et al. Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 116. – С. 233-243.
9. Modic J. Fire simulation in road tunnels //Tunnelling and underground space technology. – 2003. – Т. 18. – №. 5. – С. 525-530.
10. Vaari J. et al. Numerical simulations on the performance of water-based fire suppression systems //VTT Technol. – 2012. – Т. 54.
11. Brahim K. et al. Control of Smoke Flow in a Tunnel //Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2013. – Т. 6. – №. 1.

12.Zhong W. et al. A study of bifurcation flow of fire smoke in tunnel with longitudinal ventilation //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2013. – Т. 67. – С. 829-835.

13.Sun J. et al. Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2016. – Т. 56. – С. 34-44.

14.Zhang P. et al. Experimental study on the interaction between fire and water mist in long and narrow spaces //Applied Thermal Engineering. – 2016. – Т. 94. – С. 706-714.

15.Chen C. et al. Experimental investigation of pool fire behavior to different tunnel-end ventilation opening areas by sealing //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 63. – С. 106-117.

16.Liang Q. et al. Numerical studies on the smoke control by water mist screens with transverse ventilation in tunnel fires //Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – Т. 64. – С. 177-183.

17.Pozdieiev S. et al. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2017. – Т. 116. – С. 02027.

18.Поздєєв С. В. и др. Метрологічні особливості вогневих випробувань залізобетонних будівельних конструкцій на вогнестійкість //Збірник наукових праць АПБ. – 2011. – №. 8. – С. 73-79

19.Будівельні конструкції. Методи випробувань на вогнестійкість. Загальні вимоги. Пожежна безпека (ISO 834: 1975) ДСТУ Б В. 1.1-4-98. [Чинний від 1998-10-28.] – К.: Укрархбудінформ, 2005. – 20 с. – (Національний стандарт України).

20.Нуянзін О. М. Методи математичного моделювання теплових процесів при випробуваннях на вогнестійкість залізобетонних будівельних конструкцій / Нуянзін О. М., Некора О. В., Поздєєв С. В. [та ін.] // Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, - 120 с.



21.П.П. Ключ, В.Г. Палюх, А.С. Пустовой, Ю.М. Сенчихін, В.В.Сировой Пожежна тактика. – Х.: Основа, 1998.

22.ДСТУ EN 60332-3-22:2013 Вогневі випробування електричних та волоконно-оптичних кабелів. Частина 3-22. Випробування вертикально розташованих проводів або кабелів, прокладених у пучках, на вертикальне поширювання полум'я. Категорія А (EN 60332-3-22:2009, IDT).

23.Небезпечні фактори пожежі у підземних спорудах кабельних тунелів / Володіна В. В., Нуянзін О. М.// Всеукраїнська науково-практична конференція курсантів і студентів «Пожежна та техногенна безпека: наука і практика» — Черкаси: ЧПБ НУЦЗУ: 15 - 16 травня 2018 р. — с. 12-13.

24.Дослідження температурного режиму пожежі у кабельному тунелі / Шоріс Н. Ю., Володіна В. В., Нуянзін О. М. // Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: матеріали XII Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, курсантів та студентів – Львів: ЛУБЖД, 2018. – С. 41-42.