

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

На правах рукопису



**КОВАЛЬЧИК ВАСИЛЬ МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 614.844.4

**ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ІНЕРТНИМИ  
ГАЗАМИ В КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ**

Спеціальність 21.06.02- Пожежна безпека

Дисертація  
на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
доктор технічних наук, професор  
Ковалишин Василь Васильович

Львів - 2016

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	5
<b>РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	12
1.1. Стан пожежної безпеки та аналіз способів гасіння пожеж в кабельних тунелях.....	12
1.2. Засоби газового пожежогасіння.....	30
1.3. Аналітичні дослідження тепломасообмінних процесів в кабельних тунелях при виникненні пожеж і їх гасіння.....	33
<b>РОЗДІЛ 2. ІНЕРТИЗАЦІЯ РІЗНИМИ ГАЗАМИ АТМОСФЕРИ КАБЕЛЬНОГО ТУНЕЛЮ</b> .....	41
2.1. Розробка математичної моделі нестационарного переносу інертного газу в кабельних тунелях.....	41
2.2. Моделювання заповнення кабельних тунелів інертними газами.....	46
2.3. Порівняння даних математичного моделювання з експериментальними даними.....	50
2.4. Висновки.....	62
<b>РОЗДІЛ 3. ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ ПОЖЕЖАХ В КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ</b> .....	63
3.1. Розробка математичної моделі розвитку та розповсюдження пожежі з урахуванням стиснення та розширення газів.....	63
3.2. Модель горіння твердого матеріалу.....	68
3.3. Моделювання переміщення зони горіння та вигорання горючого матеріалу.....	73
3.4. Висновки.....	77
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ В КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ</b> .....	78
4.1. Методика проведення експериментальних досліджень гасіння пожежі в модельній вогневій споруді.....	78

4.2. Розробка математичної моделі гасіння пожежі інертними газами.....	81
4.3. Чисельне моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в кабельних тунелях.....	87
4.4. Результати експериментальних досліджень гасіння пожежі в модельній вогневій споруді та перевірка їх на адекватність.....	102
4.5. Висновки.....	109
<b>РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ З НАСТУПНОЮ ЇХ РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ.....</b>	<b>110</b>
5.1. Область застосування і тактико-технічні можливості впливу на зону горіння інертними газами.....	110
5.2. Методика розрахунку параметрів гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією.....	112
5.3. Програмний розрахунок параметрів гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією.....	116
5.4. Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження технічних засобів, способів та методів гасіння пожеж.....	122
5.5. Висновки.....	124
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>125</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>128</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>144</b>
<b>Додаток А.</b> Протокол досліджень з визначення параметрів гасіння пожежі азотом без рециркуляції.....	<b>145</b>
<b>Додаток Б.</b> Протокол досліджень з визначення параметрів гасіння пожежі азотом з наступною рециркуляцією.....	<b>152</b>
<b>Додаток В.</b> Протокол досліджень з визначення параметрів гасіння пожежі діоксидом вуглецю без рециркуляції.....	<b>161</b>
<b>Додаток Д.</b> Протокол досліджень з визначення параметрів гасіння пожежі діоксидом вуглецю з наступною рециркуляцією.....	<b>168</b>

<b>Додаток Е.</b> Протокол досліджень на шахті Візейська».....	177
<b>Додаток Є.</b> Акт впровадження результатів роботи в навчальний процес.....	180
<b>Додаток Ж.</b> Акт впровадження результатів роботи в практичну діяльність.....	183

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Пожежі на об'єктах енергетики найчастіше виникають в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів. Особливостями пожеж на таких об'єктах є швидкий їх розвиток, обмежений простір та важкодоступність для здійснення дій з локалізуванню та гасіння особовим складом пожежно-рятувальних підрозділів, обмежена видимість, висока температура (до 800 °С), ймовірність виникнення повторного загоряння після припинення процесу горіння, а також токсичність продуктів згоряння. Застосування нових типів кабелів низької горючості з різних причин не набуло належного поширення, тому кількість таких пожеж не знижується.

Значний внесок у розвиток пожежної науки з питань технологій і способів гасіння пожеж різноманітними засобами внесли М. П. Копилов, В. І. Горшков, А. М. Баратов, П. С. Пашковський, О. Я. Корольченко, І.Є.Болбат, О. Ф. Шароварников, В. В. Ковалишин, В. К. Костенко, В. П. Колосюк, С. В. Пузач, С. П. Греков, В. В. Мамаєв, Ю. Ф. Булгаков, Ю. В. Кудінов, І. М. Абдурагімов, Ю. А. Кошмаров, І. С. Молчадський, Ю. О. Абрамов, О. О. Кіреєв, С. Ю. Огурцов, С. Ю. Дмитровський, В. О. Кузін, Р. Я. Лозинський, А. В. Антонов, В. О. Дунюшкін, А. М. Рижов, В. І. Луц, В. М. Баланюк та інші. Слід зазначити, що недостатню увагу в їх дослідженнях було приділено науковому обґрунтуванню та впровадженню технологій гасіння пожеж у кабельних тунелях об'ємним способом із застосуванням газових вогнегасних речовин.

Розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання з обґрунтованими параметрами діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння, є актуальною науковою задачею, розв'язання якої створює передумови для підвищення ефективності гасіння пожеж на зазначених об'єктах.

Основними вимогами до сучасних способів та засобів гасіння пожеж в ізолюваних та напівізолюваних технологічних об'ємах кабельних тунелів, в

підземних комунікаціях та спорудах являється мобільність, автономність і висока інтенсивність гасіння осередків горіння в найкоротші терміни. Цим вимогам в більшій мірі відповідають способи та засоби ліквідації пожеж шляхом водяного, порошкового, пінного впливу на зону горіння. До цих способів також відноситься інертизація ізолюваних об'ємів інертними газами або рециркуляція пожежних газів в замкнутому об'ємі.

Відомі установки газоводяного пожежогасіння типу, наприклад, АГВГ добре себе зарекомендували при гасінні факелів газу, попри те вони не придатні для створення інертного середовища в ізолюваних підземних об'єктах, віддалених від установки більше, ніж на 15 – 25 м.

Пінні засоби гасіння пожеж також не завжди являються ефективними при високій кратності піни (більше 1000) в зоні горіння.

Запропонований спосіб рециркуляції пожежних газів в ізолюваному об'ємі дає можливість інертизувати повітря до відповідної концентрації кисню, коли залишаються невеликі осередки горіння та тління. Попри те в цьому випадку все залежить від величини ізолюваного об'єму. Чим більший буде об'єм, тим менша ефективність гасіння пожежі.

На теперішній час в підрозділах ДСНС України відсутні високоефективні установки комплексного дистанційного гасіння пожеж в ізолюваних та напівізолюваних приміщеннях.

У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці нових високоефективних способів та засобів пожежогасіння. Дослідження процесів інертизації об'єктів різноманітної протяжності азотом або діоксидом вуглецю, встановлення закономірності горіння твердого палива в умовах низьких концентрацій кисню є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого сприятиме безпечному та ефективному гасінню пожеж та проведенню аварійно-рятувальних робіт.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась у рамках виконання науково-дослідних робіт за темами: «Розробка способу гасіння пожежі в ізолюваній ділянці тунелю (в закритому

об'ємі) рециркуляцією продуктів горіння, пінами та іншими вогнегасними речовинами» (ДР № 0107U001312); «Розробка високопродуктивних мобільних засобів гасіння пожеж парогазовими сумішами на об'єктах підвищеної небезпеки» (ДР № 0105U004353), в яких здобувач був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає у підвищенні ефективності гасіння пожеж об'ємним способом в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів шляхом дистанційного подавання з обґрунтованими параметрами діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи було розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було розв'язати такі задачі:

– проаналізувати пожежну статистику, способи та домінуючі чинники припинення горіння у технологічних об'ємах кабельних тунелів і виявити шляхи підвищення ефективності гасіння пожеж на об'єктах з їх наявністю;

– розробити методіку проведення теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння;

– розробити відповідні математичні моделі та з їх застосуванням провести обчислювальні експерименти з виявлення динаміки зміни температури та концентрацій компонентів газового середовища під час розвитку пожежі у технологічних об'ємах кабельних тунелів та її гасіння газовими вогнегасними речовинами – інертними розріджувачами;

– провести експериментальні дослідження з виявлення динаміки зміни температури та концентрацій компонентів газового середовища макетної

пожежі у випробувальній камері внаслідок дії діоксиду вуглецю, азоту або їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння;

– перевірити адекватність отриманих результатів теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень гасіння макетної пожежі у випробувальній камері, а також відомих натурних випробувань у полігонних умовах;

– розробити методику розрахунку параметрів дистанційного подавання газових вогнегасних речовин – інертних розріджувачів на гасіння пожеж об'ємним способом у кабельних тунелях.

*Об'єкт дослідження* – процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння.

*Предмет дослідження* – вплив чинників на процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння.

*Методи дослідження.* У роботі використано комплексний метод досліджень, який містить: аналіз та узагальнення науково-технічних досягнень у сфері припинення горіння у технологічних об'ємах кабельних тунелів; математичне моделювання динаміки зміни концентрації газових вогнегасних речовин-розріджувачів та процесів тепломасообміну з використанням основних законів механіки рідин та газів, проведення обчислювальних експериментів; експериментальні дослідження з розкриття особливостей припинення горіння, виявлення динаміки зміни температури та концентрацій компонентів газового середовища у разі подавання газових вогнегасних речовин-розріджувачів в кабельні тунелі; методи газової хроматографії; методи математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів роботи** полягає у розкритті особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в замкнених та



напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння.

– уперше теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що послідовне подавання в технологічній об'єм кабельного тунелю газових вогнегасних речовин – інертних розріджувачів та рециркульованих продуктів згоряння, підвищує ефективність гасіння пожежі, що проявляється у скороченні тривалості припинення полуменевого горіння (до 16 %), підвищенні швидкості зниження середньооб'ємної температури (до 17%) за однакової витрати зазначених вогнегасних речовин у разі їх роздільного подавання для гасіння та флегматизування газового горючого середовища;

– набуло подальшого розвитку застосування методів моделювання та проведення обчислювальних експериментів для прогнозування динаміки зміни температури та концентрацій компонентів газового середовища під час розвитку пожежі у технологічних об'ємах кабельних тунелів та її гасіння газовими вогнегасними речовинами – інертними розріджувачами з урахуванням їх розширення та поглинання стінками каналу, що дає можливість визначати концентрацію кисню в зоні горіння на будь-якій відстані від місця їх подавання;

– удосконалено методичну базу визначення основних параметрів гасіння пожеж у кабельних тунелях у разі застосування діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння, шляхом використання розробленої методики розрахунку цих параметрів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробці методики та обґрунтуванні параметрів гасіння пожеж у кабельних тунелях газовими вогнегасними речовинами-розріджувачами (діоксид вуглецю, азот), а також їх бінарними сумішами з рециркульованими продуктами згоряння.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень в частині застосування комп'ютерного методу розрахунку параметрів гасіння пожеж впроваджено у навчальний процес Львівського державного університету

безпеки життєдіяльності, а також у діяльність Управління ДСНС України в Черкаській області при складанні планів пожежогасіння.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні мети та задачі дослідження, її наукових положень, проведенні теоретичних та експериментальних досліджень, а також натурних випробувань гасіння пожеж запропонованим способом і в застосуванні методу комп'ютерного розрахунку параметрів ефективного впливу на зону горіння.

В публікаціях із співавторами основні ідеї належать здобувачу.

***Особистий вклад здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:***

[1] – математично змодельований процес інертизації кабельного тунелю з метою гасіння пожежі; [2] – математично змодельовано подавання інертного газу до осередку пожежі на значні відстані; [3] – вдосконалено математичне моделювання розвитку та гасіння пожежі в каналах інертними газами з наступною їх рециркуляцією; [4] – запропоновано математичну формулу, яка враховує процес розвитку горіння твердих речовин та їх вигорання з урахуванням переміщення пожежі; [5] – розроблено методику розрахунку параметрів гасіння пожеж на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень, запропоновано комп'ютерний метод обґрунтування параметрів ефективного гасіння пожеж та перевірка адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту; [6] – розроблено зонну модель розвитку та гасіння пожеж з розбиттям на дві зони, проведено ряд дрібномасштабних експериментів при подачі азоту, діоксиду вуглецю та рециркуляції газового середовища; [7,10] – проведено розрахунок параметрів гасіння пожежі інертними газами з подальшою їх рециркуляцією; [8, 9] – розроблено математичну модель нестационарного переносу інертного газу в кабельних тунелях, та підтверджено її адекватність, що дає змогу обґрунтувати параметри гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались та отримали позитивну оцінку на Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників «Пожежна безпека та аварійно-

рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи» (Київ, 2014 р.); ІХ Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні» (Миколаїв, 2014); Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників «Сучасний стан цивільного захисту: перспективи та шляхи до Європейського простору» (Київ, 2015 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси, 2015 р.); наукових семінарах Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 10 наукових працях, з яких 6 статей у наукових фахових виданнях України, в тому числі 1 стаття у закордонному періодичному виданні, 4 публікації у матеріалах наукових конференцій.

**Структура і об'єм роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації – 185 сторінок, в тому числі основна частина – 143 сторінки. Дисертація містить 13 таблиць, 60 рисунків, 7 додатків. Список використаних літературних джерел із 136 найменувань.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### **1.1. Стан пожежної безпеки та аналіз відомих способів гасіння пожеж в кабельних тунелях**

Огляд та аналіз інформаційних матеріалів з протипожежного захисту кабельних тунелів свідчить про те, що значна їх частина присвячена перш за все кабельним каналам, метрополітенам, гірничим виробкам вугільних шахт, тобто, енергетично важливим для життєдіяльності об'єктам, а також об'єктам з масовим перебуванням людей [3–5, 8, 10, 11, 14–17]. Усі кабельні приміщення енергетичних підприємств розділяються на кабельні напівповерхи, тунелі, канали та галереї. Кабельні галереї та напівповерхи, як правило, можуть бути на електростанціях, а кабельні тунелі та канали - на електростанціях та інших енергетичних підприємств. Кабельні тунелі бувають горизонтальними та похилими, перерізом 4 м<sup>2</sup> і більше. По довжині їх розділяють на відсіки протипожежними перегородками та дверима з межею вогнестійкості 45 хв. Довжина одного відсіку кабельного тунелю, розміщеного під будівлею, не повинна перевищувати 40 м, а за межами будівель - 150 м (100 м з маслонаповненими кабелями). Кожен відсік тунелю повинен мати не менше двох люків через кожні 50 м діаметром 70-90 см для виходу та подавання вогнегасних засобів, а також систему вентиляції та каналізацію. В кабельних тунелях пожежне навантаження (ізоляція кабелів) може становити 30-60 кг/м<sup>2</sup>. Вентиляцію тунелів розраховують, виходячи з очікуваних тепловиділень від кабелів. Тепловиділення від кабелів підраховують за фактичними втратами, використовуючи дані за кількістю та їх перерізом, а також за струмовими навантаженнями. При відсутності таких даних теплові втрати можуть бути приблизно прийняті 0,6 кВт/м тунелю. Перепад температури між повітрям, що поступає та видаляється в тунелі не повинен перевищувати 10°C. Ці умови зазвичай потребують влаштування механічної припливно-витяжної вентиляції. Для цього в місцях розподілу кабельного тунелю на відсіки влаштовують проміжні вентиляційні камери (вентиляційні шахти), які служать для входу в

тунель, поміщують установки вентиляційних систем та кабельних конструкцій. Деколи для цієї мети передбачають спеціальні монтажні прорізи, для яких використовують частини перекриття тунелю, які встановлюються в кінцевому результаті після завершення монтажу.

До вентиляційних шахт зазвичай примикають також приміщення для розміщення протипожежних засобів. Забір чистого повітря для систем вентиляції кабельних споруд повинен влаштовуватися ззовні. Викид повітря з систем вентиляції кабельних споруд, як правило, слід проектувати назовні. Управління вентиляційними установками кабельних тунелів повинно забезпечувати автоматичне їх відключення від імпульсу сповіщувача пожежної сигналізації, дистанційне відключення та включення зі щита автоматичної пожежної сигналізації та місцеве відключення установок припливної та витяжної вентиляції. Кабельні тунелі обладнують автоматичною пожежною сигналізацією, для чого встановлюють автоматичні сповіщувачі. Ці сповіщувачі реагують на дим та підвищення температури навколишнього середовища вище 50-60°C. В аварійних ситуаціях сигналізація повинна забезпечувати: відключення вентиляційних установок, автоматичне закриття вентиляційних заслінок для зупинення доступу повітря до зони горіння, загальний сигнал пожежної тривоги черговому пожежній охорони, сигнали (звуковий і світловий) з встановленням місця виникнення пожежі черговому персоналу установки.

Для гасіння пожежі у відсіках кабельних тунелів передбачають стаціонарні системи для дистанційного та автоматичного пожежогасіння. Стаціонарні системи пожежогасіння забезпечують роботу за допомогою ключа, що має можливість вибору способу запуску (автоматичного, ручного дистанційного або ручного місцевого). Перехід на автоматичне управління здійснюють залежно від ситуації, що оцінюється обслуговуючим персоналом. Допускається не обладнувати системами пожежогасіння кабельні тунелі невеликої довжини – 20-25 м.

Для гасіння пожежі в міжцехових кабельних тунелях необхідно передбачати використання пересувних засобів (наприклад, пожежні

автомобілі), з подаванням від них вогнегасних засобів до зони горіння безпосередньо або з допомогою стаціонарної системи зі «сухотрубами». Для безпосереднього подавання вогнегасних засобів з пересувних установок всередині міжцехового тунелю використовують виходи з них і вентиляційні шахти. Якщо відстані між ними перевищують 30 м, тоді влаштовують додаткові люки.

Пожежі в кабельних тунелях супроводжуються високою температурою, великою швидкістю розповсюдження вогню та диму. В горизонтальних кабельних тунелях лінійна швидкість розповсюдження полум'я по кабелях при знятій напрузі становить 0,15-0,3 м/хв, а під напругою 0,5-0,8 м/хв. Швидкість росту температури в кабельних тунелях за експериментальними даними становить в середньому 35-50 °С за хвилину. В тунелях з маслонаповненими кабелями окрім ізоляції може горіти трансформаторна олива, яка знаходиться в трубах при температурі 35-40 °С та надлишковому тиску. В цих тунелях, особливо при аварії, олива що горить, швидко розтікається по похилих поверхнях, в результаті чого значно збільшується площа горіння. Пожежі в кабельних тунелях, як правило, є дуже тривалими, складними та завдають великих матеріальних збитків. Пожежі в кабельних тунелях, що тривають більше 1 год, становлять близько 40 % щорічно, а збитки від них становлять 80-90 % від загальної суми збитків від пожеж на об'єктах енергетики [119].

Протяжність кабельних тунелів, їх обмежені розміри, складна форма трас і значна кількість кабелів практично виключають можливість ефективного гасіння пожеж в кабельних тунелях різними засобами, застосування яких ще більше ускладнюється концентрованим виділенням тепла, густого диму та отруйних речовин.

Проблема протипожежного захисту кабельних споруд є однією із актуальних. Згідно з даними статистики, сьогодні кожна четверта пожежа пов'язана з електроустаткуванням, а більша частина цих подій (60%) відбувається саме через загоряння в кабельних лініях. Подібні інциденти, основними причинами яких є поганий стан ізоляції, ослаблення контактних

з'єднань, різні ушкодження й несправності в роботі електроустаткування, є дуже небезпечними й призводять до значних матеріальних втрат, що полягають у вартості кабелів і проводів, які згорають, а також збитків через зупинку виробництва й порушення енергопостачання. Так, на Запорізькій АЕС, у передпусковий період в 1984р. вигоріла траса із сумарною довжиною кабелів 800 км [119].

В комунікаційному колекторі м. Москви в 1995р. через коротке замикання кабелю постійного струму, виникла пожежа, яка вивела з ладу значну кількість електричних кабелів Мосенерго [101].

В головному кабельному каналі експериментальної установки прискорювача DESY Гамбургського університету (ФРН) виникла пожежа [2], в результаті якої було зруйновано кабельну мережу і обладнання, пошкоджено будівлю, а роботу на установці було припинено на тривалий час. Аналогічна пожежа у підземному комунікаційному тунелі паралізувала у 1988 році енергозабезпечення в декількох районах м. Сіетл (США) [122].

Такі пожежі на вищезазначених прикладах ясно ілюструють необхідність застосування секціонування кабельних тунелів для зменшення об'єму гасіння з монтажем для кожної секції стаціонарних автоматичних установок пожежогасіння, оскільки при розділенні всього об'єму тунелю на секції, ефект від роботи цих систем буде максимальним та значно зменшить затрати вогнегасного засобу на ліквідацію загоряння чи пожежі.

Займання кабельних виробів може статися під впливом внутрішніх та зовнішніх джерел запалювання. Для кабельної продукції характерними є внутрішні джерела запалювання електричного походження, до основних з яких слід віднести такі [26]: надмірне нагрівання, електричні дуги й іскри, розжарені чи палаючі частки. До утворення цих джерел запалювання можуть призвести такі аварійні режими роботи КП: струм КЗ, струм перевантаження, перенапруга, струм витоку, збільшення перехідного опору в контактних з'єднаннях.

Зовнішніми джерелами запалювання для кабельних виробів є відкрите полум'я, що утворюється під час займання об'єктів, розташованих поблизу них, та надмірна кількість теплоти, що виділяється від теплогенеруючих установок та виробів, що горять. Звичайно, вплив зовнішніх джерел запалювання на електричні кабельні вироби спричиняє їх коротке замикання, що також може сприяти прискоренню процесу розвитку пожежі від них.

Таблиця 1.1. Статистика пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції [119].

№ з/п	Рік	Кількість пожеж	Кількість загиблих	Кількість травмованих	Прямі збитки тис.грн	Побічні збитки тис.грн
1.	2010	8049	170	198	178311,8	331160,4
2.	2011	8249	174	208	254487,8	417806,2
3.	2012	9854	209	262	434779,7	807466,3
4.	2013	9604	194	255	266886,3	565452,5
5.	2014	9633	164	228	302195,9	570237,5



Рисунок 1.1 – Статистика пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції





Рисунок 1.2 – Статистика загиблих внаслідок пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції

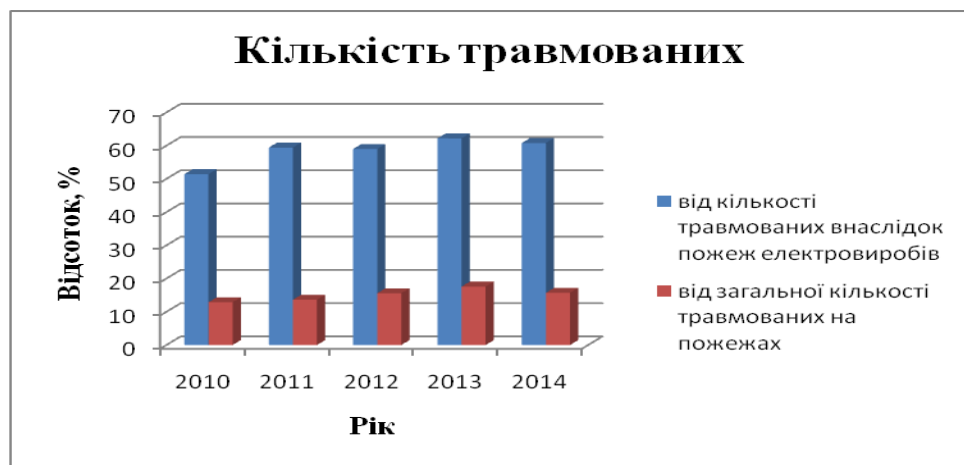


Рисунок 1.3 – Статистика травмованих внаслідок пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції

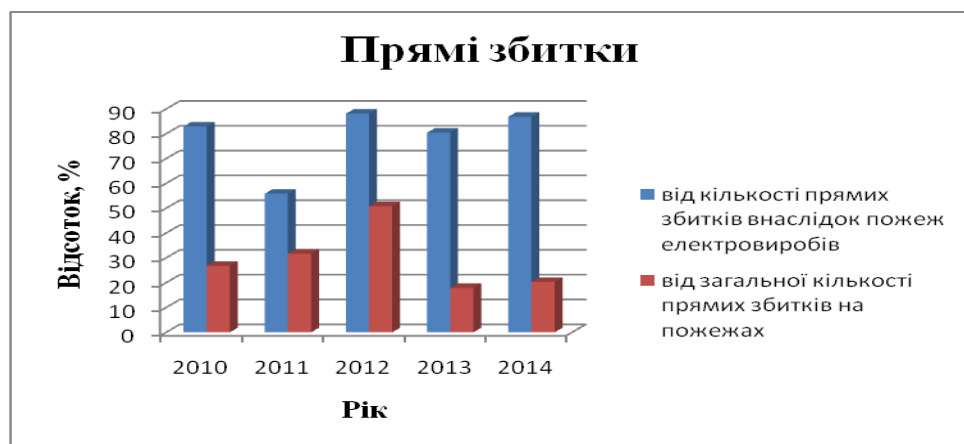


Рисунок 1.4 – Статистика прямих збитків внаслідок пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції

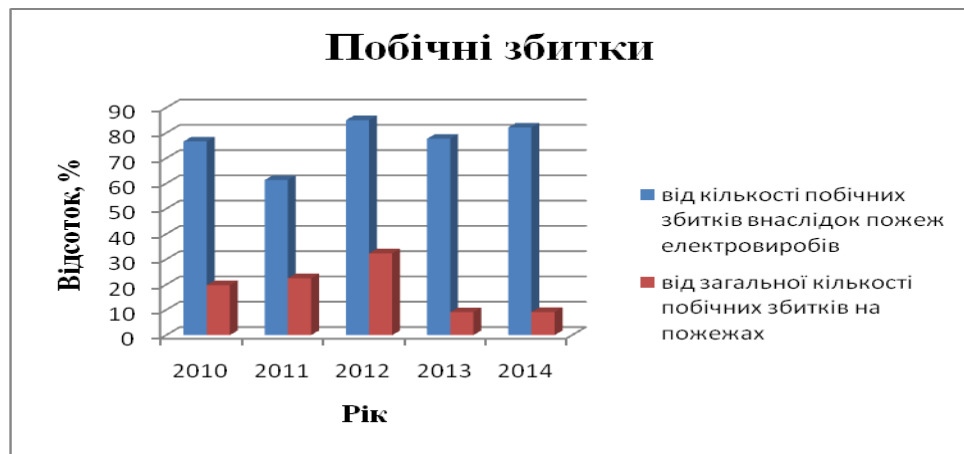


Рисунок 1.5 – Статистика побічних збитків внаслідок пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції

Таблиця 1.2. Відсоткові статистичні показники пожеж в Україні від електропроводки і кабельної продукції

Рік	Кількість пожеж		Кількість загиблих		Кількість травмованих		Прямі збитки		Побічні збитки	
	% від кількості пожеж від електро-виробів	% від загальної кількості пожеж	% від кількості загиблих унаслідок пожеж від електро-виробів	% від загальної кількості загиблих унаслідок пожеж	% від кількості травмованих на пожежах від електро-виробів	% від загальної кількості травмованих на пожежах	% від кількості збитків від електро-виробів	% від загальної кількості збитків	% від кількості збитків від електро-виробів	% від загальної кількості збитків
2010	70,44	12,94	36,56	6,03	51,43	12,88	82,93	26,75	76,63	19,74
2011	73,13	13,57	39,01	6,06	59,43	13,64	55,85	31,7	61,38	22,5
2012	75,12	13,79	40,98	7,6	59,01	15,58	88,08	50,75	85,05	32,36
2013	77,88	13,94	49,74	8,64	62,2	17,39	80,43	17,91	77,72	9,06
2014	78,15	13,99	46,59	7,3	60,8	15,72	86,82	20,29	82,15	9,14

Традиційно гасіння пожеж в кабельних тунелях здійснюють повітряно-механічною піною, розпиленою водою, водяною парою, інертними газами (азотом, діоксидом вуглецю, хладоном), які подають від стаціонарних установок автоматичного пуску, а також від пересувних засобів. Стаціонарні установки мають пристрої для підключення пожежних автомобілів та подавання від них в тунелі вогнегасних засобів. При виникненні пожеж в

кабельних тунелях для запобігання швидкому розповсюдженню полум'я в сусідні відсіки необхідно відразу закрити двері в міжсекційних перегородках і відключити систему вентиляції.

Прояв домінуючих чинників припинення горіння у замкнених і напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання на гасіння пожеж вогнегасних речовин продемонстровано на рис. 1.6

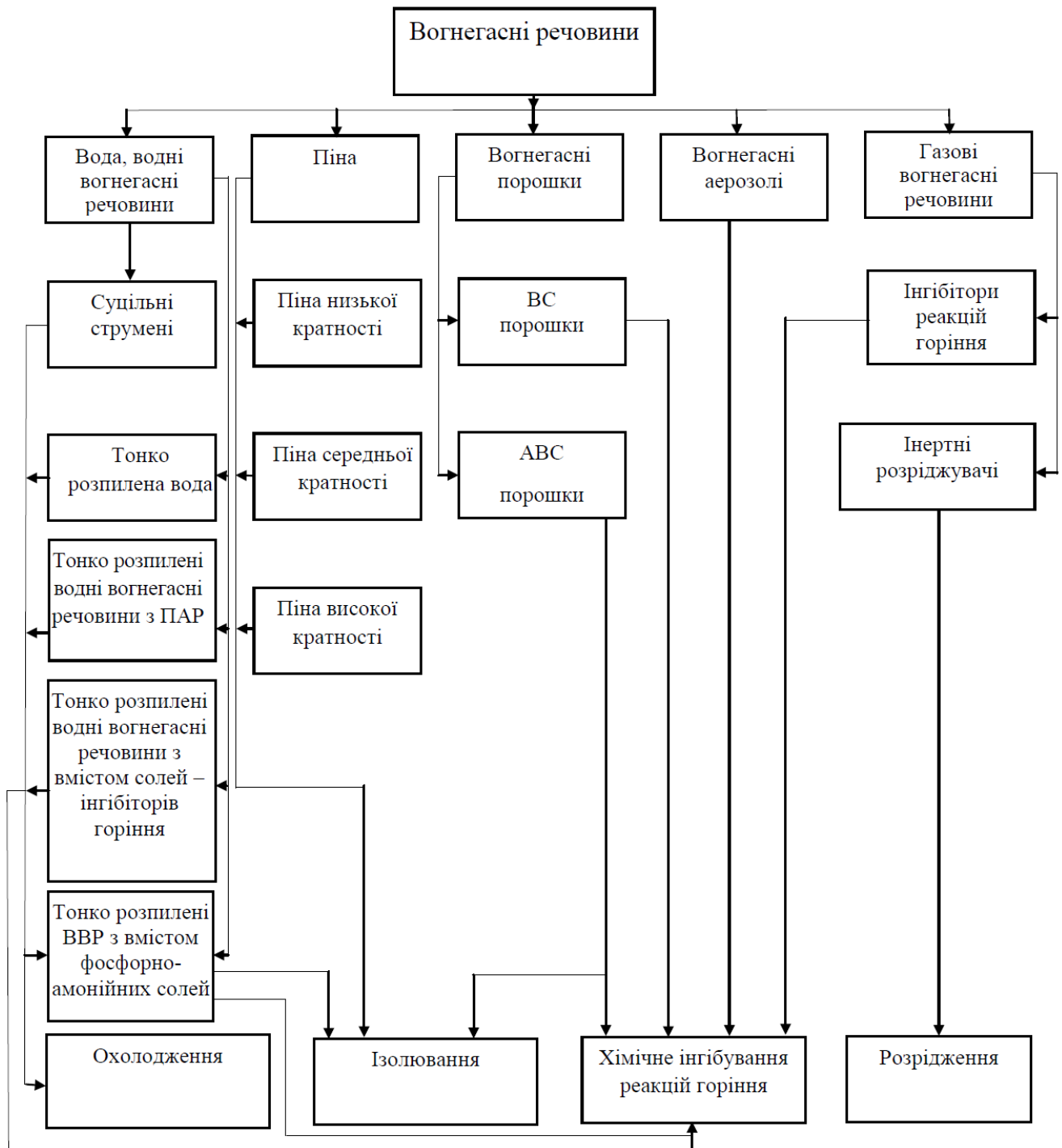


Рисунок 1.6 – Схема домінуючих чинників вогнегасних речовин у разі подавання їх на гасіння пожеж в кабельних тунелях

Методи пожежогасіння постійно вдосконалюються. На зміну стандартним методам – водяне, пінне, порошкове пожежогасіння – все ширше застосовується спосіб гасіння пожеж інертними газами (азотом, діоксидом вуглецю).

У випадках, коли підхід до осередків горіння є важкодоступним внаслідок високої температури на аварійній ділянці, можливих обрушень або значного димовиділення, перевага віддається способам та засобам дистанційного гасіння пожеж.

До підземних приміщень відносяться електропідстанції метрополітенів, кабельні підвали та виробки, середня площа яких становить 160 м<sup>2</sup>, а умовна інтенсивність тепловиділення при пожежі в них є найбільшою та сягає 419 кВт/м<sup>2</sup>.

Основним горючим навантаженням на електропідстанціях та кабельних каналах є силові кабелі та монтажні проводи, в якості ізоляції та зовнішньої оболонки яких застосовуються, в основному, полімерні матеріали. Такі електричні кабелі, як правило, не розповсюджують полум'я, але при впливі високої температури виділяють густий дим, що ускладнює гасіння, може призвести до загибелі людей через високу токсичність та пошкодження обладнання внаслідок корозійної активності. Димоутворююча здатність ПВХ-матеріалів в режимі піролізу в 2 і більше рази вища, ніж при його горінні. Вихід хлориду водню та оксиду вуглецю при згорянні одного грама ПВХ становить відповідно 40-200 та 50-100 мг. В загальній кількості газоутворюючих продуктів, що виділяють ПВХ, вміст CO, CO<sub>2</sub> та HCl становить 99 %.

При виникненні теплового джерела порушується встановлений стан повітряного середовища в каналі. В результаті горіння суміш газів та диму під впливом підймальних сил створює тепловий конвективний струмінь, при цьому прослідковується інтенсивна поперечно-поздовжня зміна її параметрів. Багатовекторність проектних рішень створює визначені труднощі для оцінки шляхів розповсюдження полум'я та продуктів горіння.

Як показує аналіз літературних джерел, розвиток пожежі в кабельних спорудах зазвичай характеризується залежністю середньооб'ємної температури від часу. В той же час відсутні дані про масову швидкість вигорання горючих матеріалів кабелів та лінійну швидкість розповсюдження полум'я по них, отримані в умовах реального пожежного навантаження при визначеному повітрообміні [4, 127, 134].

Аналіз причин таких пожеж на вітчизняних підприємствах свідчить, що на цих об'єктах не дотримуються елементарного протипожежного режиму, обслуговуючий персонал недостатньо знає правила пожежної безпеки та має низьку кваліфікацію з ліквідації пожеж на початковій стадії їх виникнення. Недостатньо вирішені технічні питання із герметизації відсіків кабельних тунелів, вогнестійкість дверей не відповідає вимогам протипожежних норм, електричні кабелі прокладені з грубими порушеннями правил влаштування електроустановок. Бувають випадки, коли через кабельні тунелі проходять транзитні повітроводи без відповідної межі вогнестійкості, в галереях з стрічковими конвеєрами недостатньо вирішені питання регулярного прибирання пилу і т.п.

Залежно від умов розвитку пожежі та за наявності вибухонебезпечного середовища, для ліквідації такої аварії в каналі застосовують, так звані, пасивні або активні способи гасіння.

Пасивні способи пов'язані з ізоляцією аварійної ділянки (відсіку), коли ліквідація пожежі пов'язана з можливістю вибуху газоповітряного середовища та загрозою для життя працюючих або рятувальників, з відсутністю або неефективністю на даній ділянці первинних засобів пожежогасіння [8]. В цьому випадку полум'яне горіння буде зупинено тільки після вигорання кисню, а його концентрація буде не більше 10 %. З урахуванням потужності пожежі та температури нагрітих стінок каналу така ізоляція аварійної ділянки може продовжуватися декілька місяців, що призводить до значних матеріальних збитків.

Активні способи гасіння пожежі пов'язані з безпосереднім впливом на нього вогнегасних речовин, серед яких найбільшого розповсюдження отримала розпилена вода [3, 9, 15 – 19, 111, 112, 121]. При цьому використовують переносні вогнегасники, мобільні установки, а також стаціонарні автоматичні системи пожежогасіння. Для гасіння пожежі в кабельному напівповерсі або кабельному тунелі силами обслуговуючого персоналу використовуються первинні засоби, при цьому персонал підстанції може гасити пожежу тільки в початковій стадії його розвитку, так як при горінні ізоляційної оболонки кабелів виділяється значна кількість шкідливих речовин, небезпечних для здоров'я людини. Гасіння розвинутої пожежі залученими оперативними підрозділами ДСНС або ДВГРС починається мінімум через 20-25 хвилин після її виявлення.

В обох випадках при проведенні заходів з ліквідації пожежі аварійний об'єкт повинен бути знеструмленим. При цьому електропостачання здійснюється за обвідною схемою, а за її відсутності відбувається повна зупинка самого підприємства на період від декількох годин до декількох днів, що призводить до значних матеріальних збитків.

Тому автоматичні системи пожежогасіння для ліквідації подібних пожеж на практиці найширше застосовуються. В теперішній час не існує вогнегасних речовин, однаково ефективних для гасіння усіх видів матеріалів. Якщо врахувати, що ліквідація підземних пожеж, в особливості розвинутих, включає створення вибухобезпечної атмосфери, зупинення полум'яного горіння та охолодження стінок каналу або гірничого масиву, то очевидно, що не тільки вид горючого матеріалу, але і конкретна стадія його гасіння повинні визначати вибір того чи іншого вогнегасного засобу або способу гасіння.

Розпилена вода, наприклад, має велику теплоємність, забезпечує інтенсивне охолодження зони горіння з одночасною інертизацією навколишнього середовища в результаті пароутворення. Разом з тим, можливості застосування води для дистанційного гасіння розвинутих пожеж, а також пожеж, пов'язаних з горінням газів, є повністю обмеженими.

Ефективними вогнегасними властивостями наділені порошкові склади [9, 25, 109], вплив яких на процес горіння обумовлений в інгібувальному впливі на протікання в полум'ї хімічних реакцій. Попри те їх застосування є найбільш ефективним лише в початковій стадії розвитку пожежі.

Завдяки поєднанню охолоджувальних та ізолювальних властивостей більші можливості має піна середньої та низької кратності [9, 10, 27, 36, 37, 60, 62, 109]. Але, зі збільшенням кратності піни більше 1000 вогнегасна властивість повітряно-механічної піни погіршується.

Одним з ефективних засобів гасіння пожеж в замкнутих об'ємах та каналах являється газомеханічна піна, яка здатна швидко заповнити весь об'єм аварійної ділянки. Піна порівняно з іншими засобами впливу на пожежу наділена значними перевагами: об'ємністю заповнення аварійної ділянки та високою змочувальною здатністю розчину піноутворювача, здатністю переміщення на великі відстані під дією власної маси або завдяки тиску повітряного потоку, можливістю дистанційного впливу на зону горіння в важкодоступних місцях. Окрім цього, роботи з локалізації осередків горіння з використанням піни, як правило, характеризуються малою трудоемкістю, безпечністю та економічністю.

Багато спеціалістів пояснюють механізм припинення осередків горіння ізоляційними властивостями піни, перерозподілом фільтраційних потоків та зниженням вмісту кисню в замкнутих просторах, а також охолодженням нагрітих матеріалів та стінок каналу, а при використанні в якості газового середовища азоту – до додаткової інертизації замкнутого об'єму при руйнації піни [36, 37].

На основі вивчення закономірностей зміни фізичних параметрів піни при її русі та впливі на зону горіння в замкнутих об'ємах розроблені технології запобігання та гасіння схожих пожеж. Для реалізації таких технологій створене спеціальне обладнання, що дає змогу подавати піну на значні відстані. В роботі [60] розглянуто можливість використання високонапірної піногенераторної установки УПГВ для подавання піни кратністю 100-150 на відстань до 300 м по

трубах та свердловинах діаметром 50 мм та більше. Відмічається, що ефективність такої технології залежить від науково обгрунтованого вибору параметрів подавання піни, в тому числі, від гірничо-геологічних та гірничотехнічних умов аварійної ділянки.

В роботах [36, 37] авторами розглянуто декілька технологічних схем локалізації та гасіння пожеж повітряно-механічними та інертними пінами залежно від місця виникнення пожежі, гірничо-геологічних умов та ін. Цими схемами передбачається подавання піни, в основному, по свердловинах з поверхні.

На сучасних об'єктах електроенергетики використовуються стаціонарні автоматичні установки пінного пожежогасіння. При спрацюванні пожежної сигналізації включаються в роботу піногенератори, і піна по системі трубопроводів поступає до зони горіння та потрапляє в канал через спринклерні головки. Так, в кожному відсіку тунелю довжиною 50 м може розміщуватися 8 – 18 спринклерних головок. При цьому використовується 3% піноутворюючий склад AFFF для отримання стійкої до високих температур піни при продуктивності піногенератора не менше 75 м<sup>3</sup>/хв. В Україні розроблений новий тип піногенераторів, облаштований турбореактивним механізмом обертання крильчатки для гасіння пожеж піною високої кратності в кабельних галереях і тунелях [37].

Попри це, піна не являється універсальним засобом, як і інші вогнегасні засоби, і може застосовуватися у визначених умовах. Так, для гасіння піни розглядають умови розвитку пожежі, розраховують необхідну кількість піногенераторів та їх продуктивність, місце їх розміщення, порядок забезпечення водою та піноутворювачем, заходи ізоляції та контурування зони горіння, а також вентиляційний та газовий режим.

Для гасіння пожежі в каналах великих об'ємів (вертикальних та похилих) застосовують піну високої кратності. В каналах маленьких об'ємів доцільно використовувати піну середньої кратності.



При гасінні пожеж в тупикових або інших загазованих виробках контролюють вміст горючих газів в рудній атмосфері пожежних ділянок, оскільки піна, заповнюючи виробки, скорочує надходження повітря та створює вибухонебезпечну обстановку. Тому, якщо в вихідному струмені аварійної ділянки створюється вибухонебезпечне скупчення метану (більше 2%), подавання повітряно-механічної піни зупиняють.

В деяких країнах для гасіння підземних пожеж в гірничих виробках та кабельних тунелях розроблені способи та пристрої з використанням продуктів згоряння, що рециркулюються багаторазово з зони горіння цієї ж пожежі [9, 11, 47, 49, 52, 68, 93, 94, 123, 125]. Загальним для цих способів гасіння пожеж є те, що аварійна ділянка повинна бути ізольованою перемичками, багаторазове послідовне відсмоктування, охолодження та нагнітання продуктів згоряння в зону горіння шляхом їх пропуску через повітроводи, з'єднуючої перемички на протилежних кінцях ізольованої ділянки. В цьому випадку, якщо теплової депресії недостатньо для нормальної циркуляції продуктів згоряння, в повітропроводі зі сторони нагнітання встановлюють вентилятор або генератор інертних газів [45]. Відмінними ознаками цих способів є те, що аварійна ділянка провітрюється продуктами згоряння, охолодженими розпиленою водою або інертними парогазовими сумішами протягом часу, необхідного для охолодження цих газів та зниження вмісту кисню в них до величини, при якій зупиняється процес горіння. Для зменшення інтенсивності горіння та скорочення термінів ізоляція аварійної ділянки в рециркуляційний потік продуктів згоряння вводять вогнегасні присадки.

Таким чином, результати аналізу способів гасіння пожеж в тунелях, каналах, гірничих виробках, метрополітені та на інших подібних об'єктах свідчать про широке використання як первинних засобів, так і автоматичних систем пожежогасіння із застосуванням води, піни, вогнегасних порошоків, інертних газів або їх комбінацій. Меншою мірою для цієї мети використовують у вигляді рециркуляції димові гази з тієї ж пожежі, але в деяких випадках (при

обмеженому запасі чи неефективності застосування інших вогнегасних засобів) цей спосіб є найбільш прийнятним.

Одним з найбільш ефективних методів запобігання вибухам або розвитку пожеж є загальна інертизація атмосфери на аварійній ділянці каналу, заснована на заміщенні повітря, що поступає до осередку горіння, газом, що не містить кисню або з низьким його вмістом. На практиці для цієї мети широко використовують вуглекислий газ, азот, хладон та інертну парогазову суміш, як охолоджуючі продукти згорання вуглеводневого палива. Інертизація може застосовуватися самостійно або в комплексі з іншими способами гасіння.

Інертизація дає змогу: скоротити термін ліквідації пожежі, запобігти вибуху газоповітряної суміші на аварійній ділянці, пришвидшити охолодження високотемпературної зони до безпечного рівня, скоротити до мінімуму або повністю зупинити процес горіння.

Методика газового пожежогасіння є простою: кисень повітря, необхідний для горіння, заміщується інертним газом до тої долі кисню, коли горіння фактично зупиняється. Так, наприклад, застосування систем азотного пожежогасіння безпосередньо пов'язане з легким способом отримання азоту – мембранною технологією газорозділення.

Азот  $N_2$  з молекулярною масою 28, близькою до молекулярної маси повітря – 29, на відміну від рідини, піни або порошку – легко проникає у найнедоступніші ділянки, а після того, як пожежа ліквідована, азот просто вивітрюється. Азот також успішно застосовується для створення вибухо та пожежобезпечного середовища, наприклад, в гірничовидобувній справі, в нафтогазовій промисловості, у виробничих об'ємах, що не потребують персоналу.

В сучасних установках азотного пожежогасіння азот генерується прямо на місці роботи – повітря проходить через пористі волокна мембран, і кисень просочується скрізь стінки мембран, а азот – проходить до кінця волокон. В результаті потік повітря, що входить, розділюється на два потоки, що виходять

з установки – інертну газову суміш (ІГС), що містить не більше декількох відсотків кисню, та насичену киснем суміш газів.

Мембрани самі по собі є дуже надійними, їх термін експлуатації становить до 20 років. Вони не бояться перепаду температур, вологого повітря, тряски та інших складних умов. Мембранні установки азотного пожежогасіння не вимагають частого обслуговування, на відміну від установок інших типів.

Для гасіння пожеж на енергооб'єктах широкого застосування набув вуглекислий газ або діоксид вуглецю  $\text{CO}_2$ , що є безколірним важким газом з молекулярною масою 44 на відміну від повітря, молекулярна маса якого становить 29. При практичних розрахунках слід враховувати, що тиск всередині балонів залежить від температури та коефіцієнта заповнення. Механізм зупинення горіння діоксидом вуглецю пояснюється його здатністю розбавляти концентрацію реагуючих речовин до меж, при яких горіння стає неможливим. Діоксид вуглецю може подаватися в зону горіння у вигляді снігової маси, чинячи при цьому охолоджуючу дію. З одного кілограма рідини діоксиду вуглецю утворюється 506 л газу. Вогнегасний ефект досягається, якщо в повітрі концентрація діоксиду вуглецю не менше 30 % за об'ємом.

Хладон 114В2 - важка безколірна рідина зі специфічним запахом та температурою кипіння  $47^\circ\text{C}$ . Тому в приміщення для гасіння пожежі він подається в розпиленому стані. Хладон є дуже ефективним інгібітором горіння. Як встановлено, його масова вогнегасна концентрація  $0,215 \text{ кг/м}^3$ . Пари хладону є набагато важчими за повітря (густина парів  $8,97 \text{ кг/м}^3$ ). При подаванні хладону у верхню зону його пари швидко осідають та впливають на зону горіння по всій висоті незначної довжини приміщення. Попри це при подаванні на великі відстані хладон майже весь залишиться на поверхні. З 1 кг хладону при  $0^\circ\text{C}$  утворюється 87 л парів.

При подаванні в захисне приміщення хладон контактує з матеріалами, що горять тільки в паровій фазі, тому відсутнього побічного впливу на них (включаючи електронне обладнання) не надає. Транспортування хладону для гасіння здійснюють по трубопроводах з допомогою стисненого повітря або

азоту. Незважаючи на високу вогнегасну ефективність він є обмеженим для застосування згідно Монреальського протоколу через високий озоноруйнівний потенціал.

Інтенсивність випуску діоксиду вуглецю зазвичай не перевищує  $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$  (приблизно 350 балонів за годину). Тому, незважаючи на суттєві флегматизуючі властивості діоксиду вуглецю, застосування його обмежене невеликим об'ємом ізольованої ділянки каналу.

В деяких країнах широко використовують парогазову суміш та значно рідше – діоксид вуглецю та азот. В той же час в Німеччині для цієї мети застосовують азот [123]. До переваг його використання відносяться: простота транспортування в рідкому стані, достатньо висока (до  $5 \text{ м}^3/\text{с}$ ) продуктивність установок із перетворення рідкого азоту в газоподібний, можливість отримання чистого інертного газу з низькою температурою та вологістю, високий ступінь безпеки отримання та застосування. Недоліками є складність отримання великої кількості рідкого азоту та неможливість створення його запасів для тривалого зберігання, висока трудомісткість подавання газоподібного азоту по системі трубопроводів.

На теперішній час, враховуючи закордонний досвід, в Україні створено пересувну установку, котра призначена для отримання з атмосферного повітря газоподібного азоту. Продуктивність такої установки по азоту на виході з мембранного модуля при концентрації азоту 95 % становить  $15 \text{ м}^3/\text{хв}$ , а номінальний тиск – 0,8 МПа. Установка розміщується на поверхні шахти та з'єднується з аварійною ділянкою спеціально прокладеним або технологічним шахтним трубопроводом. Попри це досвід її застосування при ліквідації підземних аварій на шахтах Донбасу показав, що досягнути ефективного гасіння осередків горіння з допомогою такої установки із застосуванням сучасних технологічних прийомів не вдається [24].

Однією з причин є те, що при локалізації аварійної ділянки вибухостійкі перегородки встановлюються на безпечній відстані, в результаті чого локалізується значний об'єм гірничих виробок, а до цієї ділянки з поверхні

поступає азот не більше 50 % продуктивності установки. Це призводить до тривалої інертизації аварійної ділянки, а з урахуванням того, що потужні компресорні установки та інше обладнання на ній споживає значну кількість електроенергії, то застосування такого способу гасіння пожежі являється не ефективним та економічно недоцільним, і тому потребує застосування інших технологій пожежогасіння.

Окрім того, проблема пов'язана також з тим, що в отриманому мембранним способом азоті міститься до 5 % кисню. Окрім того, в ізолювану ділянку потрапляє у вигляді витоків повітря, яке фільтрується через нещільності з'єднань перегородок зі стінками виробки та тріщин в породі. Концентрація кисню в ізолюваній аварійній ділянці може підвищуватися більш ніж на 10 %, що недостатньо для гасіння пожеж, тим більше для припинення тління, коли необхідний вміст кисню в межах 1-2 %.

Тому, на думку авторів [24], більш надійним та ефективним способом ізоляції може бути технологія, при якій джерелом зняття депресії з аварійної ділянки є енергія потужних компресорів газороздільної станції. Її застосування дозволяє створити градієнт тиску на ізолювальну перемичку та тим самим замінити надходження повітря надходженням азоту.

Практика дистанційного гасіння пожеж свідчить про ефективне застосування засобів пожежогасіння, які можуть бути в найкоротший термін доставлені до місця застосування, мають високу продуктивність та дальність подавання вогнегасної речовини протягом тривалого часу. Цим вимогам в найбільшій мірі відповідають способи та засоби отримання інертного газу на мобільних установках або безпосередньо в гірничих виробках шляхом спалювання в спеціальних установках вуглеводневого палива з наступним охолодженням водою продуктів згоряння [23, 30-35].

Застосування авіаційного двигуна в якості основного силового приводу установок в даному випадку являється одним з напрямів рішення проблеми отримання інертної парогазової суміші у великому об'ємі.

Вартість вихідних продуктів для отримання 1 м<sup>3</sup> парогазової суміші в декілька разів менша, ніж для отримання діоксиду вуглецю та газоподібного азоту відповідно. Установа забезпечує швидке заповнення парогазовою сумішшю приміщень, охоплених пожежею, що дозволяє оперативно придушити в них полум'я та запобігти утворенню вибухонебезпечного середовища. Застосування установки підвищує безпеку проведення робіт з гасіння пожеж, попри це має ряд недоліків. Через високі температури (80-90 °С) та вологість (100 %) парогазової суміші знаходиться в приміщеннях в момент їх заповнення дуже небезпечно. Окрім того, при заповненні приміщень (виробок) парогазовою сумішшю, високі температури та вологість призводять до зниження міцності конструкцій каналів та їх обвалення. Велика витрата води (30 м<sup>3</sup>/год) при роботі генераторів інертного газу не дозволяє використовувати агрегат автономно (без спеціального водопроводу), при незначному тиску або перебоях в подаванні води.

Таким чином, аналіз відомих способів гасіння пожеж в кабельних тунелях показав, що найбільш перспективним та ефективним є спосіб пожежогасіння азотом або діоксидом вуглецю з наступною рециркуляцією продуктів згоряння.

## **1.2. Засоби газового пожежогасіння**

Установки газового пожежогасіння (УГП) на теперішній час все більш широко застосовуються для протипожежного захисту тунелів та технологічного обладнання. Вогнегасний газ ефективно ліквідує пожежі об'ємним способом та легко проникає в зону пожежного об'єкта, куди подавання інших речовин, наприклад порошку, піни, розпиленої води, є ускладненим. Після ліквідації пожежі або несанкціонованого пуску УГП газова вогнегасна речовина (ГВР), практично, не створює шкідливого впливу на матеріальні цінності, що охороняються, порівняно з іншими вогнегасними речовинами та легко видаляється вентиляційним способом. Тому автоматичні установки газового пожежогасіння (АУГП) широко застосовують для захисту електрокабелів, приладів та щитів управління. Вибір газової вогнегасної речовини повинен

виконуватися тільки на основі науково-технічного та економічного обґрунтування. Кожна з дозволених до застосування ГВР є достатньо ефективною, і пожежу буде ліквідовано, якщо в захищуваному об'ємі буде створено нормативну вогнегасну концентрацію, встановлено час її подавання, виходячи з науково обґрунтованого прогнозу зниження температури в зоні горіння до 100 °С. Існує два способи газового пожежогасіння: об'ємний та локально-об'ємний.

В переважній більшості випадків застосовується об'ємний спосіб. Локальний по об'єму спосіб з економічної точки зору корисний тільки в тому випадку, коли об'єм приміщення більше ніж в 6 разів перевищує умовно виділений об'єм, що займає обладнання, яке підлягає захисту УГП. В цьому випадку локальний спосіб пожежогасіння економічно корисніший від об'ємного. УГП бувають двох типів: централізовані (станційні) та модульні установки. При протипожежному захисті одного відсіку на об'єкті, звичайно, встановлюється модульна УГП. За необхідності захисту 2-х і більше об'єктів вибір типу установки газового пожежогасіння, як і спосіб гасіння, визначається перш за все економічною доцільністю. Основними складовими УГП є: газова вогнегасна речовина, модулі газового пожежогасіння (МГП), розподільчі пристрої (для централізованої установки), насадки та трубопровід. Найбільш складним пристроєм, який визначає надійність роботи автоматичної установки пожежогасіння, є модуль газового пожежогасіння. Останній являє собою балон з запірно-пусковим пристроєм (ЗПП). В експлуатації більш використовуються балони місткістю до 100 літрів, оскільки вони є зручними для транспортування та монтажу та до них не пред'являються додаткові жорсткі вимоги щодо розміщення та обслуговування. Балони місткістю більше 100 л мають обмеження за місцем їх встановлення, окрім того, до осіб, що здійснюють їх обслуговування, пред'являються більш високі вимоги. Важливе місце в конструкції модуля займає балон високого тиску. Основний критерій його оцінки – коефіцієнт вагової віддачі, який характеризує його металоемкість та технологічний рівень виготовлення. Чим більше значення цього коефіцієнта,

тим більш досконалою є конструкція посудини. На теперішній час дозволено використовувати модулі газового пожежогасіння як вітчизняних, так і закордонних фірм. Запірно-пусковий пристрій модуля зазвичай містить три основних вузли: запірний орган, пусковий елемент та привод. У вітчизняній та закордонній практиці застосовують два типи запірних органів: клапанні та мембранні. Привод ЗПП, як правило, містить кінематичні механізми: поршні, клапани, важелі на осях та інші рухові елементи, які для забезпечення спрацювання потрібно крутити або переміщати. Пусковим елементом ЗПП зазвичай являються електромагніти або піропатрони. Найбільшого розповсюдження набули останні, оскільки вони не містять рухомих елементів (всю енергію зосереджено в їх заряді) та не потребують технічного обслуговування. На об'єкті, обладнаному системою газового пожежогасіння, модулі можуть знаходитися в черговому режимі без спрацювання дуже довгий період (10 та більше років).

Одним із засобів газового пожежогасіння є пересувна станція азотного пожежогасіння ТГА-25/20. Важливе застосування установки - гасіння підземних пожеж. Азот потрібної концентрації виробляється станцією прямо на місці гасіння з атмосферного повітря. Навколишнє середовище при цьому не забруднюється продуктами гасіння. Крім того станція застосовується для створення інертного середовища в процесах газо- та нафтодобування, гірничодобувній справі, при перевірці ємностей, трубопроводів і т.д. Вона вирішує весь спектр задач, що є характерним для моделей серії СДА. Конструктивно азотна станція ТГА-25/20 є автономною компресорною установкою, змонтованою на шасі підвищеної прохідності та закритою від зовнішніх впливів металевим капотом. Робоча температура навколишнього повітря повинна бути від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+45^{\circ}\text{C}$ . Відома ще стаціонарна установка азотного пожежогасіння АМУ, призначена для виявлення загорянь на контрольованій площі, оповіщення про пожежу та подаванні вогнегасного азоту. Область її застосування – автоматичне пожежогасіння у виробничих приміщеннях та об'ємах, створення та підтримання в них інертного



середовища. Конструктивно установка пожежогасіння АМУ виконана як блок-бокс, який може бути утепленим або обладнаним системою кондиціонування. Завдяки цьому робочий діапазон температур навколишнього середовища – від -40 до + 50°C. Гарантійний термін служби газорозділених мембран в установці – 18 років, після чого мембрани підлягають заміні. Таким чином, установка азотного пожежогасіння АМУ – максимально надійне джерело азоту, володіє всією необхідною автоматикою та не потребує обслуговування оператором.

В гірничорятувальній справі для гасіння азотом пожеж в шахтах застосовуються газифікаційні установки АГУ-2м та АГУ-2к. Їх продуктивність 6 м<sup>3</sup>/хв. Вони призначені для транспортування, зберігання та газифікації рідкого азоту на поверхні шахти з наступним подаванням його по шахтних трубопроводах до зони горіння.

Для гасіння пожеж діоксидом вуглецю застосовується установка «Іній» продуктивністю від 30 м<sup>3</sup>/хв до 90 м<sup>3</sup>/хв. Доставка газу до зони горіння здійснюється по трубопроводах з балонів об'ємом від 7 м<sup>3</sup> до 10 м<sup>3</sup> газу.

Таким чином, для гасіння пожеж інертними газами на об'єктах різноманітної протяжності є достатня кількість різноманітних засобів ліквідації аварій подібного роду, до яких можна віднести як стаціонарні, так і пересувні установки для локального та дистанційного подавання інертного газу до зони горіння.

### **1.3. Аналітичне дослідження тепломасообмінних процесів в кабельних тунелях при виникненні пожеж та їх гасінні**

Газове середовище в каналах різноманітного призначення є відкритою термодинамічною системою, яка обмінюється масою та енергією з зовнішнім середовищем та стінками каналу.

Відомі багаточисленні дослідження тепломасообміну при пожежах в приміщеннях як малого, так і великого об'єму [4, 6, 7, 9, 38, 40, 41, 47, 51-53, 66, 67, 70-72, 75, 94-98, 118]. Сучасні моделі розрахунку параметрів тепломасообміну в приміщеннях можна розділити на три групи: інтегральні,

зонні та польові [7]. В інтегральних моделях пошуковими параметрами є середньооб'ємні величини тиску, густини, температури та концентрації кисню, токсичних продуктів горіння та диму. В цьому випадку математична модель представлена у вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь нестационарного переносу маси (тільки в часі) та енергії всього приміщення в цілому.

Зонні моделі дещо відрізняються від інтегральних моделей тим, що розглядається декілька зон (дві або три), в яких параметри середньооб'ємні для кожної зони з умовами стиковки на границях зон. Зонні моделі дозволяють враховувати ті процеси, які відбуваються, наприклад, не тільки в зоні горіння, але і за її межами. Зонні моделі є більш складними порівняно з інтегральними моделями, оскільки враховують більше число звичайних диференціальних рівнянь, кратних числу зон.

Аналітичне вирішення системи рівнянь в інтегральній або в зонній моделі можна отримати тільки в окремих спрощених випадках.

Найбільш повне описання процесів тепломасообміну при пожежах в приміщеннях дають польові або, як їх називають, диференціальні моделі. Так, одномірна польова модель дає змогу дослідити тиск, густину, температуру, концентрації газів в одному напрямку, наприклад, вздовж кабельного тунелю. Двомірна модель дозволяє дослідити ці параметри в якій-небудь площині, наприклад, в вертикальній, а тривимірна модель дає опис полів швидкості, тиску, температури та концентрації газів в будь-якій точці приміщення по висоті та по ширині. Попри те тривимірні або навіть двомірні моделі, незважаючи на істотний прогрес у швидкодії сучасних ЕОМ, вимагають великих затрат часу та при рішенні багатоваріантних задач є малоефективними.

В роботі [7] проведено аналіз сучасного стану математичного моделювання тепломасообміну в складних термогазодинамічних умовах та дано короткий огляд математичних моделей розрахунку термогазодинаміки пожежі. Розроблено просторову та інтегральну моделі пожежі, а також процедуру чисельного рішення замкнутих систем диференціальних рівнянь.

Представлено результати розрахунків та наведено їх зіставлення з експериментальними даними. Запропоновані методики визначення фактичних меж вогнестійкості будівельних конструкцій на основі просторової моделі. Наведено приклади чисельного дослідження закономірностей тепломасообміну при пожежі в приміщеннях зі складною геометрією (коридори, багатоповерхові будівлі, багатофункціональні комплекси, підбалюстрадний простір метрополітену і т.д.).

Як зазначається [7], застосовані припущення та спрощення реальної термогазодинамічної картини у всіх типах математичних моделей призводять до значного зниження точності розрахунку параметрів тепломасообміну та потребують установа адекватності натурним об'єктам.

До того ж в ряді робіт розглядаються процеси тепломасообміну при пожежі та не розглядаються процеси її гасіння різноманітними засобами. Так, в ряді робіт пропонується для розрахунку тільки вогнегасна концентрація, наприклад, порошку [109], розпиленої води або концентрації кисню [111]. При цьому не вказується час їх впливу на зону горіння для повного гасіння, не досліджується ефективність впливу на осередок застосовуваним конкретним засобом пожежогасіння.

Не приділяється достатньої уваги самому процесу горіння, коли відбувається піроліз, при якому виділяються газоподібні продукти, які потім вступають в хімічну реакцію з киснем.

При розігріванні ділянки кабельної прокладки до високих температур, горючі матеріали в конструкції кабелів піддаються піролізу. Горючі гази, що утворюються в процесі піролізу, згорають з виділенням тепла, частина якого йде на розігрівання і піроліз прилеглої до джерела загорання ділянки кабельної прокладки, що викликає подальше розповсюдження горіння по довжині кабелів.

Для описування процесу розвитку та затухання пожежі в роботі [75] приведена емпірична залежність інтенсивності джерела тепловиділення в зоні горіння в безрозмірному вигляді

$$\bar{q} = (\tau / \tau_m)^{3,6} \exp(-3,6\tau / \tau_m), \quad (1.1)$$

де  $\tau$  – час з моменту виникнення пожежі, хв.;

$\tau_m$  – час виходу на максимум температури пожежі за даними експериментів, хв.

Формула (1.1) дає можливість визначити відносну інтенсивність вигорання твердого матеріалу з моменту виникнення та розвитку пожежі при її регулюванні вентиляцією (ПРВ) або при регулюванні пожежного навантаження (ПРН), тобто у всіх випадках.

Ця функція повинна входити в праву частину рівнянь тепломасопереносу в зоні горіння при виборі інтегральної або зонної моделі.

Запропоновані, як вже зазначалось раніше, математичні моделі пожеж та динаміки зміни температур на різноманітних об'єктах основані або на інтегральних, тобто середньооб'ємних параметрах, або на статичних методах теплових балансів, або не враховують міцного зв'язку температури з киснем. При цьому теплове джерело задається у вигляді емпіричної залежності його від часу (1.1) без переміщення в просторі [75]. Тим самим отримані результати теорії зводяться до емпіризму.

Разом з тим експериментальні дані, особливо великомасштабних пожеж [9, 11, 62, 95], говорять про те, що існує міцний зв'язок вмісту кисню з температурою продуктів згорання, та теплове джерело, за суттю, є функцією від цих параметрів, відображаючи як процеси піролізу твердих горючих матеріалів, так і процеси горіння з переміщенням зони горіння зі швидкістю, яка залежить від пожежного навантаження. В зв'язку з цим в роботі [9] запропонована функція інтенсивності тепловиділення ( $\text{кВт/м}^3$ ), що враховує переміщення пожежі у вигляді

$$q = \chi v_0 H_c \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp[-k(w\tau - x)/u]. \quad (1.2)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт неповноти згорання твердого матеріалу;

$v_0$  – початкова масова швидкість надходження продуктів піролізу в потік повітря,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$H_c$  – теплота згоряння летких речовин, кДж/кг;

$b$  – ширина поверхні термічного розкладу, м;

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

$C$  – концентрація кисню в зоні горіння, %;

$C_0$  – концентрація кисню в повітрі, що подається в зону горіння, %;

$k$  – константа швидкості реакції при піролізі, 1/с;

$w$  – швидкість переміщення осередку горіння, м/с;

$x$  – наявна відстань від місця виникнення пожежі, м;

$u$  – швидкість руху повітря, м/с;

$\tau$  – час з моменту виникнення пожежі, с.

Тут час пов'язаний з відстанню та швидкістю руху повітря залежністю  $\tau = x/u$ . Добуток  $w\tau$  швидкості переміщення осередку горіння на час представляє собою, за суттю, перемінну довжину зони горіння, яка буде весь час збільшуватися, поки не буде досягнуто кінця укладання горючих матеріалів  $x = l$ , рівною пожежному навантаженню.

Таким чином, запропонована в роботі [9] формула (1.2), на відміну від емпіричної залежності (1.1), враховує як швидкість розкладання продуктів піролізу, так і їх згоряння з урахуванням переміщення пожежі на ділянці каналу  $x \leq w\tau$ . Формула (1.2) входить в праві частини рівняння переносу тепла зі знаком «+» та в рівняння переносу кисню зі знаком «-», оскільки, чим більше виділяється тепла, тим меншою буде концентрація кисню.

Попри те і формула (1.2) має свої недоліки, бо не враховує процесу зародження горіння і дає максимум в початковий час, що потребує додаткових досліджень.

Польова модель тепломасообміну при пожежі вздовж каналу в роботі [9] описується системою рівнянь

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - qC_0 / (H_c \rho_k) \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (T_{cm} - T) + q / (\rho c_p), \quad (1.4)$$

де  $T$  – температура, К;

$T_{cm}$  – температура стінок каналу, К;

$a_1$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, м<sup>2</sup>/с.

$\Pi$  – периметр поперечного перерізу каналу, м;

$D$  – коефіцієнт турбулентної дифузії кисню в потоці повітря, м<sup>2</sup>/с;

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

$\rho_k$  – густина кисню, кг/м<sup>3</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі потоку повітря стінкам каналу, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$c_p$  – питома теплоємність повітря при постійному тиску, Дж/(кг·К);

$x$  – перемінна відстань вздовж каналу, м.

Зазвичай така система рівнянь (1.3) і (1.4) або одне рівняння теплопереносу (1.4) вирішується аналітично в спрощеному вигляді або чисельно при постійній швидкості потоку повітря та постійній його густині. Попри те швидкість повітря при великій температурі буде сильно збільшуватися, а густина – зменшуватися. Тому при рішенні таких рівнянь необхідно враховувати стиснення та розширення повітря.

Аналіз рівняння переносу (1.3) показує, що в ньому не враховуються зміни концентрації кисню у зв'язку з поглинанням інертного газу стінками при його подаванні в кабельний тунель.

Тому спочатку необхідно розглядати перенос уздовж каналу інертного газу (N<sub>2</sub> або CO<sub>2</sub>) з урахуванням його поглинання стінками каналу, порівнювати отримані результати розрахунку з експериментальними даними, знаходити коефіцієнт поглинання а пізніше перерахувати на концентрацію кисню. Оскільки вздовж каналу концентрація інертного газу буде зменшуватися, то концентрація кисню буде збільшуватися завдяки газообміну с навколишнім середовищем, що містить ту його концентрацію, яка була до пожежі. Тому

рівняння (1.3) необхідно доповнити ще одним доданком в правій частині та представити його у вигляді

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \gamma(C_0 - C) - qC_0 / (H_c \rho_k), \quad (1.5)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт газообміну в зв'язку з поглинанням інертного газу при його подаванні на великі відстані, 1/с.

Цей ефект, не враховується, однак при подаванні на великі відстані інертного газу його концентрація біля осередку горіння буде недостатньою для гасіння пожежі, оскільки концентрація кисню частково відновиться.

Процес рециркуляції продуктів згорання і вплив такого інертного середовища на осередок горіння в кабельних тунелях частково досліджувався в дисертаційній роботі [62]. Вирішено аналітичне завдання розподілу продуктів згорання в об'ємі кабельного тунелю. При цьому доведено, що дальність і тривалість розповсюдження диму під час пожежі може перевищити значення цих параметрів для температури. Встановлено умови повітряного розподілу при рециркуляції продуктів згорання по замкненому контуру, через ізольовану ділянку кабельного тунелю з зоною горіння і розташований поза тунелем трубопровід, завдяки різним джерелам тяги.

Обґрунтовано місце установки додаткового джерела тяги – вентилятора в контурі рециркуляції. При цьому найбільш оптимальним місцем установки допоміжного вентилятора є ділянка трубопроводу в безпосередній близькості від ізолюючої перемички, що встановлена з боку свіжого струменя загальнотунельної вентиляції. Але в цій роботі не розглянутий процес неперервної взаємодії концентрації кисню з температурою як в межах вогнища пожежі, так і за його межами. Гасіння методом рециркуляції обмежене об'ємами гасіння та потребує додаткових досліджень.

Дослідженню тепломасообмінних процесів при горінні речовин і матеріалів у каналах, тунелях присвячено значну кількість наукових робіт як закордонних, так і вітчизняних фахівців [24-27, 29, 30-44]. При виконанні теоретичних і експериментальних досліджень розглядалися процеси

нагрівання, займання матеріалів, характерних для конкретного об'єкта, умови розповсюдження пожежі як у початковій, так і в розвиненій стадіях горіння. Отримані результати досліджень були покладені в основу для вибору норм і способів подавання вогнегасних речовин [29, 45-50]. Пожежним навантаженням розглядалися електричні кабелі (одиночні або в пучках), деревина (дерев'яні затяжки кріплення або багаття), метан, вугілля та ін.

При дослідженні тепломасообмінних процесів використовувалися методи математичного моделювання, отримані моделі вирішувалися аналітично за допомогою відомих методів математичної фізики або чисельними методами кінцевих різниць при граничних умовах, що відповідають умовам цієї задачі [30-34, 41].

Таким чином, огляд та аналіз відомих математичних моделей розвитку та гасіння пожеж показав, що при постановці задачі гасіння пожежі інертним газом необхідно спочатку вибрати конкретну модель – інтегральну, зональну або польову, пізніше використати тривимірні рівняння тепломасообміну. Від тривимірних рівнянь, методом опосередкування за поперечним перерізом потоку повітря необхідно переходити до одновимірного випадку, що дає можливість:

- дослідити чисельним методом процеси інертизації кабельних тунелів різними газами з урахуванням їх поглинання стінками каналу;
- здійснити перерахунок концентрації інертного газу в зв'язку з його втратами по довжині каналу на концентрацію кисню;
- врахувати стиснення та розширення повітря при великих температурах, виражаючи густину через температуру;
- розробити модель горіння твердого палива при піролізі та переході вуглецю зі зв'язаного у вільний газоподібний стан з подальшим його проникненням в потік повітря та вступом в хімічну реакцію;
- дослідити чисельним методом динаміку розвитку пожежі та її гасіння інертними газами з наступною рециркуляцією продуктів згоряння в замкнутому контурі.



## РОЗДІЛ 2

### ІНЕРТИЗАЦІЯ РІЗНОМАНІТНИМИ ГАЗАМИ АТМОСФЕРИ КАБЕЛЬНОГО ТУНЕЛЮ

#### 2.1. Розробка математичної моделі нестационарного переносу інертного газу в кабельних тунелях

При дослідженні процесів масопереносу будь-яких домішок найбільш обґрунтовано використовувати повну систему рівнянь руху, енергії, конвективно-дифузійного переносу та збереження маси [68]. Попри це в нашому випадку, коли розглядається перенос домішок до зони горіння, де температури незначно відрізняються один від одного та процес за суттю ізотермічний, то достатньо використовувати тільки одне рівняння – рівняння конвективно-дифузійного переносу інертного газу.

При заповненні інертним газом (азотом ( $N_2$ ) або діоксидом вуглецю ( $CO_2$ )) ізолюваного або напівізолюваного кабельного тунелю буде різко змінюватися склад повітря спочатку безпосередньо біля місця подавання інертного газу, а пізніше на підступах до зони горіння та в самому осередку. При цьому буде знижуватися концентрація кисню, що приведе до зменшення або припинення горіння твердого або рідкого палива.

Для того, щоб установити яка концентрація кисню буде знаходитися в зоні горіння, використовуємо для опису процесу переносу інертного газу рівняння нестационарної конвективної його дифузії у вигляді [68]

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} + w \frac{\partial Z}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial Z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right), \quad (2.1)$$

де  $Z$  – концентрація інертного газу, %;

$t$  – час з моменту подавання інертного газу в канал, с;

$u, v, w$  – проекції швидкості газоповітряної суміші на осі координат, м/с;

$x, y, z$  – повздовжня, вертикальна та поперечна координати, м;

$D_x, D_y, D_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії інертного газу в напрямку відповідних координат,  $m^2/s$ .

Додамо до рівняння конвективної дифузії інертного газу (2.1) рівняння нерозривності потоку повітря [68]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2.2)$$

Використовуючи рівняння нерозривності (2.2), приведемо рівняння (2.1) до вигляду

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} + \frac{\partial(vZ)}{\partial y} + \frac{\partial(wZ)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial Z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial Z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial Z}{\partial z} \right). \quad (2.3)$$

Спрямуємо (рисунок 2.1) вісь  $x$  вздовж осі руху повітря, а осі  $y$  та  $z$  – від середини перерізу каналу до однієї з бокових стінок.

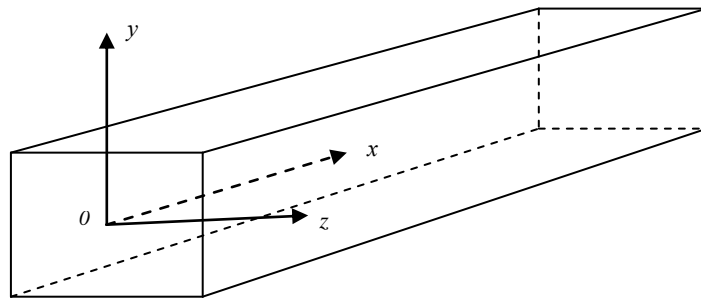


Рисунок 2.1 – Напрями осей координат в кабельному тунелі

Враховуючи потік газу спрямованим вздовж осі каналу  $x$  та приймаючи коефіцієнти дифузії інертного газу за постійні величини, замість рівняння (2.3) будемо мати

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2}. \quad (2.4)$$

Представимо другу та третю складові в правій частині рівняння (2.4) в кінцевих різницях [40] і отримаємо

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{D_y}{\Delta y^2} (Z_n - 2Z + Z_b) + \frac{D_z}{\Delta z^2} (Z_l - 2Z + Z_p), \quad (2.5)$$

де  $Z_n$  та  $Z_b$  – концентрація інертного газу відповідно в нижній точці та верхній точці каналу, %;

$Z_l$  та  $Z_p$  – концентрація інертного газу відповідно на лівій та правій стінках каналу, %.

Прийемо концентрацію інертного газу на стінках каналу однаковою та рівною тій, що була до гасіння пожежі:

$$Z_{\text{н}} = Z_{\text{в}} = Z_{\text{л}} = Z_{\text{п}} = Z_0. \quad (2.6)$$

де  $Z_0$  – концентрація інертного газу в навколишньому середовищі до гасіння пожежі, %.

Тоді рівняння (2.5) матиме вигляд

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + 2\left(\frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2}\right)(Z_0 - Z). \quad (2.7)$$

Позначимо складові в правій частині рівняння (2.7) через параметр

$$\gamma = 2\left(\frac{D_y}{\Delta y^2} + \frac{D_z}{\Delta z^2}\right), \quad (2.8)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт поглинання інертного газу стінками каналу, 1/с.

В цьому випадку на відміну від рівняння, що використовується в ряді робіт для циліндричних виробок [43], рівняння (2.7) набуває зручного для моделювання вигляду

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \gamma(Z_0 - Z). \quad (2.9)$$

Початкову умову для рівняння (2.9) представимо у вигляді  $Z(x,0) = Z_0$ . (2.10)

Таким чином, приймаємо, що концентрація інертного газу до пожежі була всюди однаковою та дорівнювала, якщо для азоту, то  $Z_0 = 79$  %, а якщо для діоксиду вуглецю, то  $Z_0 = 0$ .

На лівій та правій межах потоку газів можна приймати [43]

$$1) Z(0,t) = Z_1(t); \quad 2) \frac{\partial Z(L,t)}{\partial x} = \beta[(Z_0 - Z(L,t))], \quad (2.11)$$

де  $Z_1(t)$  – довільно змінна в часі функція в залежності від інтенсивності подавання інертного газу, %;

$\beta$  – коефіцієнт газообміну через встановлену ізоляційну перегородку, 1/м.

$L$  – довжина каналу, м.

Перша гранична умова в (2.11) може бути довільною функцією та змінюватися залежно від інтенсивності подавання інертного газу. Зазвичай приймається, що інтенсивність подавання змінюється за експонентою [43].

Друга гранична умова в (2.3) означає, що потік інертного газу через перемичку залежить від її герметичності.

Очевидно, при коефіцієнті  $\beta = 0$  на виході з каналу повна його ізоляція, а при  $\beta \rightarrow \infty$  отримаємо

$$Z(L, t) = Z_0, \quad (2.12)$$

Це буде свідчити про відсутність в цьому випадку перемички та сполучення каналу з іншим каналом, в якому концентрація інертного газу була такою, якою до його подавання.

Існує декілька складних аналітичних рішень рівняння (2.1) в циліндричних координатах при постійному подаванні інертного газу та при перемінному за експонентою його подаванні [42-44].

Однак чисельне рішення рівняння (2.9) з початковими та граничними умовами (2.10) та (2.11) дають великі можливості для вивчення закономірностей заповнення ізольованого чи напівізольованого каналу інертним газом при постійному чи змінному за часом його подаванні.

Для отримання чисельного рішення задачі представимо рівняння (2.9) в кінцевих різницях проти потоку [41]:

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} [(uZ)_{m-1}^n - (uZ)_m^n] + \frac{D_x \Delta t}{\Delta x^2} (Z_{m-1}^n - 2Z_m^n + Z_{m+1}^n) - \gamma \Delta t Z_m^n, \quad (2.13)$$

де  $\Delta t$  – крок за часом, с;

$m$  – номер вузла на осі координат  $x$  (рисунок 2.2);

$n$  – номер часового шару (рисунок 2.2).

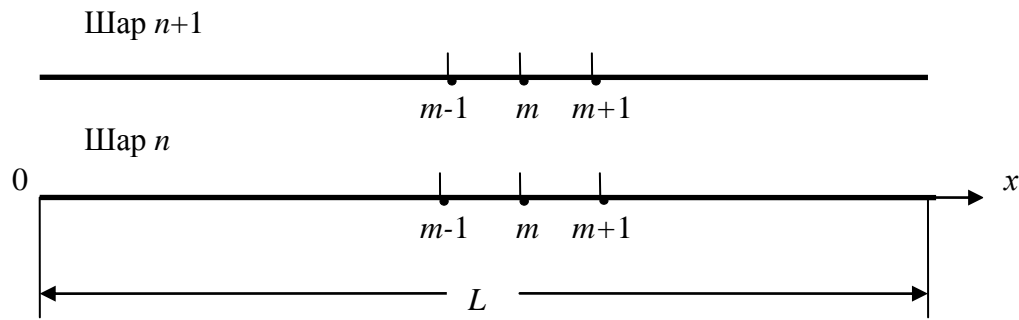


Рисунок 2.2 – Умовне розбиття каналу на ділянки довжиною  $\Delta x$  із зазначенням часових шарів

Кінцеві різниці проти потоку більше відповідають фізичній сутності процесу. Так, конвективний потік зліва поступає з точки  $(m - 1)$  та виноситься з точки  $m$ , а дифузійний потік розсіює інертний газ вліво та вправо зі спаданням його в бокові породи, на що вказує права частина рівняння (2.13).

Приймаючи швидкість газоповітряної суміші постійною, представимо отримане рівняння (2.13) в критеріальному вигляді

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + Cu(Z_{m-1}^n - Z_m^n) + Fo(Z_{m-1}^n - 2Z_m^n + Z_{m+1}^n) - \bar{\gamma}Z_m^n, \quad (2.14)$$

де  $Cu = u\Delta t / \Delta x$  – критерій моделювання Куранта;

$Fo = D_x \Delta t / \Delta x^2$  – дифузійний критерій Фур'є;

$\bar{\gamma} = \gamma \Delta t$  – безрозмірний параметр інтенсивності поглинання інертного газу стінками каналу.

Перетворимо рівняння (2.14) до вигляду

$$Z_m^{n+1} = Z_m^n + (Cu + Fo)Z_{m-1}^n + (1 - Cu - 2Fo - \bar{\gamma})Z_m^n + FoZ_{m+1}^n. \quad (2.15)$$

Очевидно, для стійкого рахунку за формулою (2.15) необхідно вимагати, щоб

$$Cu + 2Fo + \bar{\gamma} < 1. \quad (2.16)$$

Дійсно, якщо не дотримуватись цієї умови, то концентрація інертного газу може набути від'ємного значення, що не відповідає дійсності.

Вибравши кроки по довжині каналу та по часу, а також дотримуючись умови стійкості рахунку (2.16), представимо початковою умовою (2.10) при

$n = 0$  у всіх точках від початкової  $m = 0$  до кінцевої  $m = M$  у вигляді

$$Z_m^0 = Z_0. \quad (2.17)$$

Граничні умови (2.11) в початковому вузлі  $m = 0$  та на виході з каналу при  $m = M$  представимо в кінцевих різницях

$$1) Z_0^{n+1} = Z_1(n\Delta t); \quad 2) Z_M^{n+1} = \frac{Z_{M-1}^{n+1} + \bar{\beta}Z_0}{1 + \bar{\beta}}, \quad (2.18)$$

де  $\bar{\beta} = \beta\Delta x$  - безрозмірний коефіцієнт газообміну на виході з каналу.

При цьому вигляд функції  $Z_1$  може бути довільним та відповідати тій інтенсивності подавання інертного газу, яка буде насправді.

Таким чином, розроблена математична модель нестационарного переносу інертного газу в кабельних тунелях дає змогу дослідити усі закономірності заповнення ізольованих та напівізольованих об'ємів інертними газами при постійному або перемінному їх подаванні з будь-якою тривалістю за часом.

## 2.2. Моделювання заповнення кабельних тунелів інертними газами

Розглянемо процес заповнення інертним газом каналу великої протяжності. Прийmemo при моделюванні, що подавання інертного газу в канал є постійним на деякому проміжку часу з граничними умовами аналогічними (2.18) при  $\bar{\beta} = 1$  та  $Z_0^{n+1} = Z_1 = const$ . Тоді, задаючи початкову умову (2.17) та приймаючи критерії подібності рівними  $Cu = 0,5$ ;  $Fo = 0,15$ ;  $\bar{\gamma} = 0$ . Прийнятий рівним нулю безрозмірний параметр інтенсивності поглинання газів стінками каналу означає, що поглинання в цьому випадку не враховуються.

На рисунку 2.3 представлені результати розрахунку за формулою (2.15) розподілу безрозмірної концентрації інертного газу вздовж каналу в різний час з моменту його подавання.

Як видно (рисунок 2.3), з протіканням часу канал все більше заповнюється інертним газом та через 50 кроків за часом відбувається його майже повне заповнення.

Урахування поглинання інертного газу різко змінює картину заповнення. На рисунку 2.4 показано, що навіть при значенні безрозмірного параметра інтенсивності поглинання газів  $\bar{\gamma} = 0,01$  вдається заповнити віддалену частину каналу тільки до 70 %.

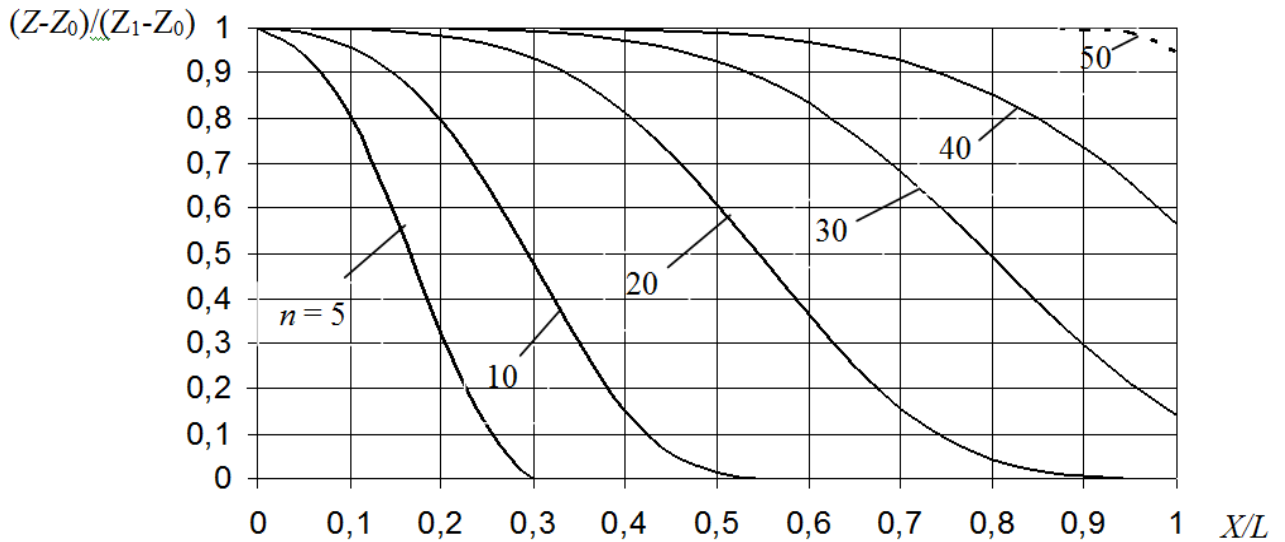


Рисунок 2.3 – Розподіл безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подавання без поглинання (штрихова лінія означає завершення подавання інертного газу)

Як показують результати моделювання, наступне подавання інертного газу не приводить до зміщення штрихової лінії (рисунок 2.4), і вона залишається на місці, що вказує на ефект поглинання інертного газу стінками каналу та вихід на стаціонарний розподіл концентрації інертного газу вздовж каналу.

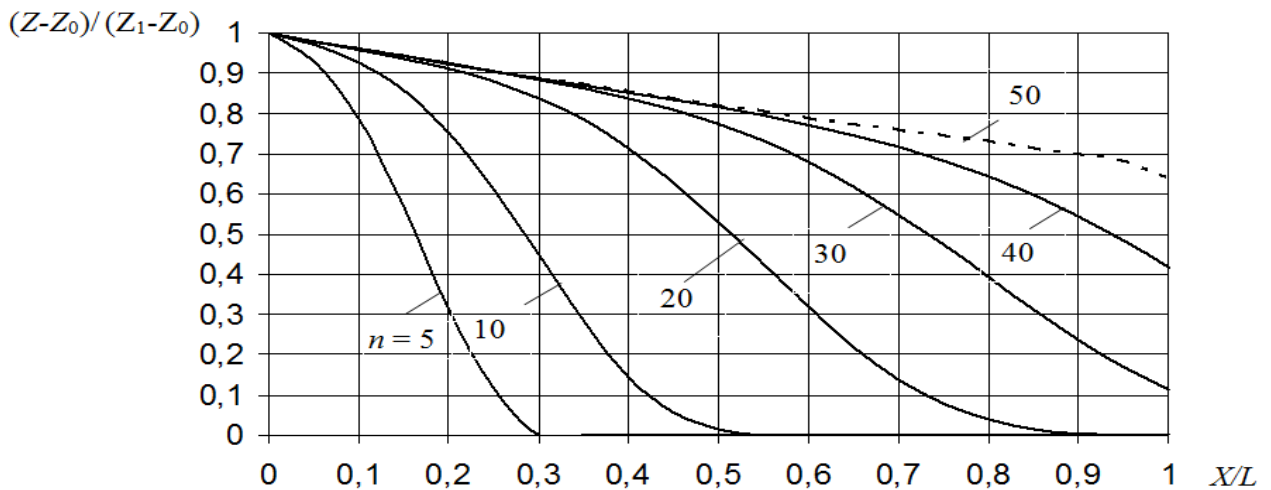


Рисунок 2.4 – Розподіл безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подавання з поглинанням (штрихова лінія означає завершення подавання інертного газу)

Штрихова лінія вказує (рисунок 2.4), що розподіл концентрації інертного газу виходить на свою межу, та чим далі знаходиться від місця подавання зона горіння, тим менша його концентрація. Так, при довжині каналу  $L = 40$  м та відстані до осередку  $x = 36$  м, концентрація інертного газу в цьому місці буде становити 0,7 від максимального значення. Якщо в місці подавання, наприклад, діоксид вуглецю  $Z_1 = 50$  %, то концентрація кисню, як п'ята частина від залишеної суміші газів, знизиться до 10 %. Цього достатньо для гасіння пожежі. Попри те в місці його розташування в результаті поглинання концентрація діоксиду в осередку буде рівною 35 %. Тоді концентрація кисню тут стане рівною 13 %, що недостатньо для гасіння пожежі.

Розглянемо стаціонарний випадок, до якого приводить довготривале стаціонарне подавання інертного газу. В цьому випадку рівняння (2.9) можна представити при постійній швидкості потоку газів у вигляді

$$u \frac{dZ}{dx} = D_x \frac{d^2Z}{dx^2} + \gamma(Z_0 - Z). \quad (2.19)$$

Отримане рівняння (2.19) представляє собою рівняння другого порядку [113], рішення якого можна представити у вигляді суми двох експонент, показники степені яких визначаються на основі характеристичного рівняння:



$$k^2 - \frac{u}{D_x}k - \frac{\gamma}{D_x} = 0, \quad (2.20)$$

звідти показники степені у експонент будуть дорівнювати

$$k_{1,2} = \frac{u}{2D_x} \pm \sqrt{\frac{u^2}{4D_x^2} + \gamma/D_x}. \quad (2.21)$$

В такому випадку рішення рівняння (2.19) можна представити у вигляді

$$Z(x) = Z_0 + A_1 \exp(k_1 x) + A_2 \exp(k_2 x), \quad (2.22)$$

Для каналів, коли  $x \rightarrow \infty$ , можна прийняти  $A_1 = 0$  в силу обмеження функції концентрації інертного газу. Тоді рішення рівняння (2.19) набуде вигляду

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left[\left(\frac{u}{2D_x} - \sqrt{\frac{u^2}{4D_x^2} + \gamma/D_x}\right)x\right]. \quad (2.23)$$

Очевидно, отримане рішення (2.23) узгоджує граничні умови: в місці подавання інертного газу маємо  $Z(0) = Z_1$ ; на другому кінці каналу  $Z(L) \rightarrow Z_0$ . В той же час за відсутності поглинання газу ( $\gamma = 0$ ) усюди в граничному випадку  $Z(x) = Z_1$ .

Аналіз отриманого рішення (2.23) показує, що воно є незручним при малих значеннях коефіцієнта дифузії газу  $D_x$ . З цією метою перетворимо, згідно (2.21), показники степеня в експоненті

$$k_2 = \frac{u}{2D_x} - \sqrt{\frac{u^2}{4D_x^2} + \gamma/D_x} = -\frac{2\gamma}{u + \sqrt{u^2 + 4\gamma D_x}}. \quad (2.24)$$

Цей вираз отримано в результаті операції  $k_2 = k_1 \cdot k_2 / k_1$ , що дозволяє виконувати розрахунки при будь-якому коефіцієнті дифузії та навіть у випадку, якщо  $D_x = 0$ .

В цьому випадку формула (2.23) набуде вигляду

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left(-\frac{2\gamma x}{u + \sqrt{u^2 + 4\gamma D_x}}\right). \quad (2.25)$$

Якщо знехтувати дифузією  $D_x = 0$  в порівнянні з конвективним переносом в рівнянні (2.19), то якраз отримаємо точне рішення цього рівняння (2.25).

Таким чином, математичне моделювання різноманітних режимів подавання інертного газу дає змогу прогнозувати газову ситуацію в районі зони горіння, якщо буде доказано адекватність розробленої моделі.

### **2.3. Порівняння даних математичного моделювання з експериментальними даними**

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту використано експериментальні дані [12, 13, 42-45], отримані при заповненні азотом ( $N_2$ ) та діоксидом вуглецю ( $CO_2$ ) ізолюваних гірничих виробок. Основна мета експериментів: запобігання первинним та повторним вибухам в шахтах небезпечних щодо метану.

При заповненні азотом ( $N_2$ ) ізолювалася перегородками з прорізами виїмкова ділянка [12]. Загальна довжина виробок ізолюваного об'єму становила більше 230 м з площею поперечного перерізу до  $7 \text{ м}^2$ . Подавання азоту здійснювалося протягом двох годин в ізолюваний об'єм з поверхні трубопроводами в тупикову частину однієї з виробок. При цьому в роботі було задіяно одночасно чотири газифікаційні установки АГУ-2м продуктивністю  $0,6 \text{ м}^3/\text{с}$ . Додатково до витрати азоту приєднувалися витоки повітря через перемички у кількості приблизно  $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . В результаті максимальна концентрація азоту становила  $Z_1 = 97 \%$ .

Експериментальні дослідження показали, що в місці подавання азоту його концентрація не відразу досягала своєї межі, а спочатку заповнювався деякий об'єм за експоненціальною залежністю

$$Z(0, t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-n\Delta t). \quad (2.26)$$

На рисунку 2.5 приведені розрахунки (криві лінії) та експериментальні (точки) дані інертизації азотом ізолюваного об'єму.

При розрахунках прийнято:  $\Delta x = 12 \text{ м}$ ;  $\Delta t = 15 \text{ с}$ ;  $u = 0,1 \text{ м/с}$ ;  $D_x = 0,3 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\gamma\Delta t = 0,002$ . Критерії подібності:  $Cu = 0,125$ ;  $Fo = 0,03$ .

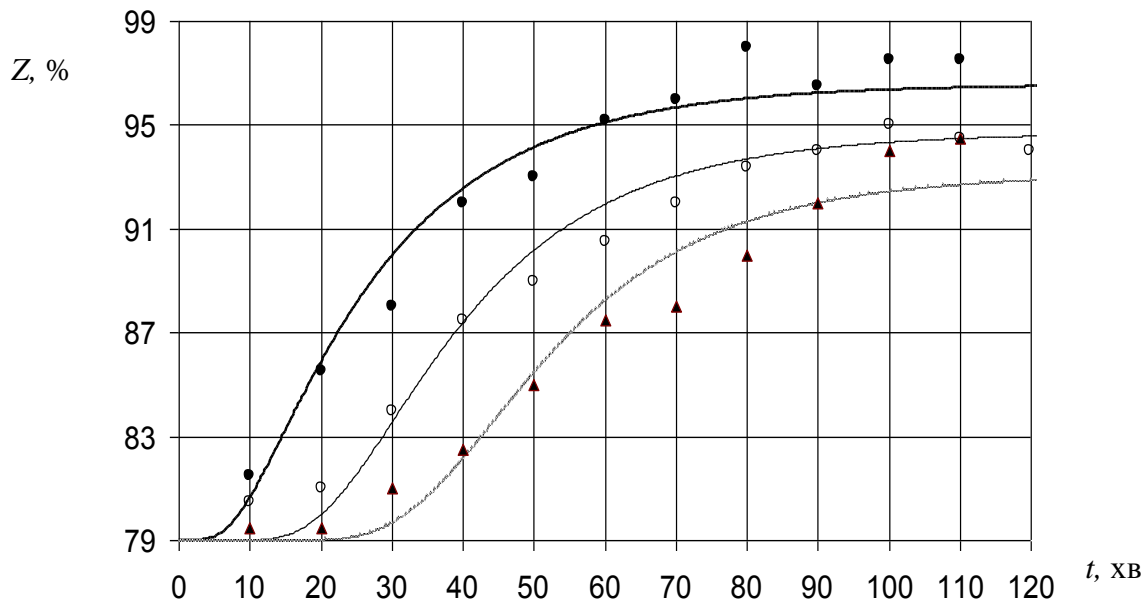


Рисунок 2.5 – Динаміка зміни концентрацій азоту в різних перерізах каналу (жирна лінія – в 55 м, тонка лінія – в 140 м та штрихова лінія – в 230 м від місця подавання азоту)

Як видно (рисунок 2.5), розрахункові та експериментальні дані узгоджуються між собою.

На рисунку 2.6 наведено динаміку зміни концентрацій кисню  $C = 100 - Z$  в різноманітних перерізах каналу, встановлену розрахунковим шляхом, звідки видно, що в умовах досліду створити вогнегасну концентрацію 8 – 10 % можна тільки через 70-90 хвилин. При цьому не зрозуміло, чи достатньо часу 30 хвилин, що залишився, для повного зупинення горіння, що потребує додаткових досліджень, виходячи з пожежного навантаження, витрати суміші газів та інших факторів.

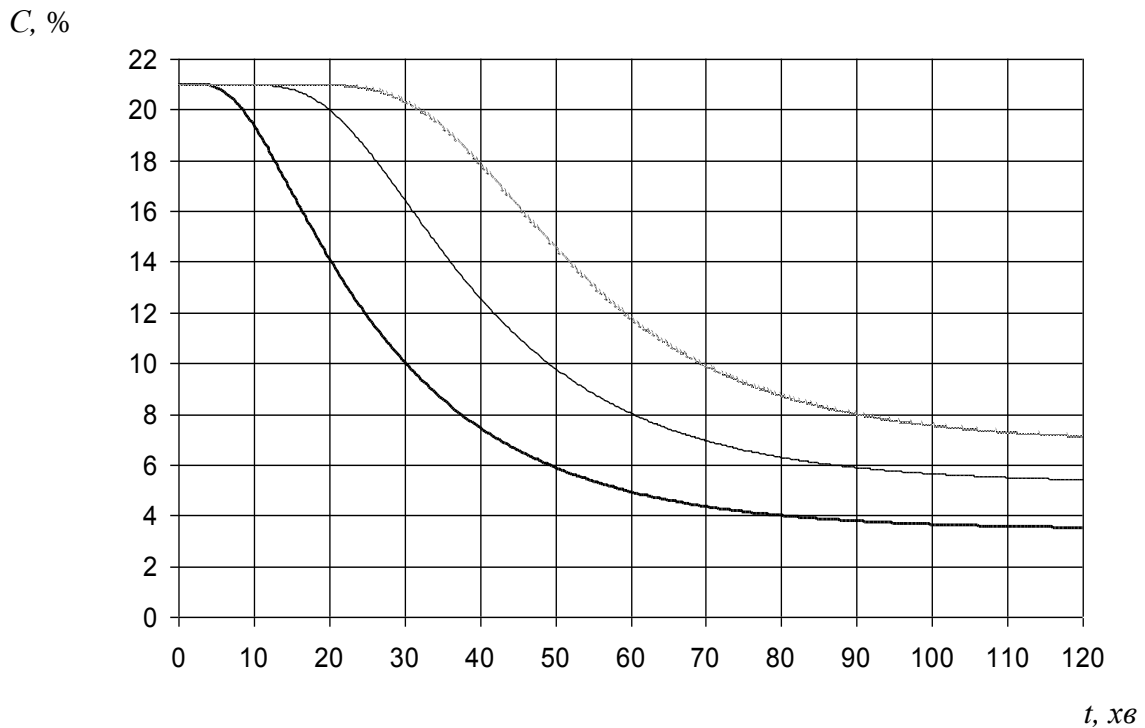


Рисунок 2.6 – Динаміка зміни концентрацій кисню в різних перерізах каналу (жирна лінія – в 55 м, тонка лінія – в 140 м та штрихова лінія – в 230 м від місця подавання азоту)

Експерименти з інертизації ізольованих об'ємів вуглекислим газом ( $\text{CO}_2$ ) проводились як в штольні НДІГС, так і в шахтних умовах на ділянках виробок [43]. Так, в шахтних умовах експерименти проводилися при початковій концентрації вуглекислого газу від 17% до 81%. Швидкість потоку суміші газів становила 0,2-0,5 м/с, а її витрата знаходилася в межах 1,2-3 м<sup>3</sup>/с. При цьому витрата  $\text{CO}_2$  становила 0,2-1,5 м<sup>3</sup>/с.

На рисунку 2.7 представлено розрахункові (суцільні лінії) і експериментальні дані інертизації вуглекислим газом ізольованого об'єму.

При розрахунках прийнято:  $\Delta x = 12$  м;  $\Delta t = 15$  с;  $u = 0,2$  м/с;  $D_x = 0,48$  м<sup>2</sup>/с;  $\gamma \Delta t = 0,0035$ .

Критерії подібності:  $Cu = 0,25$ ;  $Fo = 0,05$ .

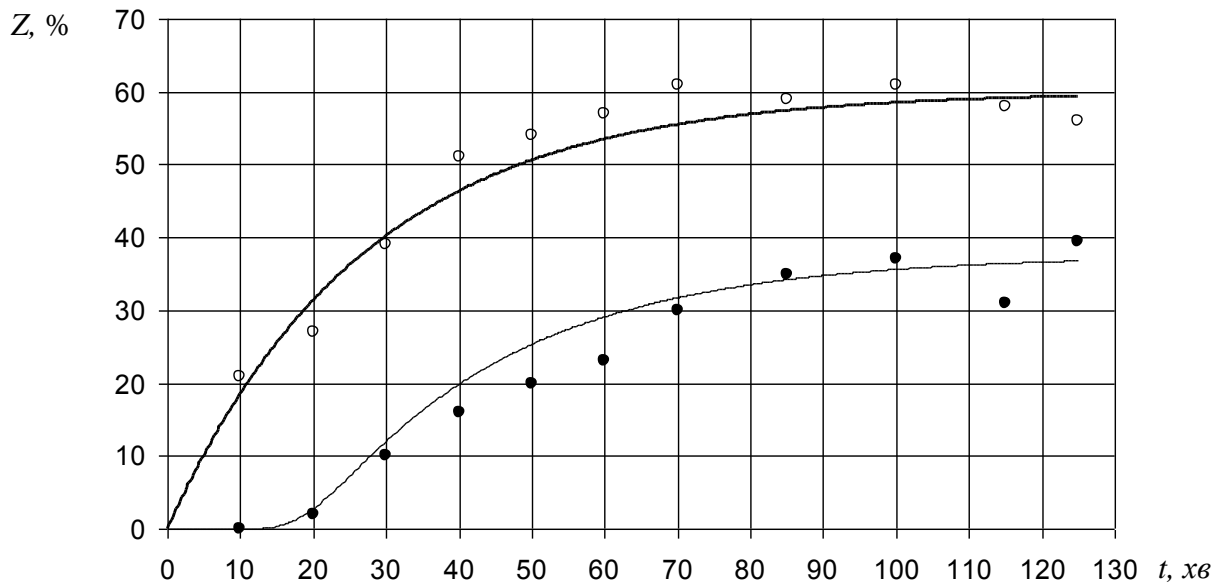


Рисунок 2.7 – Динаміка зміни концентрацій вуглекислого газу в різних перерізах каналу (жирна лінія – на початку, тонка лінія – в 250 м від місця подавання вуглекислого газу)

На рисунку 2.8 показана динаміка зміни концентрацій кисню в різних перерізах каналу, встановлена розрахунковим шляхом при подаванні вуглекислого газу. Концентрація кисню при цьому визначалася за формулою

$$C = C_0(1 - Z/100), \quad (2.27)$$

де  $C$  – концентрація кисню в довільний час, %;

$C_0$  – концентрація кисню в каналі до пожежі, %.

Як видно (рисунку 2.8), досягнути при швидкості суміші газів 0,2 м/с концентрації кисню 8 – 10 % можна лише безпосередньо біля місця подавання вуглекислого газу і то через одну годину. В той же час на відстані від місця подавання CO<sub>2</sub> концентрація кисню знизиться лише до 13%.

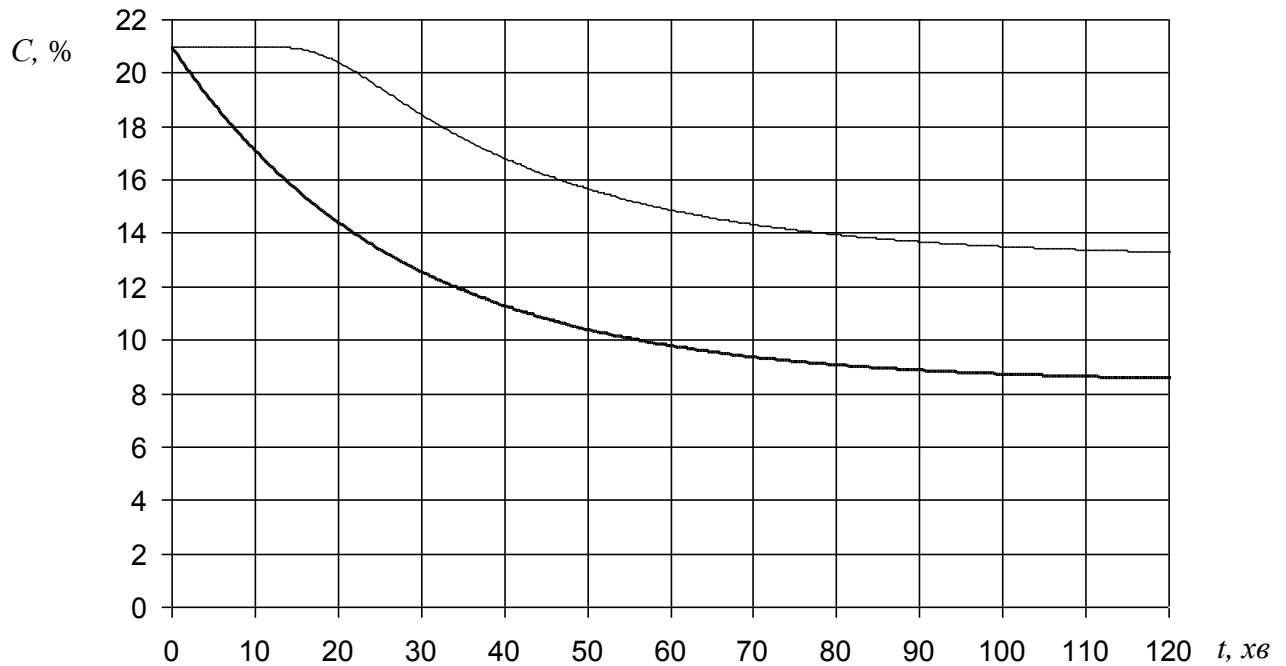


Рисунок 2.8 – Динаміка зміни концентрацій кисню в різних перерізах каналу

(жирна лінія – на початку каналу, тонка лінія – в 250 м від місця подавання вуглекислого газу)

Щоб дізнатися, яким чином розподіляється концентрація вуглекислого газу, а тим самим і концентрація кисню вздовж каналу при довготривалій інертизації його атмосфери, можна користуватися формулами (2.25) та (2.27).

На рисунку 2.9 представлені розрахункові криві та експериментальні дані [43] розподілення концентрацій вуглекислого газу та кисню вздовж каналу (гірничих виробок).

При обробці експериментальних даних знайдено коефіцієнт поглинання  $\gamma = 0,0082$  1/с вуглекислого газу стінками каналу при швидкості руху суміші газів  $u = 0,22$  м/с.

Використовуючи рівність (2.8) та приймаючи однаковими поперечні коефіцієнти дифузії  $D_y = D_z$  та прирощення координат  $\Delta y = \Delta z$ , представимо

$$\text{рівність у вигляді} \quad \gamma = 4 \frac{D_y}{\Delta y^2}. \quad (2.28)$$

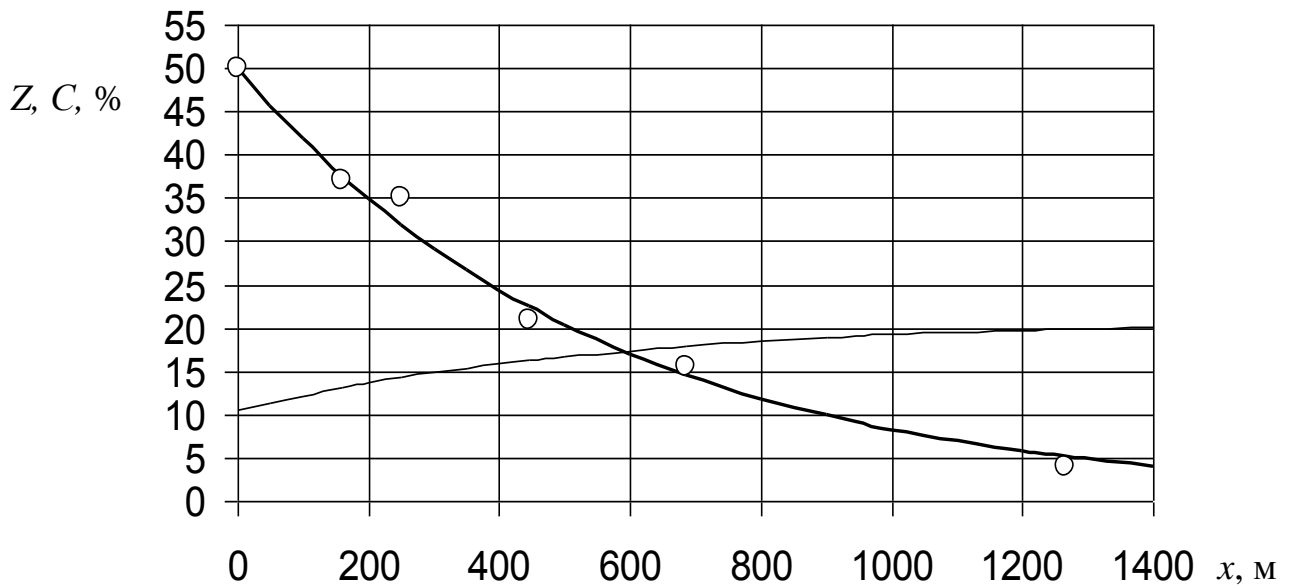


Рисунок 2.9 – Розподіл концентрацій вуглекислого газу та кисню вздовж каналу (гірничих виробок) при тривалому подаванні CO<sub>2</sub> (жирна лінія – CO<sub>2</sub>, тонка лінія – O<sub>2</sub>)

Ще Тейлором [126] запропонована лінійна залежність поперечних та повздовжніх коефіцієнтів дифузії від швидкості руху потоків газів та приведенного діаметра каналу. Тому приймемо

$$D_y = D_0 + p u d, \quad (2.29)$$

де  $D_0$  – коефіцієнт молекулярної дифузії, м<sup>2</sup>/с;

$p$  – емпірична константа;

$d$  – приведений діаметр каналу, який можна прийняти рівним  $\sqrt{S}$ , м.

Так як поперечні прирушування в формулі (2.8) представляють собою половину ширини або висоти каналу, то можна прийняти  $\Delta y^2 = S/4$ . тоді підставляючи (2.29) в формулу (2.28), отримаємо

$$\gamma = 16 \frac{D_0 + p u \sqrt{S}}{S} \quad (2.30)$$

Обробка розрахункових та експериментальних даних (рисунок 2.8) при подаванні вуглекислого газу показала, що емпірична константа  $p = 2,8 \cdot 10^{-4}$ . При

цьому коефіцієнт молекулярної дифузії газів може бути прийнятий рівним [45]  
 $D_0 = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Обробка розрахункових та експериментальних даних (рисунок 2.5) при подаванні азоту газу показала, що емпірична константа в цьому випадку  $p = 1,5 \cdot 10^{-4}$ .

В результаті, нехтуючи поздовжньою дифузією порівняно з конвективним рухом, формулу (2.25) з урахуванням (2.30) для розрахунку стаціонарного розподілу азоту або вуглекислого газу можна представити у вигляді

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left(-\frac{16(D_0 + pu\sqrt{S})x}{Q}\right), \quad (2.31)$$

де  $Q = uS$  – витрата суміші газів при інертизації атмосфери кабельного тунелю азотом або вуглекислим газом,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Для розрахунку поздовжнього коефіцієнта турбулентної дифузії приймаємо його також лінійно залежним від швидкості потоку суміші газів та від приведеного діаметра каналу. Так, обробка розрахункових та експериментальних даних показала, що для азоту  $D_x = 1,2 u\sqrt{S}$ , а для вуглекислого газу  $D_x = 0,9u\sqrt{S}$ . Таким чином, для розрахунків коефіцієнтів турбулентної дифузії газів можна прийняти в середньому  $D_x = u\sqrt{S}$ , що знаходиться в повній відповідності з формулою  $D_x = 0,93 u\sqrt{S}$ , що приведена в роботі [43], попри те, як відмічено, це для найгіршого випадку. Більш обґрунтовано приймати [43] для розрахунків коефіцієнтів турбулентної дифузії газів  $D_x = 0,5 u\sqrt{S}$ , що відповідає даним Тейлора [126].

На динаміку зміни концентрації інертного газу при заповненні різноманітних каналів окрім коефіцієнтів дифузії та газообміну зі стінками каналу істотно впливає функція інтенсивності подавання інертного газу.

Як показали експериментальні дослідження [12, 43], в місці подавання азоту або діоксиду вуглецю їх концентрація не відразу досягає своєї межі, а



відбувається спочатку заповнення деякого, так званого динамічного об'єму за експоненціальною залежністю.

Цю залежність можна отримати, вирішуючи диференціальне рівняння (2.9) при  $D_x = 0$  та  $\gamma = 0$ :

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = -\frac{\partial(uZ)}{\partial x}. \quad (2.32)$$

Приймаючи, що це відбувається в деякій зоні перемішування потоків газів на довжині  $\Delta x$ , представимо рівняння (2.32) в кінцевих різницях для правої частини та будемо мати:

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{u(Z_1 - Z)}{\Delta x}. \quad (2.33)$$

Рішення цього рівняння при початковій умові  $Z(0) = Z_0$  має вигляд

$$Z(t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-ut / \Delta x). \quad (2.34)$$

Аналогічне рішення отримано і в роботі [43]. Запропонована в даній роботі формула для розрахунку динамічного об'єму ( $\text{м}^3$ ) має вигляд

$$V = 27200 u_0^{-1,78}, \quad (2.35)$$

де  $u_0$  – швидкість потоку в місці подавання інертного газу, м/хв.

Перетворюючи цю швидкість в другу розмірність (м/с), замість формули (2.35) отримаємо

$$V = 18,6 u_0^{-1,78}. \quad (2.36)$$

Вказується, що отримана емпірична залежність знайдена для швидкості потоку газів від 0,08 м/с до 0,5 м/с. В цьому випадку динамічний об'єм буде знаходитися в межах  $V = 64 - 1667 \text{ м}^3$ . Оскільки об'єм дорівнює

$$V = S \Delta x, \quad (2.37)$$

то при площі поперечного перерізу каналу  $S = 4 \text{ м}^2$  отримаємо довжину динамічної зони, рівну  $\Delta x = 16 - 417 \text{ м}$ , яка буде зменшуватися зі збільшенням швидкості. Це заперечує теорію струменів газів [68], згідно з якою довжина зони перемішування збільшується зі збільшенням швидкості. Тим більше, навряд чи ця довжина може збільшитися до 500 м зі зменшенням швидкості.

Подальші експериментальні дослідження показали [43], що формулі (2.36) можна надати іншого вигляду. Для визначення функції зміни

концентрації газів в початковому перерізі проведені спеціальні експерименти в НДІГРС та на шахтах Донбасу і Червонограда.

В якості інертних газів в більшості випадків використовується діоксид вуглецю, в деяких випадках азот та парогазова суміш. Аналіз отриманих результатів показав, що функція зміни за часом концентрації газів в початкових перерізах каналів може бути описана залежністю вигляду [43]

$$Z(t) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{Q_0 + Q_1}{V} t\right) \right], \quad (2.38)$$

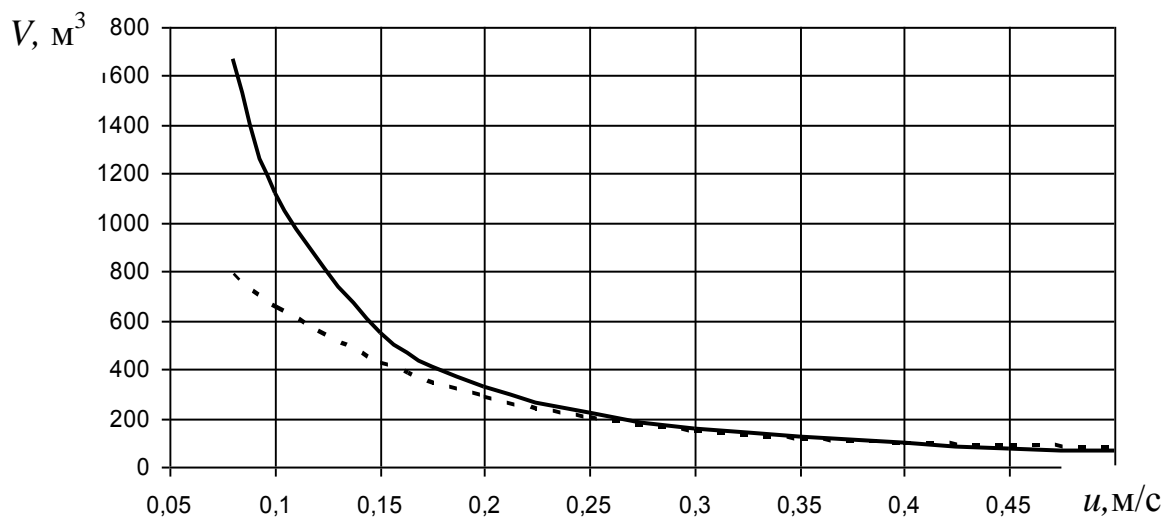
Ця залежність знаходиться в повній відповідності із залежністю (2.34), якщо прийняти

$$u / \Delta x = (Q_0 + Q_1) / V. \quad (2.39)$$

В результаті обробки експериментальних даних в діапазоні швидкостей від 0,3 м/с до 3 м/с представлена ще одна емпірична залежність динамічного об'єму від швидкості потоку газів [43]

$$V = 1600 \exp(-10u) + 70. \quad (2.40)$$

На рисунку 2.10 представлені криві залежності динамічного об'єму від швидкості потоку газів, знайдені з використанням формул (2.36) та (2.39).



Рисунком 2.10– Криві залежності динамічного об'єму від швидкості потоку газів (суцільна лінія – залежність (2.36), – штрихова лінія залежність (2.39))

З порівняння залежностей (2.36) та (2.39) виходить, що вони майже збігаються, починаючи зі значення швидкості потоку газів більше 0,2 м/с. Попри те і перша і друга формули заперечують теорії струменів течії газів та не відповідають фізичній суті процесів переносу, коли зі збільшенням швидкості струменя його довжина, а відповідно, і динамічний об'єм повинні збільшуватися, а не зменшуватися.

Другий підхід може бути запропонований, якщо припустити, що інтенсивність перемішування пов'язана з поперечними пульсаціями швидкості. Чим більша швидкість, тим більшими повинні бути пульсації та краще перемішування газів. Тому введемо в розгляд коефіцієнт перемішування газів. Тоді вважаючи, що довжина зони перемішування пропорційна до поперечних розмірів каналу, формулу (2.34) можна представити у вигляді

$$Z(t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-kut / \sqrt{S}), \quad (2.41)$$

де  $u$  – початкова швидкість подавання інертного газу, м/с;

$k$  – коефіцієнт перемішування газів в поперечному перерізі.

Результати порівняння коефіцієнта перемішування газів з динамічним об'ємом показують, що коефіцієнт перемішування газів може бути визначений за формулою

$$V \approx 1/k = 70(0,3 + 0,7/u_0) \quad (2.42)$$

Аналіз отриманої залежності (2.42) показує, що зі зменшенням швидкості потоку газів коефіцієнт перемішування зменшується до нуля, а збільшенням швидкості – збільшується, досягаючи кінцевої величини  $k = 1/21$ .

На рисунку 2.11 представлені результати порівняння величини динамічного об'єму зони зі зворотною величиною коефіцієнта перемішування. Похибка в цьому випадку становить не більше 25%.

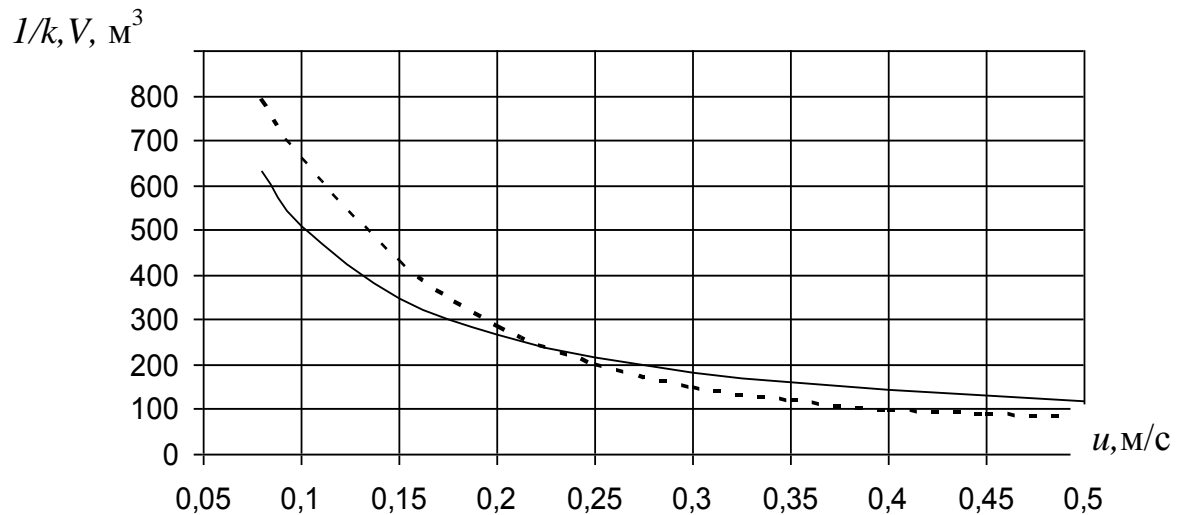


Рисунок 2.11 – Криві залежності величини зворотного коефіцієнта перемішування газів (суцільна лінія) та динамічного об'єму (штрихова лінія) від швидкості потоку газів

В цьому випадку формула (2.41) для розрахунку динаміки зміни концентрації інертного газу в місці перемішування набуде вигляду

$$Z(t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp\left(-\frac{u^2 t}{14(0,3u + 0,7)\sqrt{S}}\right). \quad (2.43)$$

Показано, що при переході від формули (2.38) до формули (2.41) одночасно чисельник та знаменник в показнику степеня діляться на площу  $S$  поперечного перерізу виробки.

Розрахунки за формулою (2.43) показали (рисунок 2.12), що для прогнозу динаміки зміни концентрації інертного газу в місці його подавання може бути з достатньою точністю використана отримана залежність. Для її перевірки використані експерименти, проведені в шахтних умовах в гірничій виробці [43]. В якості інертного газу використовувався діоксид вуглецю з граничною концентрацією в першому випадку 32 % та швидкістю потоку газів  $u = 0,4$  м/с (рисунок 2.12, товста лінія). Випуск діоксиду вуглецю виконувався з балонів через колектори. В другому випадку в початковому перерізі гранична концентрація діоксиду вуглецю в експерименті була 50 %, а швидкість потоку газів  $u = 0,22$  м/с (рисунок 2.12, тонка лінія).

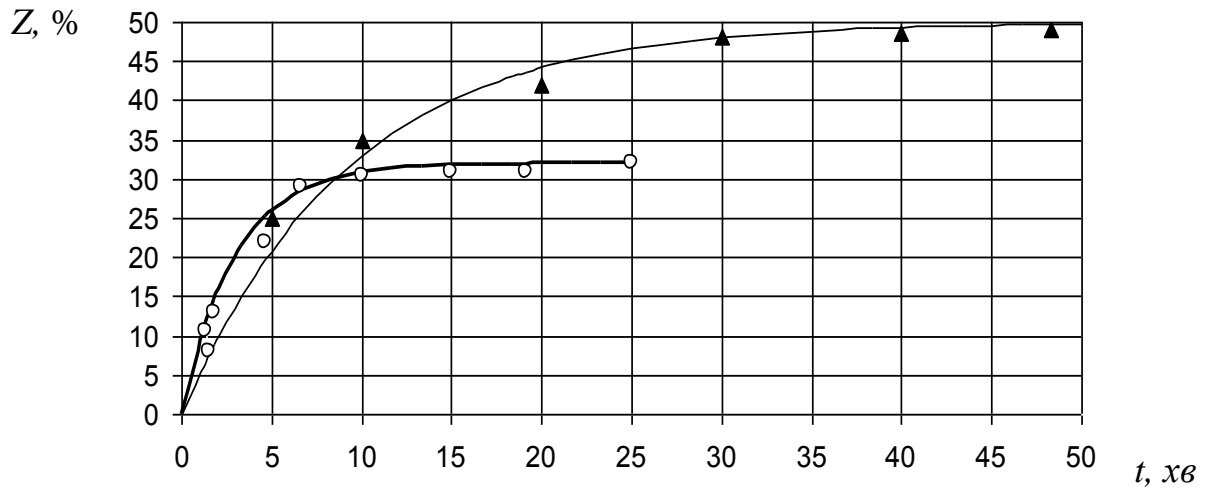


Рисунок 2.12 – Динаміка зміни концентрацій діоксиду вуглецю в місці його подавання (жирна лінія – розрахункова крива при швидкості потоку  $u = 0,4$  м/с; тонка лінія – розрахункова крива при швидкості потоку  $u = 0,22$  м/с; маркери – результати експериментів)

Як видно (рисунок 2.12), збіг розрахункових кривих з експериментальними даними задовільний, що підтверджує правильність запропонованої теорії перемішування газів в місці їх подавання завдяки поперечним пульсаціям швидкості потоку.

Таким чином, розроблена математична модель нестационарного переносу інертного газу в кабельних тунелях дає змогу дослідити закономірності інертизації ізольованих та неізольованих об'ємів інертними газами при постійному або перемінному їх подаванні з будь-якою тривалістю до повного зупинення горіння.

## 2.4. Висновки

1. Розроблена чисельними методами математична модель обґрунтування параметрів заповнення інертними газами кабельних тунелів.

2. Враховані процеси перемішування інертних газів в місцях їх подавання з подальшим поглинанням суміші в повітрі стінками каналу. Встановлено, що поглинання має значний вплив на розподіл концентрацій інертного газу по довжині каналу, зменшуючи їх до таких значень на великих відстанях, за яких неможливо буде припинити полум'яне горіння.

3. Математичне моделювання чисельними методами нестационарного переносу інертного газу в каналах дає змогу отримувати достовірні дані як при перервному, так і при перемінному подаванні азоту або вуглекислого газу, коли неможливо отримати аналітичні рішення.

4. Встановлено адекватність розробленої математичної моделі натурним об'єктам при заповненні азотом та вуглекислим газом гірничих виробок з використанням відомих експериментальних даних.

5. Отримані емпіричні константи для визначення коефіцієнтів повздовжньої та поперечної дифузії газів, коефіцієнта поглинання азоту та вуглекислого газу стінками каналу, та динаміки в часі концентрацій газів в місці їх подавання в ізолюваний об'єм, що дає змогу достовірно спрогнозувати концентрації газів в каналах.

### РОЗДІЛ 3

## ПРОЦЕСИ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ ПОЖЕЖАХ В КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ

### 3.1. Розробка математичної моделі розвитку та розповсюдження пожежі з урахуванням стиснення та розширення газів

Зазвичай, як вже було відмічено, не береться до уваги стиснення та розширення газів при їх русі в каналах [9, 51, 61, 62, 64, 65]. Попри те в зоні високих температур до 1000 °С швидкість повітря може підвищитися в декілька разів, а його густина у стільки ж разів зменшиться. Тому більш коректно користуватися масовою швидкістю повітря та рівняннями переносу будь-якої субстанції (маси, кількості рухів, енергії), які враховують розширення газів в зоні високих температур.

Для описування процесів розвитку та розповсюдження пожеж в кабельних тунелях використовуємо рівняння збереження енергії та збереження маси кисню з урахуванням теплообміну зі стінками каналу.

Рівняння збереження енергії представимо у вигляді [7, 69]

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (3.1)$$

де  $\rho$  – густина газів, кг/м<sup>3</sup>;

$c_p$  – питома теплоємність газів при постійному тиску, Дж/(кг·К);

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  – коефіцієнти теплопровідності вздовж відповідних напрямків, Вт/(м·К);

$T$  – температура, К;

$q$  – інтенсивність внутрішнього джерела тепла при горінні, Вт/м<sup>3</sup>.

Напрямки осей координат обрані, як на рисунку 2.1 з тими ж проекціями швидкостей на осі.

В кабельних тунелях поперечні розміри набагато менші, ніж повздовжні розміри, тому залишимо лише одну складову швидкості вздовж потоку газів, а коефіцієнти теплопровідності прийmemo за константу. Тоді рівняння (3.1) набуде вигляду

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q. \quad (3.2)$$

Представимо, як і в розділі 2, в кінцевих різницях другі похідні по  $y$  та по  $z$  в правій частині рівняння (3.2) і отримаємо

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{T_c - 2T + T_c}{\Delta y^2} + \lambda_z \frac{T_\tau - 2T + T_c}{\Delta z^2} + q, \quad (3.3)$$

де  $T_c$  – температура на стінках каналу, К.

Рівняння (3.3) можна представити, прийнявши  $\lambda_y = \lambda_z = \lambda$  та  $\Delta y = \Delta z$ , в дещо іншому вигляді

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial T}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 4a_y \frac{T_c - T}{\Delta y^2} + \frac{q}{\rho_0 c_p}, \quad (3.4)$$

де  $\rho_0$  – густина газів при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>;

$\tilde{u} = \rho u / \rho_0$  – приведена масова швидкість газів вздовж каналу, м/с;

$a_x = \lambda / (\rho_0 c_p)$  – коефіцієнт температуропровідності вздовж потоку газів, м<sup>2</sup>/с;

$a_y = a_z = \lambda / (\rho_0 c_p)$  – коефіцієнт температуропровідності в напрямку до стінок каналу, м<sup>2</sup>/с.

Введення масової швидкості дозволяє врахувати стиснення газів та їх розширення та вважати цю швидкість за константу в рівнянні (3.4). При цьому,



якщо швидкість буде збільшуватися, то густина буде зменшуватися, але масова швидкість залишиться сталою.

Оскільки  $\Delta y$  представляє собою половину висоти або ширини виробки, то можна прийняти  $\Delta y^2 = S/4$ . Тоді рівняння (3.4) набуде вигляду

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial T}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 16a_y \frac{T_c - T}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p}. \quad (3.5)$$

До рівняння (3.5) додаємо рівняння стану суміші газів [68, 69]

$$P = \rho RT, \quad (3.6)$$

де  $P$  – тиск, Па;

$R$  – питома газова стала, Па·м<sup>3</sup>/(кг·К).

При дозвукових потоках газів тиск змінюється незначно, на декілька десятків або сотень Паскаль, що по відношенню до атмосферного тиску, який становить  $P_0 = 10^5$  Па, є дуже маленьким. Тому можна прийняти [7]  $P \approx P_0$ , де  $P_0$  тиск при нормальних умовах. В цьому випадку, оскільки  $R = P_0/(\rho_0 T_0)$ , то рівняння стану газів (3.6) можна представити у вигляді

$$\rho / \rho_0 = T_0 / T, \quad (3.7)$$

де  $T_0$  – температура повітря до пожежі, К.

Підставляючи цей вираз в рівняння (3.5), отримаємо

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial T}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + 16a_y \frac{T_c - T}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p}. \quad (3.8)$$

Отримане рівняння (3.8) відрізняється від рівняння переносу енергії, яке зазвичай використовується, тим, що в ньому враховані стиснення та розширення газів шляхом введення масової швидкості, що призвело до появи множника  $T_0/T$  перед похідною температури за часом. Цей множник вказує на те, що з урахуванням стиснення та розширення газів перехідні процеси теплообміну будуть відбуватися значно швидше.

Підбором емпіричних коефіцієнтів можна, звісно, приблизити криві нагрівання та охолодження зони горіння, якщо не враховувати стиснення повітря. Попри те врахування стиснення більш точніше відображає теплообмінні процеси в зоні горіння та повинно враховуватися при отриманні чисельних рішень задачі нагрівання та охолодження осередку.

До рівняння збереження енергії газів додамо ще рівняння збереження маси, в нашому випадку – кисню [7, 127]

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - MC_0, \quad (3.9)$$

де  $C$  – концентрація кисню, %;

$C_0$  – початкова концентрація кисню, %;

$D_x, D_y, D_z$  – коефіцієнти турбулентної дифузії кисню в напрямку відповідних координат,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$M$  – інтенсивність джерела поглинання кисню при горінні,  $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ .

При однонаправленому русі газів замість рівняння (3.9) отримаємо

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - MC_0. \quad (3.10)$$

Розділимо ліву та праву частини рівняння (3.10) на густину  $\rho_0$  при нормальних умовах і будемо мати

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{D}_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{D}_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \tilde{D}_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - MC_0 / \rho_0, \quad (3.11)$$

де  $\tilde{D}_y = \rho D_y / \rho_0$  - приведений коефіцієнт дифузії вздовж осі  $y$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\tilde{D}_z = \rho D_z / \rho_0$  - приведений коефіцієнт дифузії вздовж осі  $z$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Приймаючи, як і раніше, в рівнянні (3.11) за константи приведені коефіцієнти дифузії та представляючи в кінцевих різницях похідні по  $y$  та  $z$  отримаємо

$$\frac{\rho}{\rho_0} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \tilde{D}_y \frac{C_0 - 2C + C_0}{\Delta y^2} + \tilde{D}_z \frac{C_0 - 2C + C_0}{\Delta z^2} - MC_0 / \rho_0. \quad (3.12)$$

Рівняння (3.12) з урахуванням (3.7) можна представити, прийнявши  $\tilde{D}_y = \tilde{D}_z$  та  $\Delta y = \Delta z$ , в декілька іншому, більш спрощеному вигляді

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{C_0 - C}{S} - MC_0 / \rho_0. \quad (3.13)$$

Очевидно, що і в отриманому рівнянні (3.13) переносу маси враховані стиснення та розширення газів шляхом введення масової швидкості, що привело до появи множника  $T_0/T$  перед похідною концентрації кисню за часом, що в ряді робіт не враховується або зовсім не розглядається це рівняння в припущенні, що кисню для горіння достатньо. Попри те в нашому випадку, коли якраз недостатність кисню при подаванні інертного газу не призводить до гасіння пожежі, рівняння (3.13) не можна не розглядати.

При довготривалому затуханні пожежі необхідно враховувати ще нагрівання стінок каналу з наступним їх охолодженням. Тому слід додати ще рівняння нагрівання стінок каналу [68, 69].

Добавляючи рівняння нагрівання стінок каналу, об'єднаємо рівняння тепломасообміну (3.8) та (3.13) в систему:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} &= a_x \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + 16a_y \frac{\bar{T}_c - \bar{T}}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p T_0}; \\ \frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} &= \tilde{D}_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{1 - \bar{C}}{S} - M / \rho_0; \\ \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

де  $\bar{T} = T / T_0$  – безрозмірна температура суміші газів;

$\bar{\theta} = \theta / T_0$  – безрозмірна температура стінок каналу;

$\bar{C} = C / C_0$  – безрозмірна концентрація кисню;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності порід, м<sup>2</sup>/с;

$y$  – поперечна координата вглиб стінок каналу, м.

В системі рівнянь (3.14) функції джерел виділення теплоти та поглинання концентрації кисню є невідомими та потребують подальшого визначення.

### 3.2. Модель горіння твердого матеріалу

Для визначення джерел тепла та маси в зоні горіння, що входять в систему рівнянь (3.14), замість емпіричних залежностей [75] використовуємо модель, запропоновану в роботі [9].

Виникнення полум'яного горіння починається від запалення, яке представляє собою такий процес, при якому відбувається швидка екзотермічна реакція, яка викликає зміни в горючому матеріалі, що призводить до різкого підвищення в ньому температури в порівнянні з температурою навколишнього середовища. Розрізняють два характерних види виникнення процесу горіння: 1) вимушене запалювання з допомогою деякого джерела, такого, як електрична іскра або стороннє полум'я; 2) самоспалахування, при якому зсередини відбувається нагрівання твердого матеріалу в результаті хімічних реакцій.

Більшість пожеж пов'язані з горінням твердих матеріалів, хоча в багатьох випадках горять і рідкі та газоподібні речовини. Попри те термін «горюча речовина» використовується в широкому розумінні для зазначення всього того, що горить, незалежно від його агрегатного стану.

Різноманіття горючих речовин є дуже великим і включає в себе як найпростіші газоподібні вуглеводні, так і тверді речовини з великою відносною масою та складною хімічною структурою. Деякі горючі речовини мають природне походження, такі як дерево, що включають в себе целюлозу або інші речовини штучного походження, наприклад, поліуретан та поліетилен. Всі ці речовини, перейшовши в газоподібний стан та реагуючи з киснем в повітрі, утворюють продукти горіння та виділяють тепло в процесі окиснення.

Утворення полум'я пов'язане з газоподібним станом речовини, тому горінню твердих речовин передуює процес хімічного розкладу матеріалу або піролізу. Оскільки для піролізу потрібно значно більше енергії, ніж для простого випаровування, то температура твердих матеріалів, що горять, за даними [73] повинна становити не менше 400 °С.

Склад летких речовин, що вступають в хімічну реакцію з киснем, є дуже складним. При термічному розкладанні значна частина речовини утворює обвуглену масу і тим самим є перешкодою для надходження в полум'я горючого газу, що виділяється.

Розрізняють два режими горіння: горюча речовина утворює однорідну суміш з повітрям, і горюча речовина попередньо розділена від повітря. Другий режим якраз і відповідає твердому матеріалу. В цьому випадку швидкість горіння пропорційна швидкості поступлення летких речовин, що утворилися при піролізі, та безпосередньо пов'язана з інтенсивністю теплообміну між полум'ям та горючою речовиною [73].

Будемо вважати, що масова витрата продуктів піролізу, що утворюється при термічному розкладанні, пов'язана зі швидкістю їх утворення [73]

$$\frac{dI}{d\tau} = -k_1 I, \quad (3.15)$$

де  $I$  – витрата продуктів піролізу, кг/с;

$k_1$  – константа швидкості реакції при піролізі, 1/с.

Рішенням рівняння (3.15) при початковій умові  $I(0) = I_0$  є експоненціальна залежність вигляду

$$I = I_0 \exp(-k_1 \tau), \quad (3.16)$$

де  $I_0$  – початкова витрата продуктів піролізу, кг/с.

Надходження продуктів горіння в потік повітря пов'язане з його дифузією і рухом в порах та тріщинах таким рівнянням [73]:

$$\frac{dm}{d\tau} = -k_2(m - I), \quad (3.17)$$

де  $m$  – масова витрата газоподібних продуктів піролізу, що надходять в потік повітря, кг/с;

$k_2$  – коефіцієнт газообміну між потоком повітря та стінками пор і тріщин твердого матеріалу, 1/с.

Підставляючи функцію (3.16) в рівняння (3.17), знаходимо спочатку його часткове рішення у вигляді

$$m_1(\tau) = \frac{k_2 I_0}{k_2 - k_1} \exp(-k_1 \tau). \quad (3.18)$$

Друге рішення рівняння (3.17) без функції  $I$  має вигляд:

$$m_2(\tau) = A \exp(-k_2 \tau), \quad (3.19)$$

де  $A$  – константа інтегрування, кг/с.

Об'єднуючи рішення (3.18) та (3.19), знаходимо при початковій умові  $m(0) = 0$  константу інтегрування

$$A = -\frac{k_2 I}{k_2 - k_1}. \quad (3.20)$$

Таким чином, шукане рішення (3.17) має вигляд

$$m(\tau) = m_1(\tau) + m_2(\tau) = \frac{k_2 I_0}{k_2 - k_1} [\exp(-k_1 \tau) - \exp(-k_2 \tau)]. \quad (3.21)$$

Приймемо, що коефіцієнти газообміну та швидкості реакції при піролізі приблизно однакові:  $k_1 \approx k_2$ . В цьому випадку в формулі (3.21) виникає невизначеність вигляду  $0/0$ . Для того, щоб розкрити цю невизначеність, перетворимо формулу (3.21) і будемо мати

$$m(\tau) = \frac{k_2 I_0}{k_2 - k_1} \exp(-k_2 \tau) \{ \exp[(k_2 - k_1) \tau] - 1 \}. \quad (3.22)$$

Диференціюючи чисельник і знаменник формули (3.22) за змінною  $p = k_2 - k_1$ , отримаємо при  $k_2 = k_1$  більш просту формулу

$$m(\tau) = I_0 k_1 \tau \exp(-k_1 \tau). \quad (3.23)$$

Отримана залежність (3.23) порівнювалася із залежністю, яку отримано експериментально [75] та яка має вигляд

$$\bar{m}_1(\tau) = (\tau / \tau_m)^{3,6} \exp(-3,6\tau / \tau_m), \quad (3.24)$$

де  $\tau_m$  – час виходу інтенсивності горіння на максимум, с.

Розрахунки за формулою (3.24) показують, що вона ще враховує час розпалювання. Якщо врахувати цей час та зробити зміщення нашої кривої, то криві, отримані за формулами (3.23) та (3.24), будуть узгоджувати одна одну, про що свідчать дані, представлені на рисунку 3.1.

Аналітична крива (рисунок 3.1, суцільна лінія) визначалась за формулою (3.24), перетвореної до вигляду

$$m/m_0 = 2(\tau / \tau_m) \exp(-2\tau / \tau_m), \quad (3.25)$$

де  $m_0$  – максимальне газовиділення при горінні твердого матеріалу, кг/с.

При розрахунках здійснювалося зміщення кривої на  $\tau/\tau_m = 0,4$ , яка враховувала час розпау речовини.

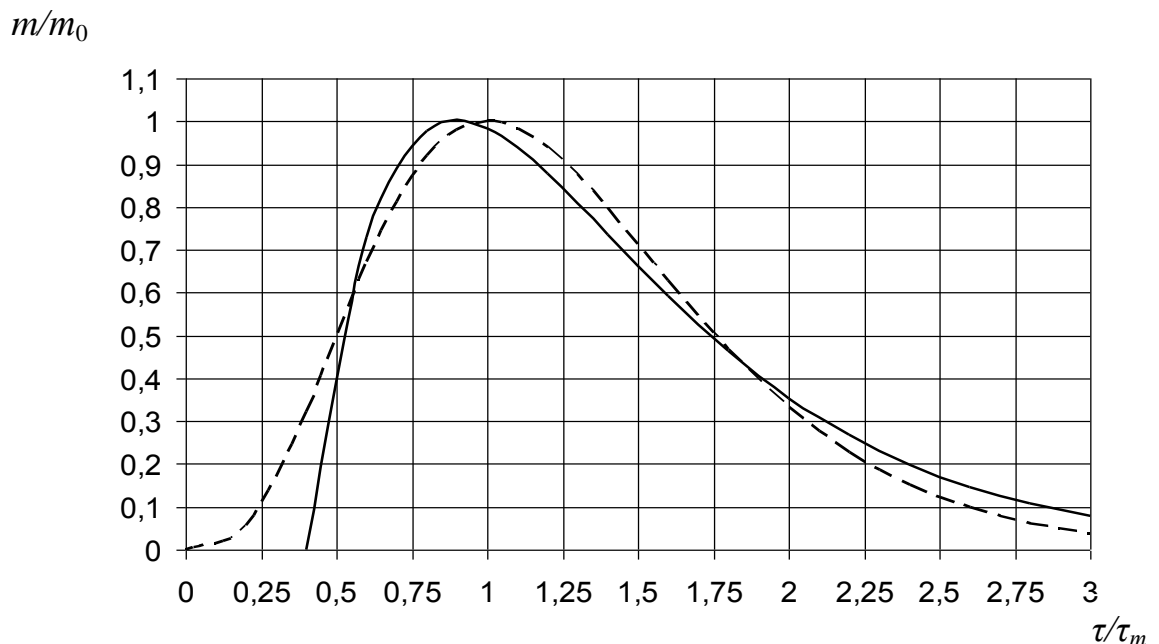


Рисунок 3.1 – Розрахункова (суцільна лінія) та експериментальна (штрихова лінія) інтенсивності газовиділення при горінні твердого матеріалу



Задовільний збіг результатів аналітичних досліджень з емпіричною залежністю якраз підтверджує прийняте припущення про зразкову рівність коефіцієнтів  $k_1 \approx k_2$  газообміну та швидкості реакції при піролізі.

Отримана аналітична залежність (3.25) вигідно відрізняється від емпіричної залежності (3.24), по-перше, своєю простотою та, по-друге, що найголовніше, відображенням фізичної сутності процесів піролізу твердого матеріалу при термічному розкладанні та дифузією газоподібних продуктів розкладання в порах та тріщинах і їх проникненням в потік повітря.

Тому отримана аналітична залежність (3.25) пропонується для використання при математичному моделюванні процесів розвитку та гасіння пожеж інертними газами.

### 3.3. Моделювання переміщення зони горіння та вигорання горючого матеріалу

При вигоранні горючого матеріалу передній фронт зони горіння переміщується з визначеною швидкістю.

Тому необхідно враховувати цей фактор та представляти формулу (3.25) інтенсивності виділення та горіння газоподібних речовин при пожежі у вигляді

$$m = I_0 k_1 (\tau - x/w) \exp[-k_1 (\tau - x/w)], \quad (3.26)$$

де  $w$  – швидкість переміщення зони горіння, м/с.

Формула (3.26) є вірною при  $\tau > x/w$  та повинна перетворитися в нуль при  $\tau < x/w$ . Для автоматичного врахування цього фактора перетворимо формулу (3.26) до вигляду

$$m = 0,5 I_0 k_1 [(\tau - x/w) + |\tau - x/w|] \exp[-k_1 (\tau - x/w)]. \quad (3.27)$$

Аналіз формули (3.27) показує, що введення модуля числа показує, що множник перед експонентою перетворюється в нуль, якщо час  $\tau$  менший від

часу  $x/w$  приходу переднього фронту горіння до заданого місця. Так, якщо задане місце  $x = 20$  м, то при швидкості переміщення пожежі  $w = 0,5$  м/хв передній фронт горіння прийде до цього місця через 40 хвилин. При великих значеннях  $x > 20$  м ніякого горіння ще не має, а ось при  $x < 20$  м горіння відбувається на всій виділеній смузї, оскільки множник перед експонентою не перетворюється в нуль.

На рисунку 3.2 представлені криві розвитку та переміщення осередку горіння вздовж каналу.

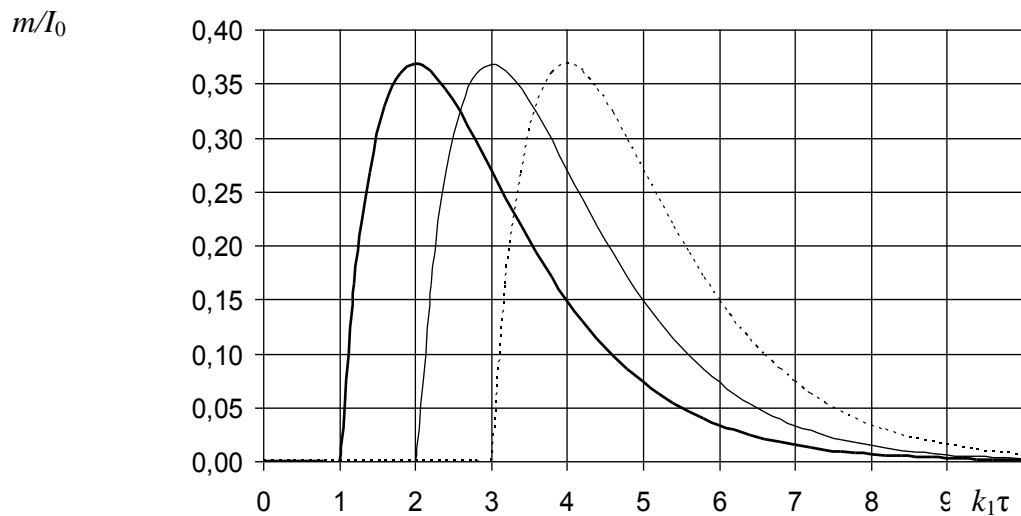


Рисунок 3.2 – Криві розвитку та переміщення осередку горіння вздовж каналу (жирна лінія –  $k_1 x/w = 1$ , тонка –  $k_1 x/w = 2$ , штрихова –  $k_1 x/w = 3$ )

Як бачимо (рисунок 3.2), поки фронт пожежі не досягнув визначеної відстані від місця виникнення пожежі, тут відсутнє горіння. Потім в місці розміщення фронту горіння відбувається дуже швидкий розвиток піролізу та виділення його газоподібних продуктів з подальшим горінням та гасінням протягом визначеного часу.

На рисунку 3.3 приведені криві розподілу вздовж каналу зони горіння в різні моменти часу.

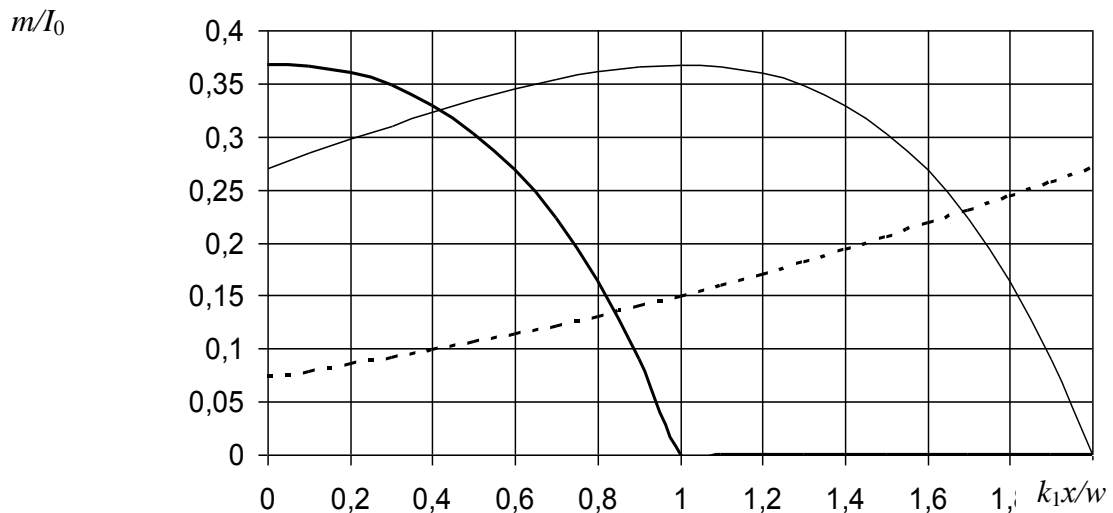


Рисунок 3.3 –Криві розподілу вздовж каналу зони горіння в різні моменти часу (жирна лінія –  $k_1\tau = 1$ , тонка лінія –  $k_1\tau = 2$ , штрихова лінія –  $k_1\tau = 4$ )

Аналіз отриманих результатів (рисунок 3.3) показує, що спочатку зона горіння має максимум в місці виникнення ( $k_1\tau = 1$ ), потім максимум зміщується і в місці виникнення пожежі інтенсивність горіння менша, ніж в точці максимуму ( $k_1\tau = 2$ ), після чого в цьому місці відбувається догорання твердого матеріалу ( $k_1\tau > 4$ ).

Потрапляючи в потік повітря, продукти піролізу миттєво вступають в хімічну реакцію та залежно від концентрації кисню виділяють тепло в одиниці об'єму з інтенсивністю [73, 131]

$$q = \chi \frac{mH_c}{V} \frac{C}{C_0}, \quad (3.28)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт неповноти згорання горючого матеріалу;

$H_c$  – теплота згорання летких речовин, кДж/кг;

$V$  – об'єм зони термічного розкладання, м<sup>3</sup>.

Пов'яжемо об'єм зони термічного розкладання з її довжиною  $l$  та з площею  $S$  поперечного перерізу каналу:  $V = Sl$ , а початкову витрату продуктів піролізу приймемо рівною початковій швидкості  $v_0$  їх надходження в потік

повітря, помноженої на площу  $F = bl$  поверхні, що горить:  $I_0 = v_0 lb$ . Тоді, підставляючи (3.28) в формулу (3.27), отримаємо

$$q = \frac{\chi v_0 H_c b}{2S} \frac{C}{C_0} k_1 [(\tau - x/w) + |\tau - x/w|] \exp[-k_1(\tau - x/w)], \quad (3.29)$$

де  $v_0$  – початкова масова швидкість поступлення продуктів піролізу в потік повітря, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$b$  – ширина поверхні термічного розкладання, м.

Запропонована формула (3.29), на відміну від відомих емпіричних і аналітичних залежностей, вперше одночасно враховує, як процес розвитку горіння твердого матеріалу, так і його вигоряння з урахуванням переміщення пожежі.

Аналіз залежності показує, що фронт горіння знаходиться на відстані  $x = w\tau$  та поступово переміщується. Горіння в різноманітних перерізах каналу починається тим пізніше, чим далі знаходиться переріз, що розглядається, від місця виникнення пожежі. В той же час поступово режим горіння буде переходити в режим тління по мірі зменшення поступлення продуктів піролізу в потік повітря.

Інтенсивність джерела поглинання кисню при горінні тісно пов'язана з функцією теплового джерела і може бути представлена у вигляді

$$M = \delta q / H_c, \quad (3.30)$$

де  $\delta$  – емпірична константа.

Підставляючи формулу (3.30) в систему рівнянь (3.14), отримаємо

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = a_x \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + 16a_y \frac{1 - \bar{T}}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p T_0}; \quad (3.31)$$

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \tilde{D}_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + 16\tilde{D}_y \frac{1 - \bar{C}}{S} - \frac{\delta q}{\rho_0 H_c}. \quad (3.32)$$

Отримана залежність (3.29) може бути використана в рівняннях тепломасообміну (3.31) і (3.32), як функція джерел теплоти та інтенсивності витрати кисню при горінні твердого матеріалу.

Таким чином, функція (3.29) буде впливати як на температуру в зоні горіння в залежності від концентрації кисню, так і на саму цю концентрацію.

### **3.4. Висновки**

1. Розроблено математичну модель розвитку і розповсюдження пожежі в кабельних тунелях, відмінність якої полягає в тому, що враховано піроліз газоподібних продуктів, які переходять зі зв'язаного у вільний стан в твердому матеріалі, а потім дифундують між порами і тріщинами, та потрапляють в потік повітря.

2. Враховано стиснення та розширення сумішей газів в каналі, що призводить до прискорення процесу розвитку пожежі та переміщення фронту полум'я, за яким відбувається повільне догорання та тління обвугленого матеріалу.

3. Отримано аналітичну залежність інтенсивності горіння, яка вперше одночасно враховує, як процес розвитку пожежі, так і його переміщення з заданою швидкістю.

4. Показано, що горіння в різноманітних перерізах каналу починається тим пізніше, чим далі розміщене місце перерізу від місця виникнення пожежі. В той же час поступово режим горіння буде переходити в режим тління по мірі зменшення надходження продуктів піролізу в потік повітря.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ В КАБЕЛЬНИХ ТУНЕЛЯХ

#### 4.1. Методика проведення експериментальних дослідження гасіння пожежі в модельній вогневій споруді

Дослідження процесів розвитку та гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією були проведені в лабораторних умовах. З цією метою було споруджено фізичну модель, схему якої представлено на рисунку 4.1.

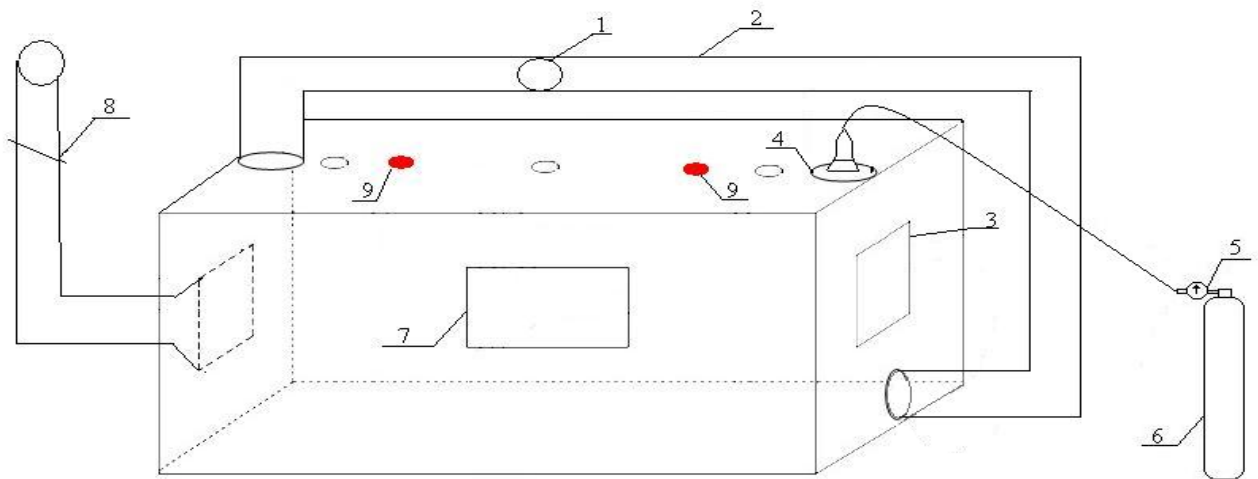


Рисунок 4.1 – Схема експериментальної модельної «вогневої» об'ємом 0,48 м<sup>2</sup> для дослідження параметрів горіння кабелів

1 – вентилятор, 2 – рециркуляційний трубопровід, 3 – отвір для підсмоктування повітря, 4 – отвір для подавання газових вогнегасних речовин, 5 – редуктор з манометром, 6 – балон з газовою вогнегасною речовиною, 7 – оглядове віконце, 8 – вентиляційний трубопровід з шубером, 9 – отвори для забору проб газового середовища.

Термодатчики температури розміщувалися на початку, посередині та в кінці камери.

Схема розміщення термоперетворювачів та отворів для забору проб газового середовища наведена на рис. 4.2.

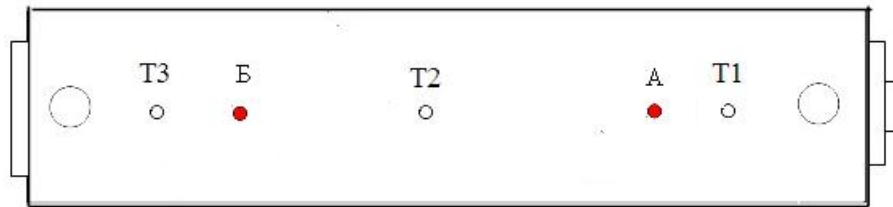


Рисунок 4.2 – Схема розташування термопар та отворів для забору проб газового середовища модельної вогневої споруди

Довжина камери становила 2м, висота 0,6 м і ширина 0,4 м.

Таким чином, площа поперечного перерізу камери дорівнює  $S = 0,6 \cdot 0,4 = 0,24 \text{ м}^2$ , а приведений діаметр камери дорівнює

$$d = \frac{4S}{\Pi} = \frac{4 \cdot 0,6 \cdot 0,4}{2(0,6 + 0,4)} = 0,48 \text{ м},$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу камери,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi$  – периметр поперечного перерізу камери, м.

При таких геометричних розмірах камери масштаб моделювання становить 1:4. Це еквівалентно довжині кабельного тунелю 8 м при приведеному діаметрі 2 м.

Потужність витяжної вентиляції забезпечує рух повітряного потоку в середині камери від 0,024 до 0,076  $\text{м}^3/\text{с}$  із середньою швидкістю 0,1 – 0,3 м/с. Це відповідає числу Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{ud}{\nu} = \frac{(0,1 - 0,3) \cdot 0,48}{1,5 \cdot 10^{-5}} \approx 3000 - 10000.$$

Отже бачимо, що режим руху газів в камері турбулентний, як і в реальному тунелі, і він набагато перевищує поріг ламінарного руху, який дорівнює 2300. [68].

Експеримент проводиться у такій послідовності:

- 1) Включають обладнання, перевіряють його справність;
- 2) Готують камеру згоряння (прогрівають протягом 20 хв при  $t = 200^{\circ}\text{C}$ , продукти згоряння видаляють в атмосферу);
- 3) Розміщують кабелі на лотках на висоті 0,2 м та 0,3 м від нижнього рівня камери;
- 4) Підпалюють кабельну лінію протягом 4 хв газовим пальником з робочою довжиною 0,3 м, висота полум'я 0,15 м, зі сторони отвору, через який подається повітря;
- 5) При досягненні в камері  $t = 700^{\circ}\text{C}$ , подають інертний газ;
- 6) Гасіння проводять до повного припинення горіння;
- 7) Забір проб газової суміші здійснюють через кожну хвилину до повного припинення горіння та досягнення температури в камері  $100^{\circ}\text{C}$ ;
- 8) Рециркуляцію проводять до зниження температури  $100^{\circ}\text{C}$ ;
- 9) При досягненні температури  $100^{\circ}\text{C}$ , відкривають заслінку для видалення в атмосферу продуктів згоряння;
- 10) Очищують випробувальну камеру від залишків кабельної продукції.

В камеру згоряння завантажують 24 кг кабельної продукції, з якої 16 кг – це горюча ізоляція, кабелі довжиною 1,2 м, п'ять частин займають площу  $0,5 \text{ м}^2$ . За цей період часу настає стійке полуменеве горіння.

Запалювання здійснюється при витраті потоку повітря  $0,25 \text{ м}^3/\text{хв}$  на вході в камеру. Підсмоктування повітря відбувається через отвір прямокутної форми з площею  $0,078 \text{ м}^2$ . Подавання газових вогнегасних речовин здійснюється через круглий отвір площею  $0,00785 \text{ м}^2$ .

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу утворюється значна кількість продуктів згоряння, що викликає зменшення притоку свіжого повітря в камеру. Більш детально це викладено у додатках А, Б, В, Д.



#### 4.2. Розробка математичної моделі гасіння пожежі інертними газами

Для подавання інертного газу (азоту, діоксиду вуглецю) можуть застосовуватися насадки радіального типу. В таких насадках вихідні струмені газу віялоподібні. Насадки радіального типу розділяють на стельові та стінові. Стельові насадки можуть подавати струмені газу в сектор з кутом  $360^\circ$ , стінові – близько  $180^\circ$ .

Приклад застосування стельових насадок радіального типу в кабельному тунелі показано на рисунку 4.3.

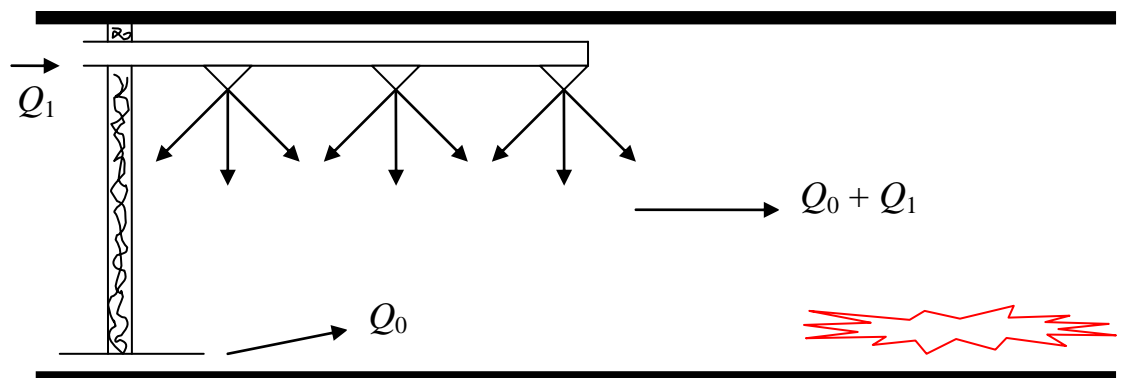


Рисунок 4.3 – Схема застосування стельових радіальних насадок для подавання інертного газу в кабельних тунелях

Розташування насадок в кабельному тунелі здійснюється у відповідності з технічною документацією. Кількість та площа вихідних отворів насадок визначається гідравлічним розрахунком з урахуванням коефіцієнта витрати та карти розпилювання, що вказані в технічній документації на насадки.

На рисунку 4.3 показано, як струмені інертного газу із загальною витратою  $Q_1$ , змішуються з витоками повітря  $Q_0$  через перемичку, після чого суміш газів ( $Q_0 + Q_1$ ) потрапляє до зони горіння, розміщений на різній відстані від місця подавання інертного газу.

В розділі 2 розглянуто процеси нестационарного переносу інертних газів (азоту та діоксиду вуглецю) з урахуванням їх перемішування в місці подавання та поглинання стінками каналу кабельних тунелів. Отримані результати можуть

бути використані, якщо замість концентрації інертного газу розглядати концентрацію кисню.

Загальна формула для розрахунку інертного газу при подаванні його в ізольований об'єм може бути представлена у вигляді

$$Z_{\infty} = \frac{Z_0 Q_0 + 100 Q_1}{Q_0 + Q_1}, \quad (4.1)$$

де  $Q_0$  – витрата повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Q_1$  – витрата інертного газу,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$Z_0$  – концентрація інертного газу в повітрі, %.

Так, при подаванні азоту  $Z_0 = 79$  %, а діоксиду вуглецю  $Z_0 = 0$ .

Концентрація кисню в потоці суміші газів може бути визначена за формулою

$$C_1 = \frac{C_0 Q_0}{Q_0 + Q_1}, \quad (4.2)$$

де  $C_0$  – концентрація кисню до моменту подавання інертного газу, %.

Розглянемо процес перемішування інертного газу з повітрям в зоні його подавання спринклерними головками поперек потоку повітря. Зміна за часом концентрації інертного газу в цій зоні може бути описана рівнянням

$$\frac{V}{k} \frac{dZ}{d\tau} = Z_0 Q_0 + 100 Q_1 - (Q_0 + Q_1) Z, \quad (4.3)$$

де  $V$  – об'єм зони перемішування,  $\text{м}^3$ ;

$k$  - коефіцієнт перемішування.

Очевидно, в межах при  $\tau \rightarrow \infty$  отримаємо формулу (4.1), виділяючи яку з рівняння (4.3) та інтегруючи рівняння, що залишилось, отримаємо

$$Z(\tau) = A \exp[-k(Q_0 + Q_1)\tau/V], \quad (4.4)$$

де  $A$  – константа інтегрування, %.

Об'єднуючи дві формули (4.1) та (4.4) в одну, знайдемо константу інтегрування з умови, що при  $Z(0) = Z_0$ , та отримаємо

$$Z_1(\tau) = Z_0 + \left( \frac{Z_0 Q_0 + 100 Q_1}{Q_0 + Q_1} - Z_0 \right) \{1 - \exp[-k(Q_0 + Q_1)\tau / V]\}. \quad (4.5)$$

В якості прикладу приймемо, що витрата повітря при подаванні інертного газу становить його половину:  $Q_0 = Q_1/2$ . Тоді гранична концентрація азоту буде дорівнювати  $N_2 = 93$  %, а концентрація діоксиду вуглецю становитиме  $CO_2 = 67$  %. При цьому кисень і в першому випадку і в другому випадку буде дорівнювати всього  $O_2 = 7$  %.

Формула для розрахунку динаміки зміни концентрації кисню в зоні подавання інертного газу буде аналогічною формулі (4.5) та з урахуванням (4.2) буде мати вигляд

$$C_1(\tau) = C_0 + \left( \frac{C_0 Q_0}{Q_0 + Q_1} - C_0 \right) \{1 - \exp[-k(Q_0 + Q_1)\tau / V]\}. \quad (4.6)$$

На рисунку 4.4 показані результати розрахунку за формулами (4.5) та (4.6) динаміки зміни концентрацій інертного газу та кисню в зоні перемішування потоків.

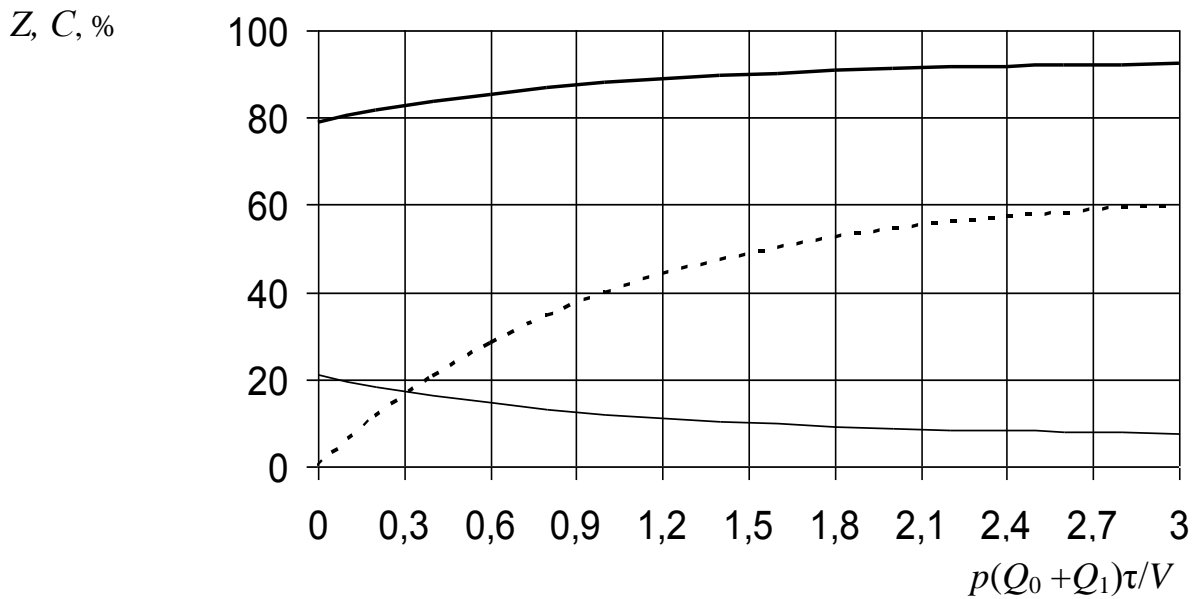


Рисунок 4.4 – Динаміка зміни концентрацій азоту (жирна лінія), діоксиду вуглецю (штрихова лінія) та кисню (тонка лінія) в зоні перемішування потоків

Вихід концентрацій азоту або вуглекислого газу на стаціонарний режим в зоні перемішування залежить, як показали експериментальні дослідження, від швидкості руху суміші газів та від довжини зони. Це дійсно так, якщо прийняти

$$\frac{Q_0 + Q_1}{V} = \frac{uS}{lS} = u/l, \quad (4.7)$$

де  $u$  – швидкість руху суміші газів в зоні перемішування, м/с;

$l$  – довжина зони перемішування, м.

За даними теоретичних та експериментальних досліджень [12, 43], і для азоту і для діоксиду вуглецю динаміка їх перемішування з повітрям в місці подавання може бути визначена за формулою (2.43). Попри те вона все ще залежить від поперечних розмірів каналу, а також від розміщення спринклерних зрошувачів по довжині каналу. Так, в експериментах приведений діаметр дорівнював 2,5 м. При дрібномасштабних пожежах в камері перемішування газів буде відбуватися значно швидше, оскільки приведений

діаметр буде значно меншим. Тому у цьому випадку необхідні додаткові експериментальні дослідження в камері.

Для того, щоб урахувати поглинання інертних газів, використовуються тільки рівняння стаціонарного переносу газів (звернемося до розділу 2). Тут встановлено, що граничний розподіл концентрацій інертного газу може бути описаний за формулою (2.31), спрощуючи яку при  $D_0 = 0$ , представимо її у вигляді

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left(-\frac{px}{\sqrt{S}}\right), \quad (4.8)$$

де  $p = 16k$  – емпірична константа поглинання інертних газів, що дорівнює за даними експериментів для азоту  $p = 0,0025$ , а для вуглекислого газу –

$$p = 0,0044.$$

В результаті нехтування молекулярною дифузією інертного газу у порівнянні з турбулентною дифузією формула (2.30) для коефіцієнта поглинання інертного газу прийме вигляд

$$\gamma = pu / \sqrt{S}. \quad (4.9)$$

Оскільки гранична концентрація інертного газу по довжині каналу визначається за формулою (4.8), то аналогічно з урахуванням (4.2) визначається і концентрація кисню

$$C(x) = C_0 + (C_1 - C_0) \exp\left(-\frac{px}{\sqrt{S}}\right). \quad (4.10)$$

В якості прикладу, як і перед цим, приймемо, що витрата повітря при подаванні інертного газу становить його половину. Тоді гранична концентрація азоту, згідно (4.1), буде дорівнювати  $N_2 = 93 \%$ , а концентрація діоксиду

вуглецю складе  $\text{CO}_2 = 67\%$ . При цьому кисень в першому і в другому випадках буде дорівнювати всього  $\text{O}_2 = 7\%$ . Площу поперечного перерізу каналу приймаємо рівною  $S = 4 \text{ м}^2$ .

На рисунку 4.5 за даними розрахунку за формулою (4.10) представлені криві розподілу граничної концентрації кисню вздовж каналу, заповненого інертним газом.

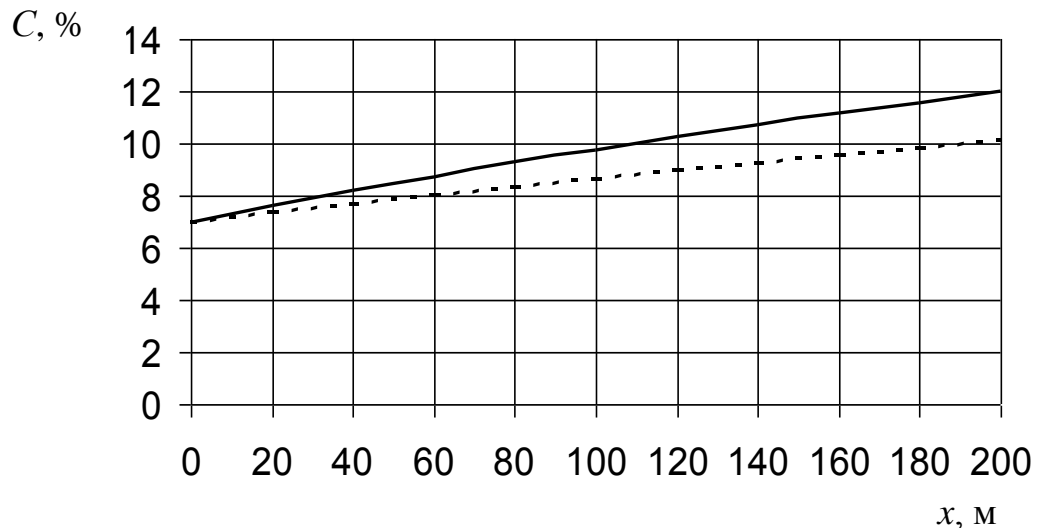


Рисунок 4.5 – Криві граничного розподілу концентрацій кисню вздовж каналу, заповненого азотом (штрихова лінія) та заповненого діоксидом вуглецю (суцільна лінія)

З порівняння кривих (рисунок 4.5) виходить, що гасіння пожеж азотом є більш ефективним, оскільки він менше поглинається стінками каналу, і на ділянці до 200 м концентрація кисню збільшується від 7% до 10%. В цей же час гасіння пожеж діоксидом вуглецю показує, що вже через 100 м концентрація кисню перевищить 10%.

Поглинання стінками каналу інертного газу викликає зворотну реакцію – десорбцію кисню з щілин стінок каналу, в результаті чого його концентрація збільшується.

Отримані результати можуть бути використані для прогнозування ефективності гасіння пожежі тим або іншим інертним газом. Попри це необхідно ще знати ступінь його впливу на зону горіння та час гасіння. Для

досягнення цієї мети може бути використана система рівнянь (3.26) та її представлення в кінцевих різницях. При цьому зовсім не обов'язково використовувати рівняння переносу інертного газу, оскільки адекватним йому є рівняння переносу кисню, яке до того ж враховує стиснення суміші газів.

Для чисельного моделювання процесів тепло- та масообміну використовуємо цю ж систему рівнянь (3.26).

З моменту початку гасіння пожежі приймається ліва гранична умова (4.6), яку представимо у вигляді

$$\bar{C}_1(\tau) = 1 + (\bar{C}_1 - 1)\{1 - \exp[-k(Q_0 + Q_1)\tau/V]\}, \quad (4.11)$$

де  $\bar{C}_1 = \bar{C}_1(\infty)$  – визначається за формулою (4.2) як гранична концентрація кисню при застосуванні будь-якого інертного газу.

Виразимо витрату суміші газів через їх швидкість, як  $Q_0 + Q_1 = uS$ , та, приймаючи емпіричну константу  $k = 1$ , а об'єм  $V = Sl$ , приведемо формулу (4.9) до вигляду

$$\bar{C}_1(\tau) = \bar{C}_1 + (1 - \bar{C}_1)\exp[-\tilde{u}\tau/l]. \quad (4.12)$$

Таким чином, розроблена математична модель гасіння пожежі в кабельних тунелях дає змогу прогнозувати ступінь впливу на осередок горіння тим чи іншим інертним газом при різноманітних ситуаціях.

### **4.3. Чисельне моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в кабельних тунелях**

Для чисельного моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в каналах використовуємо зональну модель [75], розглядаючи дві зони: перед осередком горіння та осередок горіння. Це спрощує задачу та дає змогу розглядати процеси тепломасообміну тільки в часі в кожній зоні.

Як уже було зазначено, при довготривалому затуханні пожежі необхідно враховувати також нагрівання стінок каналу з наступним їх охолодженням. Тому в систему рівнянь (3.14) додано ще рівняння нагрівання стінок каналу [68, 69]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2}, \quad (4.13)$$

де  $\theta$  – температура стінок каналу, К;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності стінок каналу, м<sup>2</sup>/с;

$y$  – поперечна координата вглиб стінок каналу, м.

Представимо праву частину рівняння (4.13) в кінцевих різницях, обмежуючись тільки одним елементом розбиття

$$\frac{d\theta}{dt} = a \frac{\theta_{cm} - 2\theta + T_0}{\Delta y^2}, \quad (4.14)$$

де  $\Delta y$  – крок розбиття в глибину стінок каналу, м.

Прийmemo на стінках тунелю граничні умови третього роду [68]:

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = \alpha_0 (\theta_{cm} - T), \quad (4.15)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності стінок каналу, Вт/(м·К);

$\alpha_0$  – коефіцієнт тепловіддачі стінок каналу, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В кінцевих різницях гранична умова (4.15) набуває вигляду

$$\lambda \frac{\theta - \theta_{cm}}{\Delta y} = \alpha_0 (\theta_{cm} - T), \quad (4.16)$$



звідти знайдемо формулу для розрахунку температури стінок каналу

$$\theta_{cm} = \frac{\theta + \bar{\alpha}_0 T}{1 + \bar{\alpha}_0}, \quad (4.17)$$

де  $\bar{\alpha}_0 = \alpha_0 \Delta y / \lambda$  - безрозмірний коефіцієнт тепловіддачі стінок каналу.

Так як крок розбиття  $\Delta y$  довільний, пов'язаний з товщиною прогріву стінок каналу, приймемо  $\bar{\alpha}_0 = 1$ . Тоді підставляючи формулу (4.17) в рівняння (4.14) будемо мати

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{a}{2\Delta y^2} (T - 3\theta + 2T_0). \quad (4.18)$$

Представимо рівняння (4.18) в кінцевих різницях в неявному вигляді:

$$\theta^{n+1} = \theta^n + \frac{a\Delta\tau}{2\Delta y^2} (T^n - 3\theta^{n+1} + 2T_0). \quad (4.19)$$

Розв'яжемо отриману рівність (4.17) відносно температури стінок каналу на новому часовому шарі та, поділивши усі доданки на температуру при нормальних умовах, отримаємо

$$\bar{\theta}^{n+1} = \frac{\bar{\theta}^n + \bar{a}(\bar{T}^n + 2)}{1 + 3\bar{a}}, \quad (4.20)$$

де  $\bar{a} = \frac{a\Delta\tau}{2\Delta y^2}$  - безрозмірний коефіцієнт температуропровідності стінок каналу.

До рівняння (4.20), нехтуючи температуропровідністю додамо рівняння переносу теплоти із системи рівнянь (3.14) у другій зоні

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\Delta\bar{T}}{\Delta\tau} + \tilde{u} \frac{\Delta\bar{T}}{\Delta x_2} = 16a_y \frac{\bar{\theta}_{cm} - \bar{T}}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p T_0}, \quad (4.21)$$

де  $\bar{T}$  - відносна температура другої зони;

$\Delta x_2$  - довжина другої зони, м.

При використанні першого рівняння системи (3.14) прийнято, що температура стінки каналу змінюється, а не дорівнює початковій температурі стінок каналу ( $T_{ст} \neq T_0$ ).

Використовуємо для розрахунків схему з кінцевими різницями проти потоку в неявному вигляді. Оскільки в кожній зоні один вузол, то можна прийняти  $m = 1$ . Тоді вузол  $m - 1 = 0$  означає вхід в цю зону. Опускаючи нижні індекси, приведемо рівняння (4.21) до вигляду

$$\frac{1}{\bar{T}^n} \frac{\bar{T}^{n+1} - \bar{T}^n}{\Delta\tau} + \tilde{u} \frac{\bar{T}^{n+1} - 1}{\Delta x_2} = 16a_y \frac{\bar{\theta}^{cm} - \bar{T}^{n+1}}{S} + \frac{q^n}{\rho_0 c_p T_0}. \quad (4.22)$$

Підставляючи в рівняння (4.22) формулу (4.17) при  $\bar{\alpha}_0 = 1$ , отримаємо

$$\frac{1}{\bar{T}^n} \frac{\bar{T}^{n+1} - \bar{T}^n}{\Delta\tau} + \tilde{u} \frac{\bar{T}^{n+1} - 1}{\Delta x_2} = 8a_y \frac{\bar{\theta}^n - \bar{T}^{n+1}}{S} + \frac{q^n}{\rho_0 c_p T_0}. \quad (4.23)$$

Розв'яжемо рівняння (4.23) відносно температури на новому часовому шарі та отримаємо

$$\bar{T}^{n+1} = \bar{T}^n \frac{1 + Cu + \bar{\gamma}_1 \bar{\theta}^n + \bar{q}^n \bar{C}^n}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_1)}, \quad (4.24)$$

де  $Cu = \tilde{u} \Delta\tau / \Delta x_2$  - схематичне число Куранта;

$\bar{\gamma}_1 = 8a_y \Delta\tau / S$  - безрозмірний коефіцієнт теплообміну зі стінками каналу в зоні горіння;

$\bar{q}^n = \frac{q^n}{\rho_0 c_p T_0}$  - відносна інтенсивність тепловиділення в зоні горіння.

З формули (4.24) виходить, що при відсутності тепловиділення в другій зоні температура не змінюється.

Аналогічно, нехтуючи дифузією газів у порівнянні з напірним їх рухом, представимо, згідно (3.14), рівняння переносу кисню в першій та другій зонах у вигляді

$$\begin{aligned}\frac{1}{\bar{T}} \frac{\Delta \bar{\zeta}}{\Delta \tau} + \tilde{u} \frac{\Delta \bar{\zeta}}{\Delta x_1} &= 16 \tilde{D}_y \frac{1 - \bar{\zeta}}{S}; \\ \frac{1}{\bar{T}} \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \tau} + \tilde{u} \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta x_2} &= 16 \tilde{D}_y \frac{1 - \bar{C}}{S} - M / \rho_0,\end{aligned}\quad (4.25)$$

де  $\bar{\zeta}$  та  $\bar{C}$  – відносна концентрація кисню в першій та другій зонах відповідно.

Систему рівнянь (4.25) з кінцевими різницями проти потоку в неявному вигляді представимо так

$$\begin{aligned}\frac{\bar{\zeta}_m^{n+1} - \bar{\zeta}_m^n}{\Delta \tau} + \tilde{u} \frac{\bar{\zeta}_m^{n+1} - \bar{\zeta}_{m-1}^{n+1}}{\Delta x_1} &= 16 \tilde{D}_y \frac{1 - \bar{\zeta}_m^{n+1}}{S}; \\ \frac{1}{\bar{T}_m^n} \frac{\bar{C}_m^{n+1} - \bar{C}_m^n}{\Delta \tau} + \tilde{u} \frac{\bar{C}_m^{n+1} - \bar{C}_{m-1}^{n+1}}{\Delta x_2} &= 16 \tilde{D}_y \frac{1 - \bar{C}_m^{n+1}}{S} - M_m^n / \rho_0.\end{aligned}\quad (4.26)$$

Тут також  $m = 1$ , та вузол ліворуч ( $m - 1 = 0$ ) означає для першого рівняння системи (4.26), що  $\bar{\zeta}_{m-1}^{n+1} = \bar{\zeta}_0^{n+1}$ .

Якщо немає подавання інертного газу та немає рециркуляції, в цьому випадку, як і для температури, отримаємо, що в зоні горіння та перед нею концентрація кисню не змінюється. Попри те при подаванні інертного газу або при рециркуляції суміші газів по замкнутому контурі це буде деяка функція від часу. Вирішуючи перше рівняння системи (4.26) відносно шуканої концентрації кисню в першій зоні на новому часовому шарі, отримаємо

$$\bar{\zeta}^{n+1} = \frac{\bar{\zeta}^n + \bar{\zeta}_0^{n+1} Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}{1 + Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}, \quad (4.27)$$

де  $\bar{\gamma}_2 = 16 D_y \Delta \tau / S$  - безрозмірний коефіцієнт поглинання інертного газу.

З формули (4.27) виходить, що при  $\bar{\zeta}_{m-1}^{n+1} = \bar{\zeta}_0^{n+1} = 1$ , тобто при подаванні інертного газу та без рециркуляції концентрація кисню в першій зоні не змінюється.

Друге рівняння системи (4.26) має також один вузол і ліворуч від нього буде нульовий вузол з концентрацією кисню для першої зони, тобто тут

$\bar{C}_0^{n+1} = \bar{\zeta}^{n+1}$ . Тоді розв'язуючи друге рівняння системи (4.26) відносно концентрації кисню на новому часовому шарі в зоні горіння та опускаючи нижні індекси, отримаємо

$$\bar{C}^{n+1} = \frac{\bar{C}^n + \bar{T}^n (Cu\bar{\zeta}^{n+1} + \bar{\gamma}_2)}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_2 + \delta\bar{q}^n)}, \quad (4.28)$$

де  $\delta$  – коефіцієнт розходу кисню на хімічні реакції з газоподібними продуктами піролізу.

З формули (4.28) виходить, що при відсутності хімічних реакцій ( $\delta = 0$ ) концентрація кисню в зоні горіння не буде змінюватися навіть за наявності тепловиділення, наприклад, від зовнішнього джерела.

Таким чином, отримано чотири рівняння (4.20), (4.24), (4.27) та (4.28) для дослідження гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в замкнутому контурі. Об'єднаємо їх в одну систему, і будемо мати

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}^{n+1} &= \frac{\bar{\zeta}^n + \bar{\zeta}_0^{n+1} Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}{1 + Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}; \\ \bar{C}^{n+1} &= \frac{\bar{C}^n + \bar{T}^n (Cu\bar{\zeta}^{n+1} + \bar{\gamma}_2)}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_2 + \delta\bar{q}^n)}; \\ \bar{T}^{n+1} &= \bar{T}^n \frac{1 + Cu + \bar{\gamma}_1 \bar{\theta}^n + \bar{q}^n \bar{C}^n}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_1)}; \\ \bar{\theta}^{n+1} &= \frac{\bar{\theta}^n + \bar{a}(\bar{T}^n + 2)}{1 + 3\bar{a}}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Аналіз рівнянь системи (4.29) показує, що вона є абсолютно стійкою, оскільки не містить в чисельнику доданків зі знаком «мінус». Окрім того, друге та третє рівняння системи (4.29) вперше враховують стиснення та розширення газів (наявність в чисельнику та знаменнику функції температури).

Джерело тепловиділення при горінні представимо, на відміну від емпіричної залежності (3.24), в аналітичному вигляді аналогічно (3.25):

$$\bar{q} = 2\bar{q}_0(\tau/\tau_m)\exp(-2\tau/\tau_m), \quad (4.30)$$

де  $\bar{q}_0$  - відносне максимальне тепловиділення при пожежі.

Позначивши через  $k = 2/\tau_m$  як показник швидкості (1/с) розвитку та затухання пожежі, представимо залежність (4.30) у вигляді

$$\bar{q} = \bar{q}_0 k \tau \exp(-k\tau). \quad (4.31)$$

Виражаючи час через його відрізок і номер часового шару, замість (4.31) отримаємо

$$\bar{q}^n = \bar{q}_0 k n \Delta \tau \exp(-k n \Delta \tau). \quad (4.32)$$

Коефіцієнт теплообміну  $\bar{\gamma}_1$  та коефіцієнт поглинання  $\bar{\gamma}_2$  інертного газу стінками каналу приймаються за даними експериментальних досліджень.

Початкову умову перед виникненням пожежі для системи рівнянь (4.29) приймемо у вигляді

$$\bar{\zeta}^0 = \bar{C}^0 = \bar{T}^0 = 1. \quad (4.33)$$

Для концентрації кисню граничною умовою при подаванні інертного газу ліворуч є, згідно (4.10), такий вигляд:

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_0^{n+1} &= \bar{C}_1 + (1 - \bar{C}_1) \exp[-\tilde{y} n \Delta \tau / l], \text{ якщо } n_1 < n < n_2; \\ \bar{C}_0^{n+1} &= 1, \text{ якщо } n_1 > n > n_2, \end{aligned} \quad (4.34)$$

де  $n_1$  та  $n_2$  номери часових шарів початку та кінця подавання інертного газу.

Гранична умова (4.34) є незручною при моделюванні з умовними переходами. Для того, щоб запобігти цьому, введемо множник

$$m_1 = 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_1}{|n - n_1|} \right) \left( 1 + \frac{n_2 - n}{|n_2 - n|} \right). \quad (4.35)$$

Множник  $m$  якраз і визначає початок та кінець застосування даного засобу пожежогасіння. Так, до застосування засобу пожежогасіння та після цього  $m_1 = 0$ , а під час застосування  $m_1 = 1$ , у чому можна впевнитися, аналізуючи формулу (4.35).

Тоді, об'єднуючи залежність (4.34) та (4.35), отримаємо

$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_1}{|n - n_1|} \right) \left( 1 + \frac{n_2 - n}{|n_2 - n|} \right) \{ (\bar{C}_1 - 1) [1 - \exp(-\tilde{y}n\Delta\tau)] \}. \quad (4.36)$$

Аналіз отриманої формули показує, що до подавання інертного газу і після цього на вході в першу зону концентрація кисню така ж, як і до пожежі. При подаванні інертного газу вона буде зменшуватися від 1 до  $\bar{C}_1$ .

Після подавання інертного газу та включення рециркуляції суміші газів введемо в розгляд ще один множник

$$m_2 = 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_2}{|n - n_2|} \right) \left( 1 + \frac{n_3 - n}{|n_3 - n|} \right). \quad (4.37)$$

Множник показує, що якщо через  $n_2$  позначити часовий шар, на якому включається рециркуляція, а через  $n_3$  позначити часовий шар, на якому зупиняється рециркуляція, то множник буде рівним «1». При других значеннях часового шару множник дорівнює нулю. Це дає можливість задати граничну умову на вході в першу зону у вигляді

$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_2}{|n - n_2|} \right) \left( 1 + \frac{n_3 - n}{|n_3 - n|} \right) (\bar{C}^n - 1). \quad (4.38)$$

Аналіз отриманої формули (4.38) показує, що після подавання інертного газу та створення замкнутого контуру концентрація кисню на виході з зони горіння буде попадати на вхід в першу зону до того часу, поки  $n < n_3$ . Потрібно розімкнути контур, і на вхід в першу зону почне надходити свіже повітря з концентрацією кисню, рівною «1».

Приведених рівнянь, формул та умов (4.29), (4.33), (4.36) и (4.38) повністю достатньо для моделювання гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією в кабельних тунелях.

Рециркуляцію можна включати і з моменту подавання інертного газу, приймаючи при цьому в формулі (4.38)  $n_2 = n_1$ .

Розроблені алгоритм та програмне забезпечення для розрахунку динаміки за часом температури в зоні горіння і на стінках каналу, а також концентрації кисню в зоні горіння та перед нею. При розрахунках формуються чотири масиви розрахункових даних температури і концентрації кисню з винесенням кривих їх розподілу за часом.

Згідно розробленої зонної моделі на рисунку 4.6 представлені результати моделювання динаміки в часі температури та концентрації кисню при пожежі.

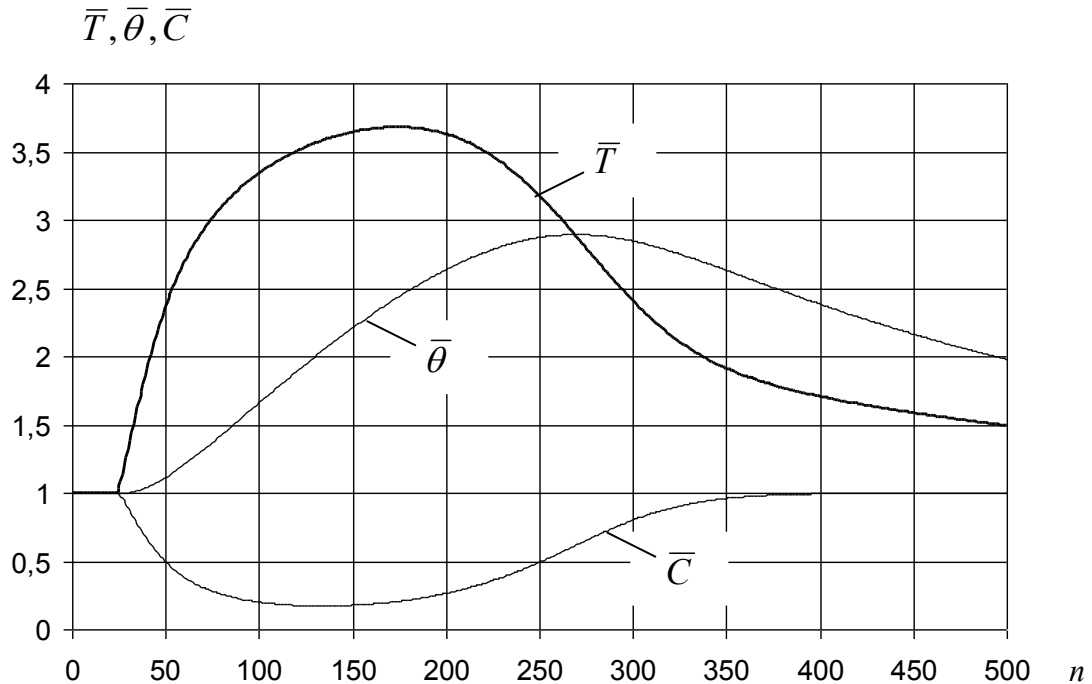


Рисунок 4.6 – Динаміка за часом відносної температури в зоні горіння і на стінках каналу та відносної концентрації кисню в зоні горіння

Моделювання проводилося при таких вихідних даних:  $Cu = 1$ ;  $\bar{\gamma}_1 = 1$ ;  $\bar{\gamma}_2 = 0$ ;  $k = 0,0004$  1/с;  $n_0 = 24$ ;  $\delta = 0,15$ ;  $\bar{a} = 0,007$ ;  $\bar{q}_0 = 8$ .

Результати моделювання показують, яке велике значення має урахування нагрівання та охолодження стінок каналу, в тому числі і твердого палива. На рисунку 4.6 видно, що нагрівання стінок каналу починається із запізненням, а охолодження із сповільненням. Тут максимум температури в зоні горіння майже збвгається з мінімумом концентрації кисню.

Переходячи до реального масштабу часу та розмірних величин температури і концентрації кисню, прийmemo довжину зони горіння рівною  $\Delta x_2 = 10$  м, а всю довжину відсіку каналу приймаємо рівною  $L = 150$  м. Тоді довжина зони до осередку горіння буде становити  $\Delta x_1 = 140$  м. При швидкості повітря  $u = 1$  м/с і числі Куранта  $Cu = 1$  крок за часом буде дорівнювати  $\Delta \tau = 0,017$  хв.



На рисунку 4.7 представлена крива зміни температури за часом в зоні горіння у відповідності з вибраними вихідними даними.

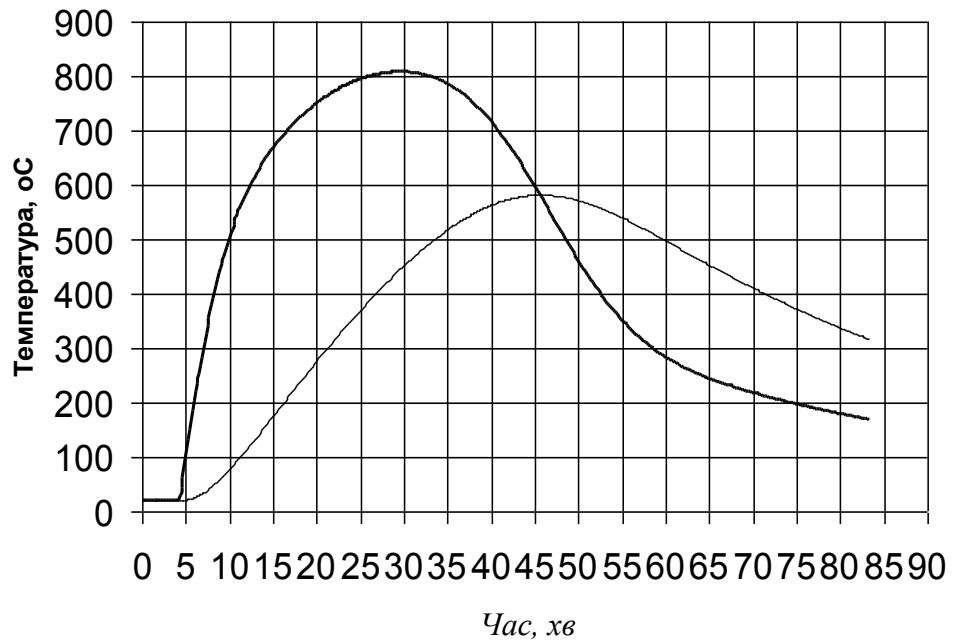


Рисунок 4.7 – Динаміка зміни температури в зоні горіння довжиною 10 м (жирна лінія) і на стінках каналу (тонка лінія) при швидкості повітря 1 м/с

Отримані результати знаходяться у повній відповідності з даними [95, 127-130], коли через 30 хвилин температура досягає 800 °С. Час розпалювання при цьому було прийнято рівним  $\tau_0 = 4$  хв.

Для розрахунку довжини зони горіння в цьому випадку представлена формула [95]

$$\Delta x_2 = \tau(u + 4)/15. \quad (4.39)$$

Підставляючи в формулу (4.39) час  $\tau = 30$  хв, отримаємо довжину зони горіння рівною  $\Delta x_2 = 10$  м.

На рисунку 4.8. представлена крива зміни концентрації кисню за часом в зоні горіння у відповідності з вибраними вихідними даними.

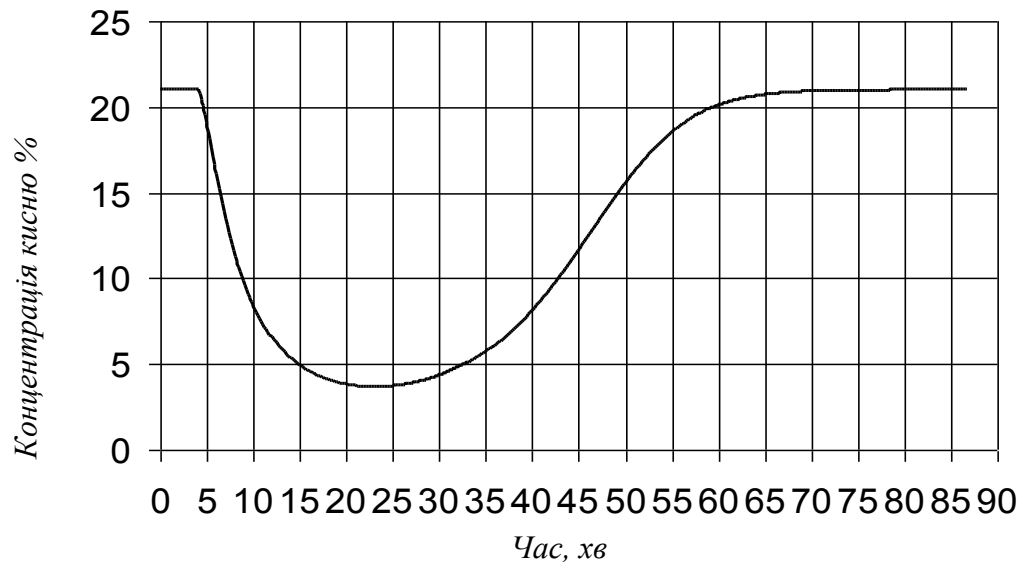


Рисунок 4.8 – Динаміка зміни концентрації кисню в зоні горіння довжиною 10 м при швидкості повітря 1 м/с

Як видно (рисунок 4.8), концентрація кисню в цьому випадку зменшується до п'яти процентів, що також відповідає даним [95, 132]. В цей же час в першій зоні перед осередком горіння концентрація кисню не змінюється.

Моделювання гасіння пожежі чисельним методом проводилось шляхом подавання протягом певного часу інертного газу з наступною рециркуляцією продуктів згорання в замкнутому контурі.

На рисунку 4.9 представлені результати моделювання гасіння пожежі інертним газом протягом 10 хв без наступної рециркуляції.

Як видно (рисунок 4.9), подавання інертного газу з концентрацією кисню 4% через 30 хвилин з моменту виникнення пожежі привело до різкого зниження температури з 800 °С до 300 °С за 10 хвилин. Припинення подавання інертного газу привело до подальшого горіння та різкого збільшення температури до 500 °С. Порівняння даних, представлених на рисунку 4.7 та рисунку 4.9 показують, що зниження температури в зоні горіння до 200 °С при подаванні інертного газу проходить всього на 10 хвилин швидше, що говорить про малу ефективність гасіння пожежі за короткий час.

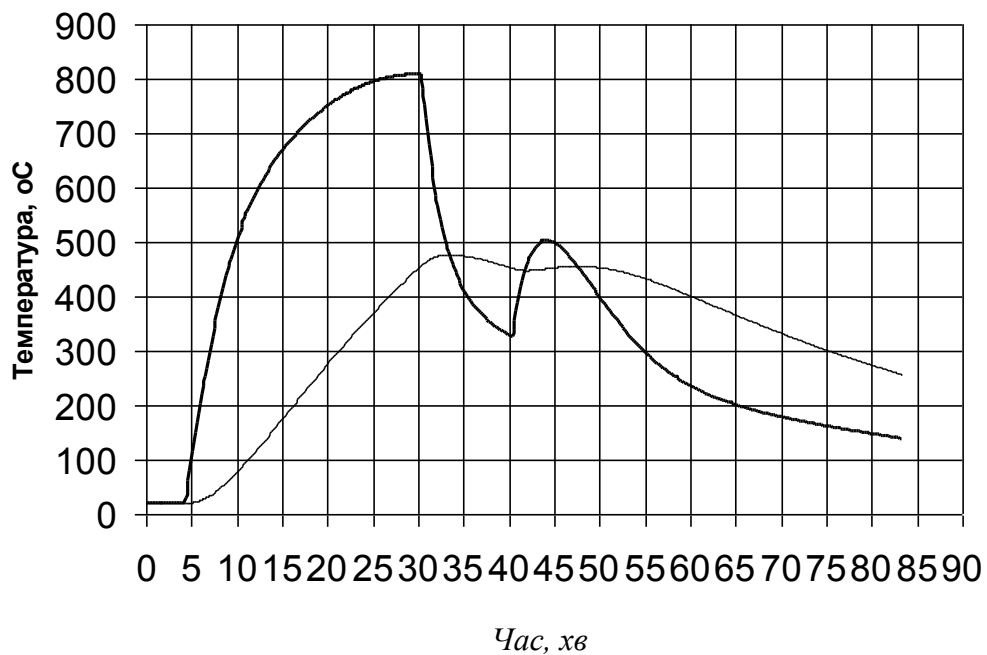


Рисунок 4.9 – Динаміка зміни температури в зоні горіння (товста лінія) і на стінках каналу (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом

На рисунку 4.10 представлені результати моделювання динаміки зміни концентрації кисню при подаванні інертного газу.

Як видно (рисунок 4.10), при подаванні інертного газу концентрація кисню і перед зоною горіння і в зоні горіння різко знижується, а потім швидко поновлюється, що також говорить про низьку ефективність гасіння пожежі за короткий період.

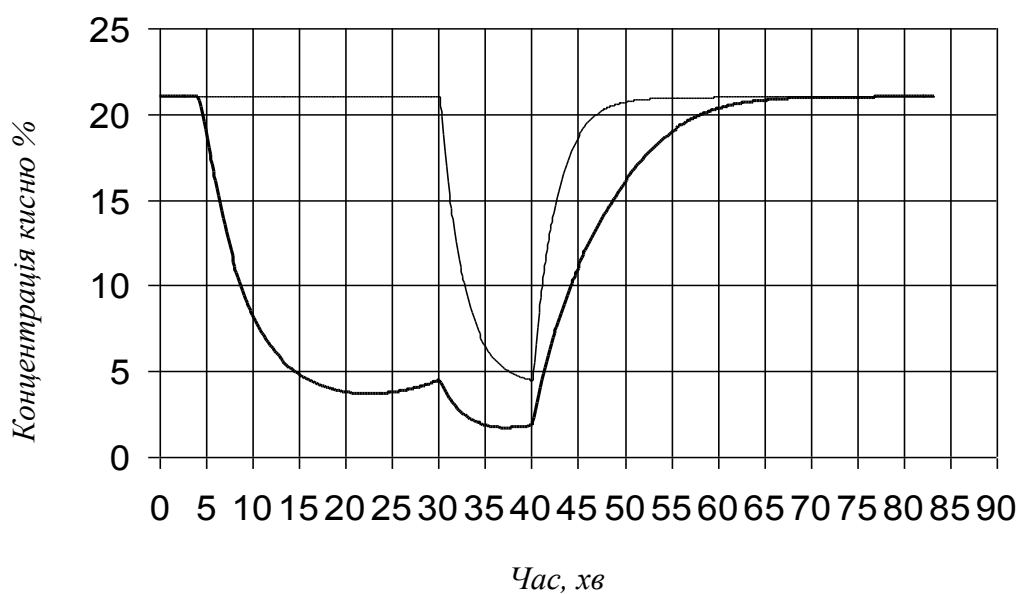


Рисунок 4.10 – Динаміка зміни концентрації кисню в зоні горіння (товста лінія) та перед нею (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом

На рисунку 4.11 представлені результати моделювання гасіння пожежі інертним газом з наступною рециркуляцією продуктів горіння.

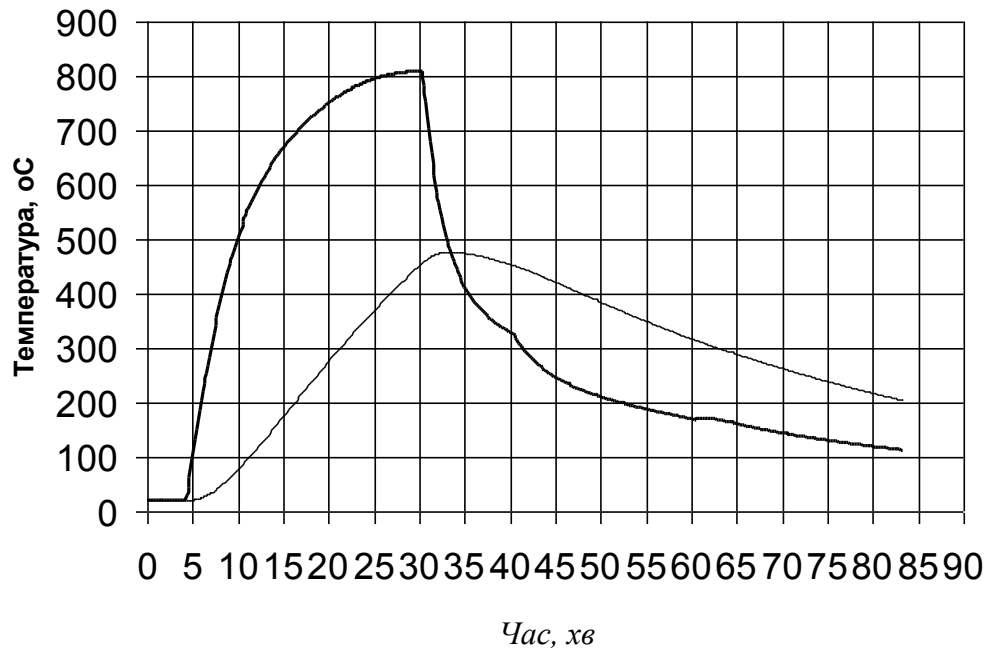


Рисунок 4.11 – Динаміка зміни температури в зоні горіння (товста лінія) і на стінках каналу (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом з наступною рециркуляцією продуктів згоряння

Як видно (4.11), наступна рециркуляція продуктів згоряння протягом 20 хвилин після подавання інертного газу протягом 10 хвилин привела до суттєвого зниження температури та вже на 80-й хвилині з моменту виникнення пожежі температура в зоні горіння знизилась до 100 °С. В той же час охолодження стінок каналу, згідно з даними (рисунок 4.7 та рисунок 4.11), майже не залежить від режиму гасіння пожежі. Так, температура на стінці каналу знизилась на 80-й хвилині з 300 °С всього до 200 °С.

На рисунку 4.12 представлені криві зміни за часом концентрацій кисню, як перед зоною горіння, так і в ній при подаванні інертного газу з наступною їх рециркуляцією.

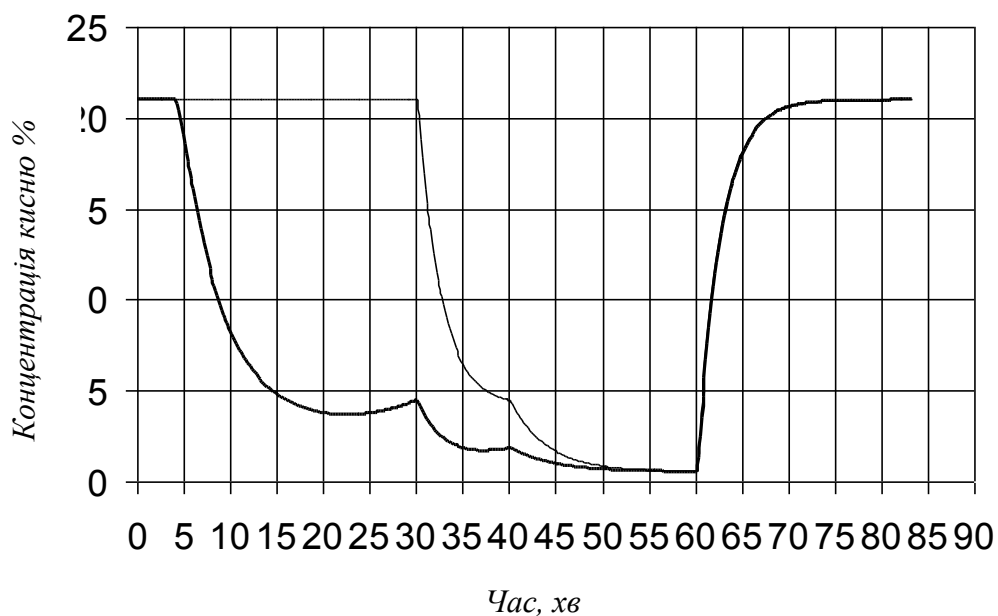


Рисунок 4.12 – Динаміка зміни концентрації кисню в зоні горіння (товста лінія) і перед нею (тонка лінія) при гасінні пожежі інертним газом з наступною її рециркуляцією

Як видно (рисунок 4.12), додаткова рециркуляція продуктів згорання протягом 20 хвилин привела до ще більшого зниження концентрації кисню, як в зоні горіння, так і перед нею, що зумовило значний вплив на ефективність гасіння пожежі.

Таким чином, чисельне моделювання гасіння пожежі інертними газами з наступною її рециркуляцією дає можливість науково обґрунтувати параметри ефективного гасіння.

#### 4.4. Результати експериментальних досліджень гасіння пожежі в модельній вогневій споруді та перевірка їх на адекватність

З метою встановлення ефективності гасіння пожеж в кабельних тунелях інертними газами проведено попередні дослідження в лабораторних умовах без впливу на зону горіння будь-яких засобів.

Для проведення досліду в цих умовах було використано 16 кг горючої ізоляції з металевими провідниками. Підпалювання проходило протягом 4 хв, при робочій припливній вентиляції. На рисунках 4.13-4.15 представлені результати зміни за часом температури та концентрації кисню в зоні горіння кабельного тунелю при витратах повітря 1,5-2 м<sup>3</sup>/хв без подавання інертного газу.

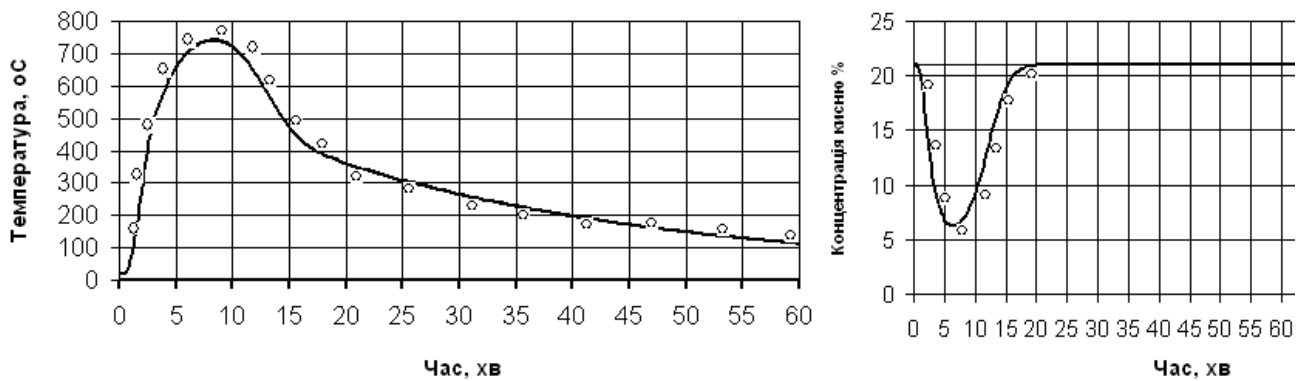


Рисунок 4.13 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при витраті повітря 1,5 м<sup>3</sup>/хв (маркерами позначено експериментальні дані, суцільна лінія – дані розрахунку)

Розрахунки проводились за формулами (4.29) у всіх випадках при числі Куранта  $Cu = 1$ ;  $\bar{q}_0 = 8$   $\bar{\gamma}_2 = 0$ ;  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 2$  м;  $\tau_0 = 0 - 4$  хв.

Як видно (рисунок 4.13), при витраті повітря 1,5 м<sup>3</sup>/хв задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003$  1/с;  $\bar{\gamma}_1 = 2,3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,014$ ;  $\delta = 0,12$ .

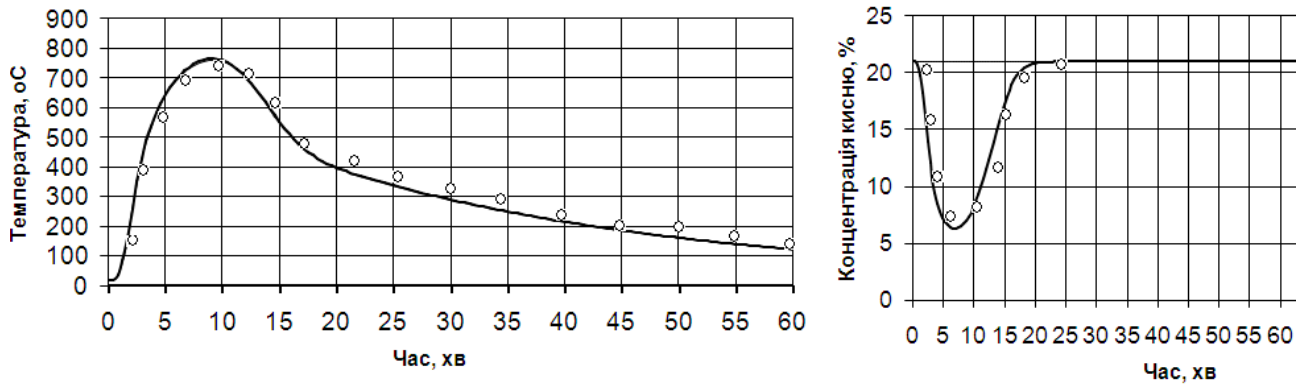


Рисунок 4.14 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при витраті повітря  $1,75 \text{ м}^3/\text{хв}$  (маркерами позначено експериментальні дані, суцільна лінія – дані розрахунку)

Як видно (4.14), при витраті повітря  $1,75 \text{ м}^3/\text{хв}$  задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003 \text{ 1/с}$ ;  $\bar{\gamma}_1 = 2$ ;  $\bar{\alpha} = 0,014$ ;  $\delta = 0,12$ .

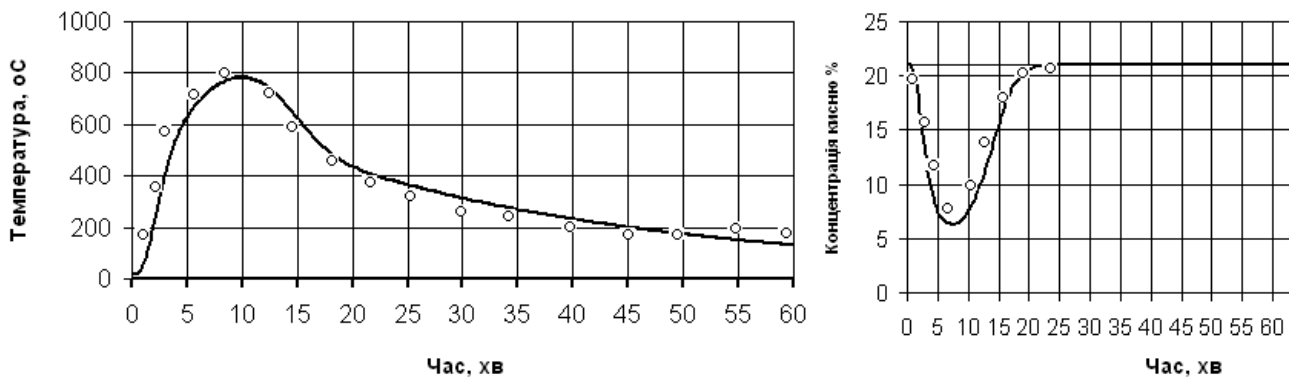


Рисунок 4.15 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при витраті повітря  $2 \text{ м}^3/\text{хв}$  (маркерами позначено експериментальні дані, суцільна лінія – дані розрахунку)

Задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних (рисунок 4.15) досягнуто при  $k = 0,002 \text{ 1/с}$ ;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,014$ ;  $\delta = 0,11$ .

Із аналізу отриманих розрахункових та експериментальних даних випливає, що на початку розвитку горіння температура швидко зростає завдяки достатній кількості кисню в камері. При цьому максимальна температура в



камері досягала 750-800 °С на 8-10 хв вільного горіння, після чого температура знижується до 200 °С через 40-45 хвилин з моменту вільного горіння.

Встановлено, що зі зменшенням доступу повітря до зони горіння скорочується процес затухання, і режим горіння поступово переходить в режим тління, що і слід було очікувати. Таку картину можна спостерігати, аналізуючи дані, представлені на рисунках 4.13-4.15.

Концентрація кисню в даному експерименті знизилася навіть до 6 %.

Наступна серія досліджень в камері була проведена при гасіння пожежі вуглекислим газом та азотом.

Розрахунки проводились за формулами (4.29) у всіх випадках при числі Куранта  $Cu = 1$ ;  $\bar{q}_0 = 8$   $\bar{\gamma}_2 = 0$ ;  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 2$  м;  $\tau_0 = 0-4$  хв.

На рисунках 4.16 – 4.19 відображені результати змін за часом температури продуктів згоряння та концентрації кисню в кабельному тунелі при подаванні азоту або вуглекислого газу з рециркуляцією та без рециркуляції.

На рисунку 4.16 представлені розрахункові та експериментальні дані гасіння дрібномасштабної пожежі азотом без рециркуляції при горінні кабелів.

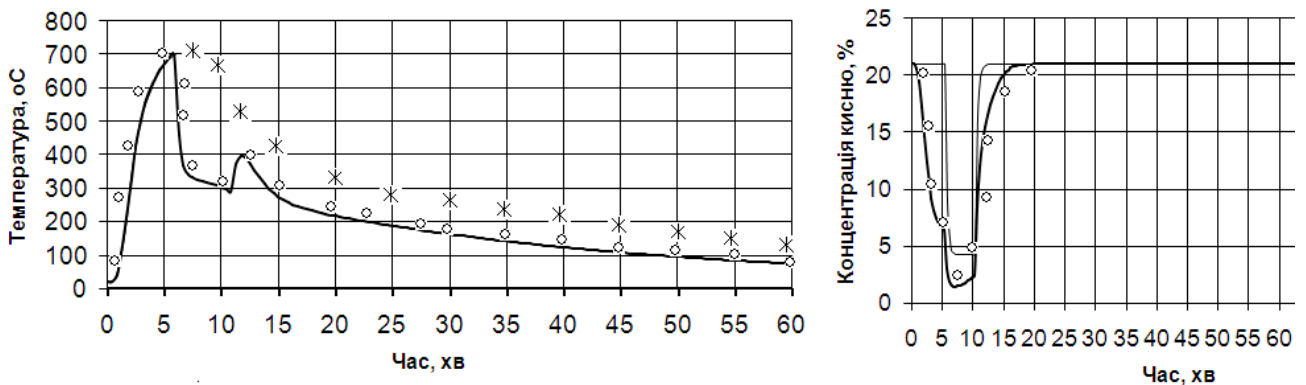


Рисунок 4.16 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при подаванні азоту без рециркуляції (маркерами позначено експериментальні дані (ж – без та о – при подаванні азоту), суцільна лінія – дані розрахунку)

Азот подавався в камеру 5 хв. з моменту виникнення пожежі. Подавання азоту з витратою  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$  привело до зниження концентрації кисню в камері до 5 % та в зоні горіння до 2,5 %.

Припинення подавання азоту на 10 хвилині викликало (рисунок 4.16) підвищення температури, після чого вона продовжувала знижуватися.

Як видно (рисунок 4.16, при подаванні азоту протягом 5 хв без рециркуляції) задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003 \text{ 1/с}$ ;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,015$ ;  $\delta = 0,1$ .

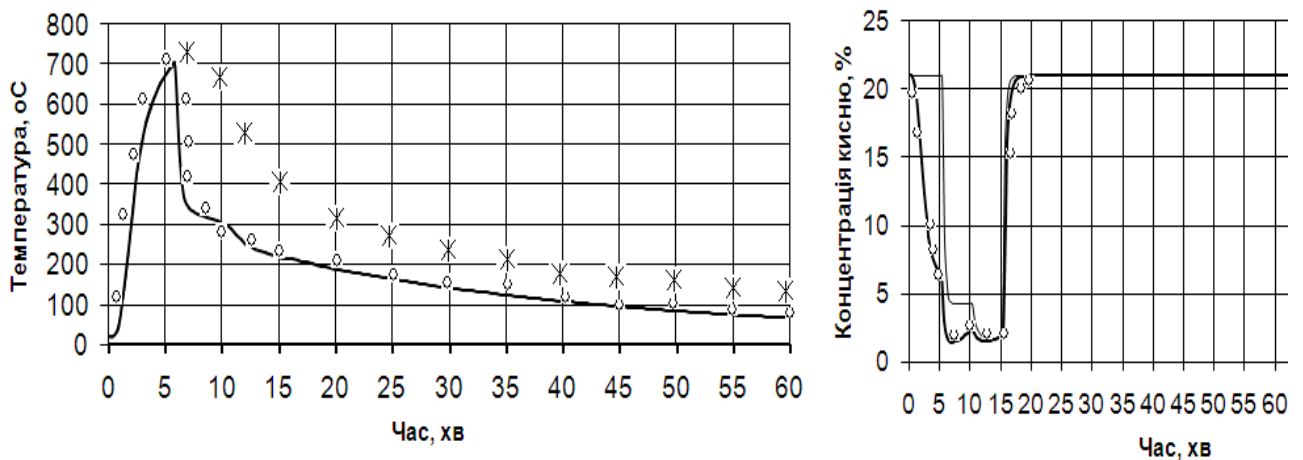


Рисунок 4.17 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при подаванні азоту з наступною рециркуляцією (маркерами позначено експериментальні дані (ж – без та о – при подаванні азоту), суцільна лінія – дані розрахунку)

Азот подавався в камеру 5 хв з моменту виникнення пожежі, після чого була включена рециркуляція продуктів згоряння протягом 5 хвилин. Подавання азоту з витратою  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$  привело до зниження концентрації кисню в камері до 5 % та в зоні горіння до 2,5 %.

Зупинення подавання азоту на 10 хвилині не викликало (рисунок 4.17) зміни температури, як до цього, що пояснюється впливом рециркуляції продуктів згоряння.

Як видно (рисунок 4.17 при подаванні азоту протягом 5 хв з наступною рециркуляцією) задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003$  1/с;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,015$ ;  $\delta = 0,1$ .

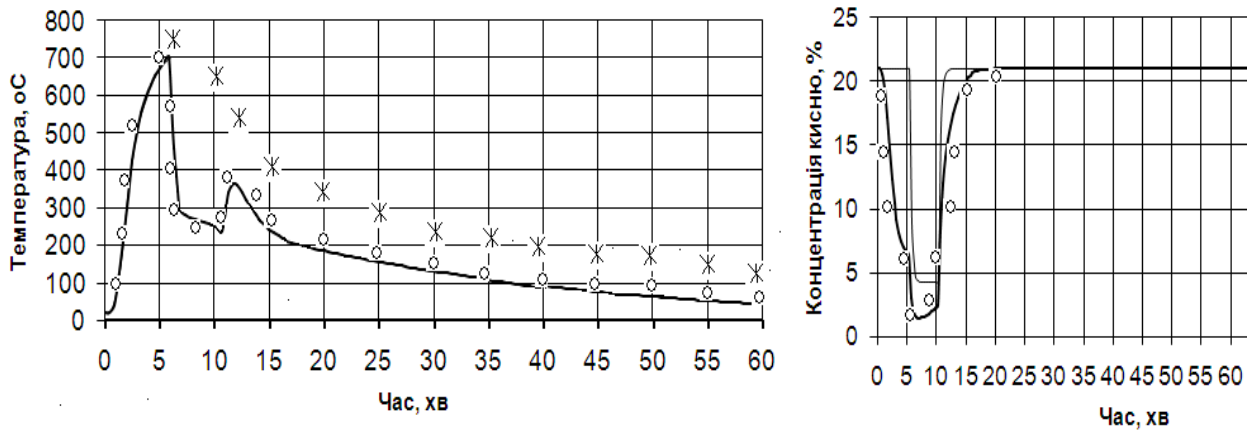


Рисунок 4.18 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при подаванні діоксиду вуглецю без рециркуляції (маркерами позначено експериментальні дані (ж – без та о – при подаванні діоксиду вуглецю), суцільна лінія – дані розрахунку)

Вуглекислий газ подавався в камеру 5 хв з моменту виникнення пожежі без рециркуляції продуктів згоряння. Подавання вуглекислого газу з витратою  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$  привело до зниження концентрації кисню в камері до 4,5 % та в зоні горіння до 2,2 %.

Припинення подавання  $\text{CO}_2$  на 10 хвилині викликало (рисунок 4.18) підвищення температури, після чого вона продовжувала знижуватися.

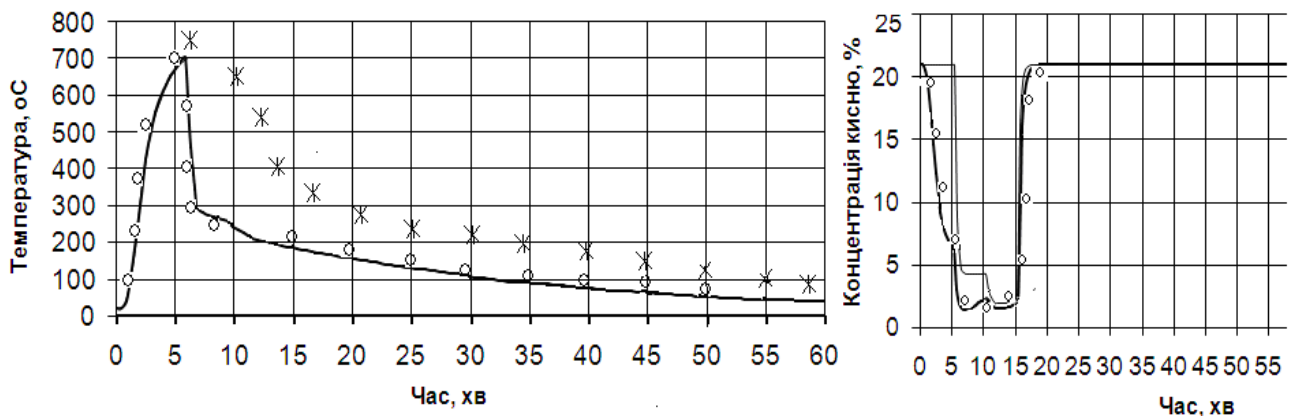


Рисунок 4.19 – Динаміка зміни температури та концентрації кисню дрібномасштабної пожежі при подаванні діоксиду вуглецю з наступною

рециркуляцією (маркерами позначено експериментальні дані (ж – без та о – при подаванні діоксиду вуглецю), суцільна лінія – дані розрахунку)

Вуглекислий газ подавався в камеру 5 хв з моменту виникнення пожежі, після чого була включена рециркуляція продуктів згоряння протягом 5 хвилин. Подавання вуглекислого газу з витратою  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$  привело до зниження концентрації кисню в камері до 4,5 % та в зоні горіння до 2,5 %.

Зупинення подавання  $\text{CO}_2$  на 10 хвилині не викликало (рисунок 4.19) зміни температури, як до цього, що пояснюється впливом рециркуляції продуктів згоряння.

Як видно (рисунок 4.18 та 4.19), при подаванні вуглекислого газу протягом 5 хв задовільне узгодження розрахункових та експериментальних даних досягнуто при  $k = 0,003 \text{ 1/с}$ ;  $\bar{\gamma}_1 = 3$ ;  $\bar{\alpha} = 0,015$ ;  $\delta = 0,1$ .

Аналіз даних з гасіння пожежі в камері показує, що безпосереднє подавання азоту або вуглекислого газу в зону горіння приводить приблизно до однакового результату: температура до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  знижується за 25 хвилин замість 35 хвилин з початку горіння без подавання інертного газу.

Встановлено, що додаткова наступна рециркуляція у цих випадках приводить до зниження температурних режимів загалом на 17 %, та скорочення часу гасіння пожежі на 16 %.

Додаткова рециркуляція зменшила час гасіння пожежі на 7 хвилин (рис. 4.17 та рис.4.19). Різницю у ефективності впливів на зону горіння діоксиду вуглецю та азоту можна виявити лише при збільшенні дальності їх подавання. В цьому випадку із збільшенням дальності подавання інертних розріджувачів все менша концентрація діоксиду вуглецю або азоту буде поступати до зони горіння.

Для встановлення достовірності розрахункових даних не тільки дрібномасштабних, але і великомасштабних пожеж використані відомі експериментальні дані [95], отримані при горінні деревини на довжині 25 м в штольні довжиною 180 м і площею поперечного перерізу  $4 \text{ м}^2$ , що відповідає параметрам кабельного тунелю.

Отримані результати з розбіжністю не більше 15 % підтверджують адекватність розробленої математичної моделі (рисунки 4.16–4.19) та дозволяють обґрунтувати параметри гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією.

#### **4.5. Висновки**

1. Розроблена зональна модель розвитку та гасіння пожеж з розбиттям на дві зони: зона горіння та зона перед нею, що спрощує задачу та дає змогу розглядати процеси тепломасообміну тільки за часом в кожній зоні.

2. Запропоновано чисельний метод рішення в наявному вигляді системи рівнянь динаміки зміни температури та концентрації кисню.

3. Виконано математичне моделювання розвитку та гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією в зоні горіння та перед нею. Показано, що істотне зниження температури в зоні горіння при подаванні інертних газів незначно позначається на температурі стінок каналу, що затримує процес гасіння.

4. Виконані експериментальні дослідження розвитку та гасіння пожежі азотом і вуглекислим газом дрібномасштабних пожеж в камері з геометричним критерієм подібності 1:4. Використані відомі експериментальні дослідження пожеж в натурних умовах для порівняння з дрібномасштабними пожежами.

5. Встановлена адекватність математичної моделі натурним об'єктам, як дрібномасштабних, так і великомасштабних пожеж при їх гасінні інертними газами з подальшою рециркуляцією продуктів горіння, розбіжність між якими не перевищує 15 %.

## РОЗДІЛ 5

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ІНЕРТНИМИ ГАЗАМИ З НАСТУПНОЮ ЇХ РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ

#### **5.1. Область застосування і тактико-технічні можливості впливу на зону горіння інертними газами**

Область застосування – ізольовані та напівізольовані об'єкти великої протяжності: кабельні тунелі, коридори та відсіки будівель різноманітного призначення, підземні горизонтальні або похилі до 10 градусів гірничі виробки та подібні аналогічні об'єкти під час виникнення та гасіння пожеж.

Аварійний об'єкт для ефективного гасіння пожежі повинен мати площу поперечного перерізу каналу не більше 10-15 м<sup>2</sup>. Протяжність об'єкта може бути різною та ефективність гасіння пожеж визначається відстанню зі сторони свіжого струменя повітря до зони горіння.

В кабельних тунелях, які розділені на відсіки перемичками, останні автоматично або вручну зачиняються при виникненні пожежі.

Кінець всмоктуючого трубопроводу розміщується в верхній частині каналу за перемичкою, там де температура продуктів згорання, що спрямовані назустріч свіжому струменю повітря, знаходиться в межах 50-150 °С. Виконання цих заходів сприяє організації надійної рециркуляції продуктів згорання у випадку її застосування перед подаванням та після подавання інертного газу. Рециркульовані продукти згорання подаються за допомогою всмоктуючого вентилятора в отвір перемички.

Вплив на зону горіння в цьому випадку пояснюється тим, що з однієї сторони продукти згорання, що відбираються з ізольованої ділянки, повертаються по трубопроводах в осередок горіння. Ефективність застосування інертного газу з наступною їх рециркуляцією в основному визначається двома параметрами: відстанню до зони горіння та відстанню, починаючи з якої можливо провести захоплення продуктів горіння та подати їх до зони горіння.

Схема організації впливу інертних газів на зону горіння в ізолюваному об'ємі показана на рисунку 5.1.

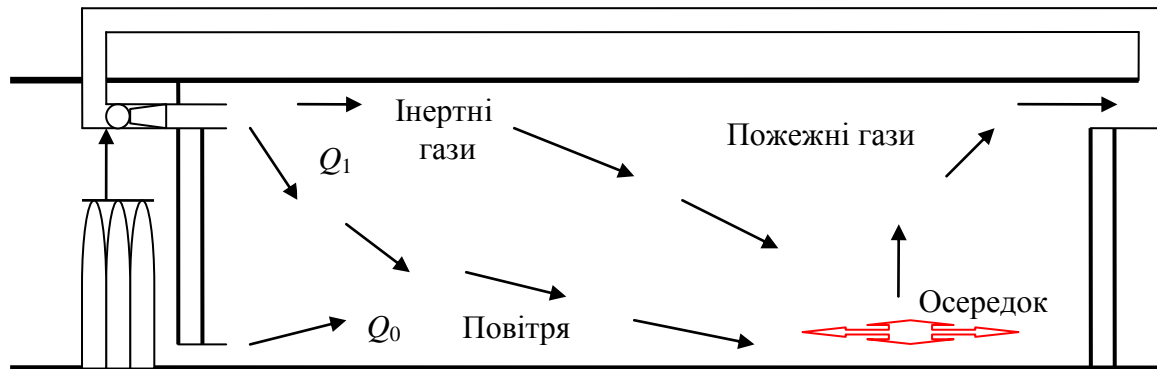


Рисунок 5.1 – Схема організації впливу інертних газів на зону горіння в ізолюваному об'ємі

На рисунку 5.1 видно, що з балонів або з установки мембранного отримання азоту інертні газу подаються в ізолювані відсіки кабельного тунелю та, змішуючись з повітрям, поступають в зону горіння, а продукти згоряння, подаються по трубопроводах знову в ізолюваний відсік.

Інтенсивність та тривалість подавання інертного газу, а також час рециркуляції продуктів згоряння в ізолюваному каналі визначаються розрахунковим шляхом та подальшим вивченням результатів гасіння пожежі.

Витік повітря через ізолюваний об'єм необхідно зменшувати до 10-20 % від загальної витрати суміші газів. Необхідна дальність подавання інертного газу з урахуванням його поглинання стінками каналу, його концентрація та концентрація кисню в зоні горіння, а також тривалість гасіння пожежі до температури 100 °С та інші параметри повинні визначатися розрахунковим шляхом.

## 5.2. Методика розрахунку параметрів гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією

Ця методика розроблена на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень в лабораторних та полігонних умовах динаміки зміни концентрацій інертних газів при їх поглинанні стінками каналу та ефективності впливу на осередок горіння азотом та діоксидом вуглецю з наступною рециркуляцією продуктів згоряння.

До проведення розрахунку представляємо, що вибраний завчасно інертний газ – азот або діоксид вуглецю, задано його витрату, а витрату іншого інертного газу приймаємо рівним нулю.

Далі представляємо, що попередньо, хоча б приблизно, відомі витоки повітря та приймається їх витрата через ізольований об'єм з його геометричними параметрами (довжиною відсіку кабельного тунелю, відстанню від місця подавання інертного газу до зони горіння та його загальною довжиною).

Метою розрахунку є визначення:

- коефіцієнта поглинання вибраного інертного газу залежно від відстані до зони горіння;
- очікуваної концентрації кисню в зоні горіння;
- температури в зоні горіння без застосування інертних газів;
- очікуваної температури в зоні горіння при заданому часі його гасіння;
- часу гасіння пожежі до температури 100 °С з наступною рециркуляцією продуктів згоряння.

Вихідні дані для розрахунку:

$Q_0$  – витрата повітря в суміші газів, м<sup>3</sup>/хв.;

$Q_1$  – витрата азоту (за відсутності подавання приймається рівною 0), м<sup>3</sup>/хв.;

$Q_2$  – витрата діоксиду вуглецю (за відсутності подавання приймається рівною 0), м<sup>3</sup>/хв.;

$L$  – довжина відсіку кабельного тунелю, м;



$S$  – площа поперечного перерізу каналу,  $\text{м}^2$ ;

$v_0$  – швидкість горіння, приймається рівною  $0,78 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ;

$q$  – пожежне навантаження для кабелю, еквівалентне деревині і приймається рівним  $35 \text{ кг}/\text{м}^2$ ;

$\tau_i$  – час з початку і до завершення впливу на зону горіння інертними газами та рециркуляцією ( $i = 1$  – початок подавання інертного газу,  $i = 2$  – завершення подавання інертного газу,  $3$  – завершення рециркуляції), хв.

#### Порядок розрахунку

1. Знаходимо концентрацію кисню (%) в місці подавання інертного газу

$$C_1 = \frac{21Q_0}{Q_0 + Q_1 + Q_2}. \quad (5.1)$$

2. Визначаємо коефіцієнт поглинання інертного газу (азоту або діоксиду вуглецю) по шляху його руху до зони горіння

$$\bar{\gamma}_2 = 1,5 \cdot 10^{-4} L \left( \frac{Q_1}{Q_1 + Q_0} + 2 \frac{Q_2}{Q_2 + Q_0} \right) \quad (5.2)$$

3. Знаходимо очікувану концентрацію кисню (%) в зоні горіння

$$C = \bar{\gamma}_2 C_1. \quad (5.3)$$

Якщо очікувана концентрація кисню  $C > 10 \%$ , то необхідно або зменшити виток повітря  $Q_0$ , або зменшити відстань  $x_0$  від місця подавання до зони горіння.

4. Визначаємо з урахуванням теплової конвекції швидкість руху (м/с) суміші газів, що потрапляють в осередок горіння за формулою

$$u = 0,05 + \frac{Q_0 + Q_1 + Q_2}{60S}. \quad (5.4)$$

5. Знаходимо довжину (м) зони горіння за формулою

$$l = 0,5uq/\nu_0. \quad (5.5)$$

6. Визначаємо коефіцієнт (1/с) швидкості розвитку пожежі

$$k = 0,006/l. \quad (5.6)$$

7. Знаходимо крок за часом (с) при чисельному розрахунку за програмним забезпеченням ПК

$$\Delta\tau = l/u. \quad (5.7)$$

8. Знаходимо номери вузлів, що відповідають часу початку ( $n_1$ ) та завершення ( $n_2$ ) гасіння пожежі інертним газом, а також часу завершення ( $n_3$ ) рециркуляції продуктів згоряння за формулою

$$n_i = \tau_i / \Delta\tau. \quad (5.8)$$

9. Визначаємо на кожному новому періоді часу інтенсивність тепловиділення при горінні за формулою

$$\bar{q}^n = \bar{q}_0 kn\Delta\tau \exp(-kn\Delta\tau). \quad (5.9)$$

10. Задаємо на вході в першу зону функцію зміни концентрації інертного газу при його подаванні

$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_1}{|n - n_1|} \right) \left( 1 + \frac{n_2 - n}{|n_2 - n|} \right) \{ (C_1/C_0 - 1) [1 - \exp(-un\Delta\tau)] \}. \quad (5.10)$$

11. Задаємо на вході в першу зону функцію зміни концентрації продуктів згоряння при їх рециркуляції

$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_2}{|n - n_2|} \right) \left( 1 + \frac{n_3 - n}{|n_3 - n|} \right) (\bar{C}^n - 1). \quad (5.11)$$

12. Проводимо на кожному новому періоді часу розрахунок параметрів гасіння пожежі

- концентрації кисню до зони горіння

$$\bar{\zeta}^{n+1} = \frac{\bar{\zeta}^n + \bar{\zeta}_0^{n+1} l / (L - l) + \bar{\gamma}_2}{1 + l / (L - l) + \bar{\gamma}_2}; \quad (5.12)$$

- концентрації кисню в зоні горіння

$$\bar{C}^{n+1} = \frac{\bar{C}^n + \bar{T}^n (\bar{\zeta}^{n+1} + \bar{\gamma}_2)}{1 + \bar{T}^n (1 + \bar{\gamma}_2 + 0,1 \bar{q}^n)}; \quad (5.13)$$

- температури в зоні горіння

$$\bar{T}^{n+1} = \bar{T}^n \frac{2 + 3\bar{\theta}^n + \bar{q}^n \bar{C}^n}{1 + 3\bar{T}^n}; \quad (5.14)$$

- температури стінок каналу

$$\bar{\theta}^{n+1} = \frac{\bar{\theta}^n + 0,015 \bar{T}^n}{1,015}. \quad (5.15)$$

Для оперативних розрахунків усіх параметрів, а також часу гасіння пожежі розроблено програмний метод розрахунку.

### **5.3. Програмний розрахунок параметрів гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією**

Розрахунок параметрів гасіння пожежі (концентрацій кисню та температури, як в зоні горіння, так і перед нею інертними газами з наступною їх рециркуляцією) виконується в Excel з використанням усіх вихідних даних та отриманих аналітичних залежностей, представлених в розробленій методиці. Покрокове представлення параметрів гасіння пожеж дає можливість наочно в графічному вигляді прослідкувати, як змінюється з часом обстановка в районі гасіння пожежі.

На рисунку 5.2 представлена блок-схема розрахунку параметрів гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією.

З рисунка 5.2 видно, що попередньо задаються вихідні параметри, пізніше – початкові умови для термо-газодинамічних параметрів як в зоні горіння, так і перед нею. Після цього виконується покроковий розрахунок інтенсивності горіння і концентрації кисню на вході в тунель при подаванні інертного газу та при наступній рециркуляції. Подальший покроковий розрахунок температури і концентрації кисню відбувається як в зоні горіння, так і перед нею упродовж не менше двох годин з моменту виникнення горіння. Результати розрахунку температури в зоні горіння представлені в наочному графічному вигляді як без застосування засобів пожежогасіння, так і при подаванні інертного газу з наступною їх рециркуляцією.

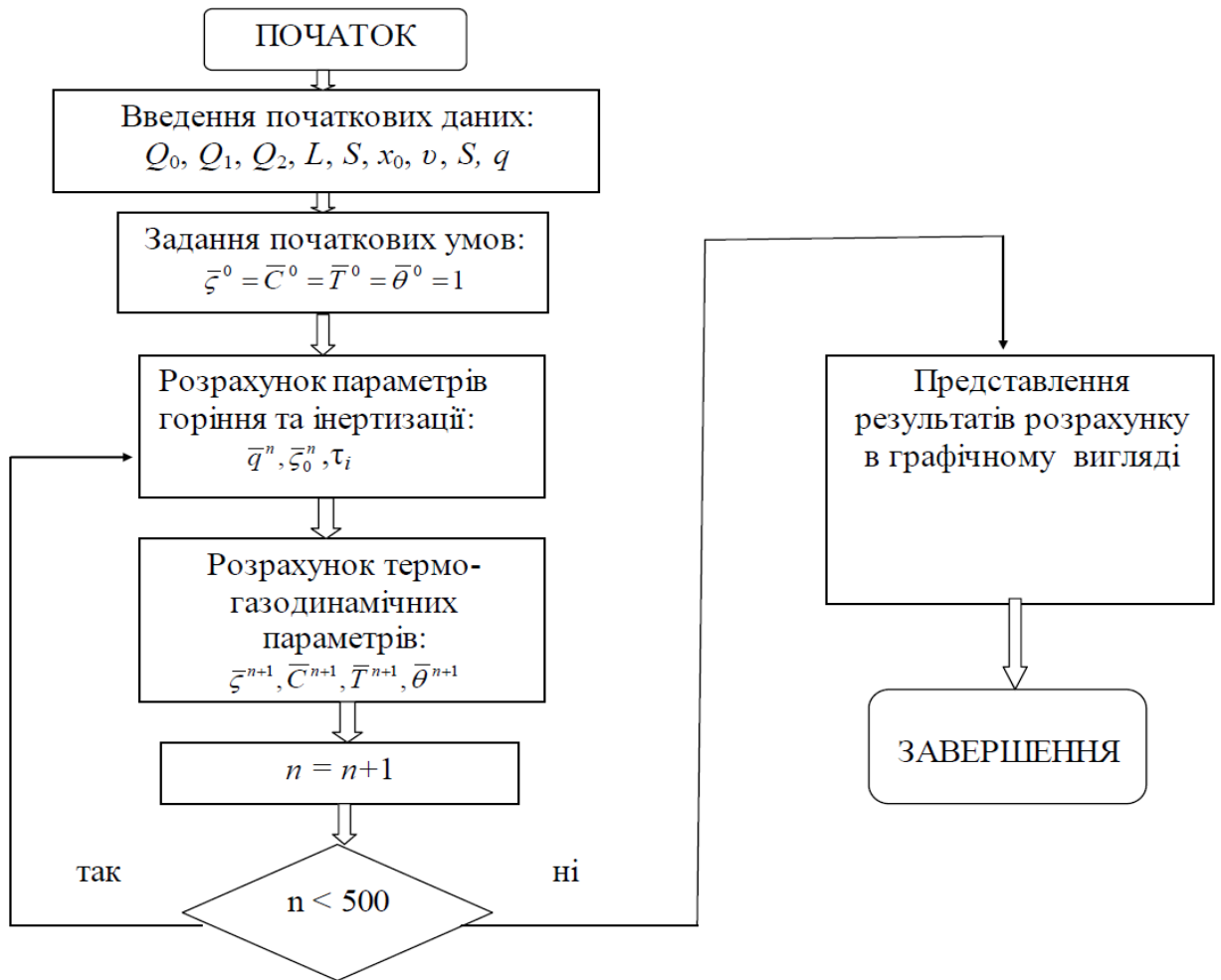


Рисунок 5.2 – Блок-схема розрахунку параметрів гасіння пожежі інертними газами з наступною їх рециркуляцією

Як видно з блок-схеми, розрахунок газодинамічних параметрів закінчується при досягненні кількості ітерації  $n = 500$ , що відповідає часу 1 – 2 год і більше з моменту виникнення пожежі. Це залежить від величини розходу газоповітряної суміші, яка потрапляє в зону горіння при швидкості її руху не менше 0,1 м/с.

В результаті розроблених алгоритму та програми розрахунку газодинамічних параметрів горіння та гасіння пожежі у відсіках кабельного тунелю стає можливим спрогнозувати в програмному забезпеченні Excel ефективність застосування того чи іншого інертного газу та визначити, як

тривалість його застосування, так і кількість витратного матеріалу та вибрати інший більш ефективний режим.

В таблиці 5.1 представлені вихідні та похідні дані, а також прийняті вихідні дані для розрахунку його параметрів, параметрів горючого матеріалу та часу з моменту виникнення пожежі для подальших розрахунків за допомогою програмного забезпечення ПК розвитку та гасіння пожежі інертними газами. [132-134]

Таблиця 5.1

Програмний розрахунок гасіння пожежі інертними  
газами з наступною їх рециркуляцією

<b>Вихідні дані:</b>					
$L, \text{ м} =$	150	$S, \text{ м}^2 =$	4		
Витрата повітря, $Q_0, \text{ м}^3/\text{хв} =$	20	Витрата $\text{N}_2$ , $Q_1, \text{ м}^3/\text{хв} =$	200	Витрата $\text{CO}_2$ , $Q_2, \text{ м}^3/\text{хв} =$	0
$t_0(\text{хв}) =$	3	$t_1(\text{хв}) =$	40	$t_2(\text{хв}) =$	50
$t_3(\text{хв}) =$	60				
<b>Похідні дані:</b>					
$u =$	0,97	$x_1(\text{м}) =$	124,87	$l(\text{м}) =$	25,13
$\Delta t(\text{хв}) =$	0,43	$n_0 =$	6,92		
$n_1 =$	92,3	$n_2 =$	115,4	$n_3 =$	138,5
$C_1/C_0 =$	0,090909	$C_1, \% =$	1,91	$\delta =$	0,1
$C_u =$	1	$q_0 =$	8	$k =$	0,000239
$\gamma_1 =$	3	$\gamma_2 =$	0,03	$\alpha =$	0,01

В табл. 5.1 наведено вихідні та похідні дані для конкретного прикладу розрахунку на програмному забезпеченні ПК. Для інших прикладів ці дані будуть відповідати вибраному об'єкту.

Результати розрахунку надаються у зручному графічному вигляді з представленням кривих змін за часом температури в зоні горіння як без застосування, так із застосуванням вибраного інертного газу з рециркуляцією продуктів згоряння та без неї. Це дозволяє наглядно аналізувати ефективність застосування того чи іншого інертного газу.

Нижче приведено різноманітні приклади розрахунку на програмному забезпеченні гасіння пожежі азотом або діоксидом вуглецю у відсіках кабельного тунелю.

Приклад. Визначити час гасіння пожежі азотом у відсіку кабельного тунелю довжиною  $L = 40$  м та площею поперечного перерізу  $S = 4$  м<sup>2</sup> при таких вихідних даних:  $Q_0 = 1$  м<sup>3</sup>/хв;  $Q_1 = 10$  м<sup>3</sup>/хв;  $Q_2 = 0$ . Подавання азоту продовжується протягом 10 хв., починаючи з  $\tau_1 = 10$  хв, після чого починається рециркуляція продуктів згоряння також протягом 10 хв.

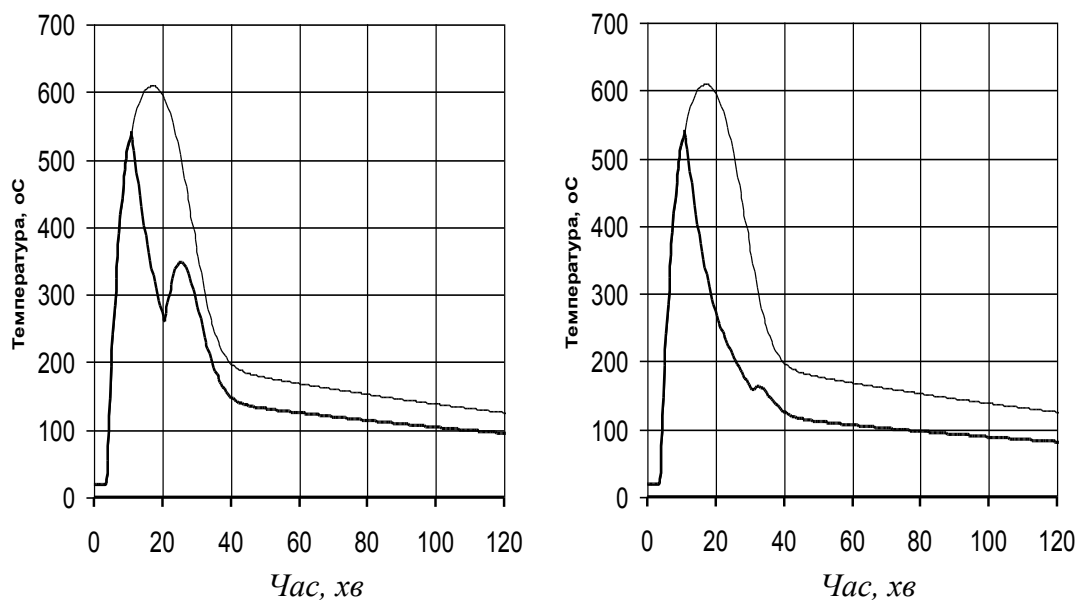


Рисунок 5.3 – Динаміка зміни температури в ізольованому відсіку довжиною 40 м при подаванні азоту (ліворуч) та при його подаванні з наступною рециркуляцією (праворуч, тонка лінія – вільне горіння)

Як видно (рисунок 5.3), подавання азоту протягом 10 хв з витратою 10 м<sup>3</sup>/хв без рециркуляції призводить до зниження температури до 150 °С через 40 хв з моменту виникнення пожежі. Додаткова рециркуляція продуктів згоряння протягом 10 хв дозволяє вже на 30 хв добитися зниження температури до 150 °С.

Подальші розрахунки показали, що якщо застосовується вуглекислий газ з такою ж витратою 10 м<sup>3</sup>/хв, то в цьому випадку отримуємо приблизно такі ж

результати (рисунок 5.4). Відмінністю є те, що в цьому випадку зниження температури до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  досягається дещо пізніше (всього на 2 хв).

Як видно (рисунок 5.3 та рисунок 5.4), без рециркуляції після подавання інертного газу відбувається різке збільшення температури з  $250 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  майже до  $350 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що викликає повторне горіння.

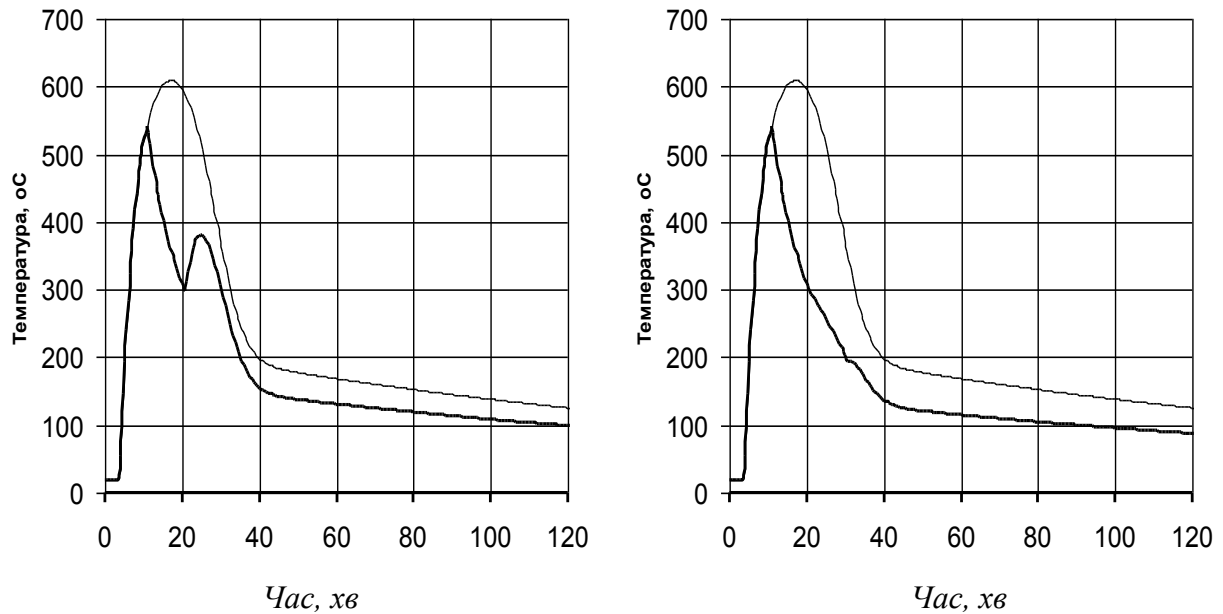


Рисунок 5.4 – Динаміка зміни температури в ізолюваному відсіку довжиною 40 м при вуглекислому газу (ліворуч) та при його подаванні з наступною рециркуляцією (праворуч, тонка лінія – вільне горіння)

Зовсім інша картина (рисунок 5.5 та рисунок 5.6) спостерігається, якщо довжина відсіку збільшується та становить  $L = 150\text{ м}$ .



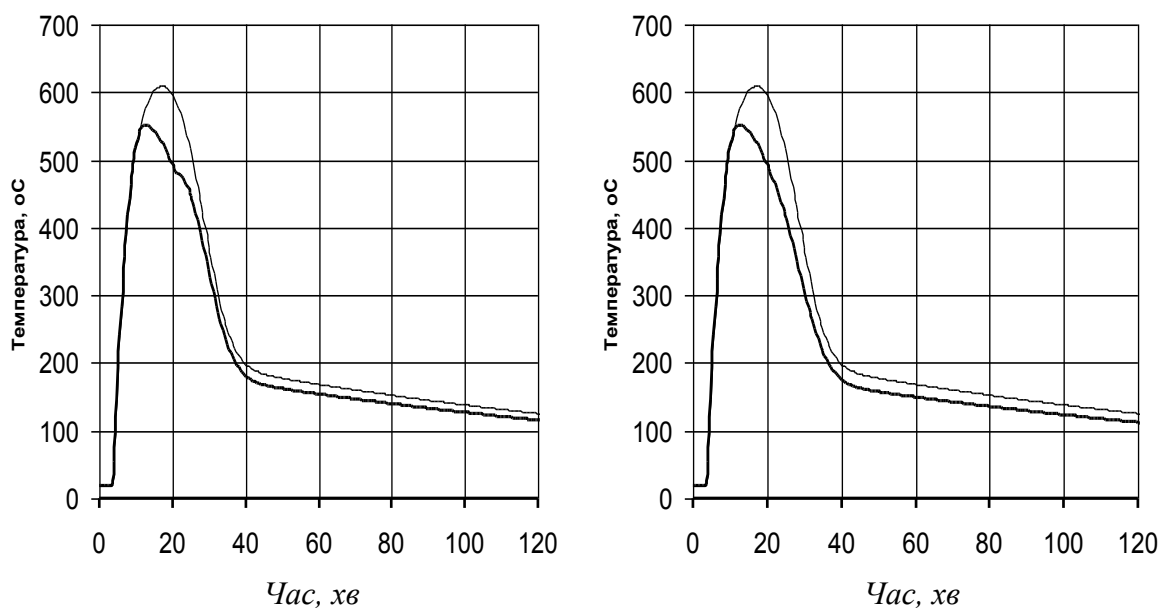


Рисунок 5.5 – Динаміка зміни температури в ізольованому відсіку довжиною 150 м при подаванні азоту (ліворуч) та при його подаванні з наступною рециркуляцією (праворуч, тонка лінія – вільне горіння)

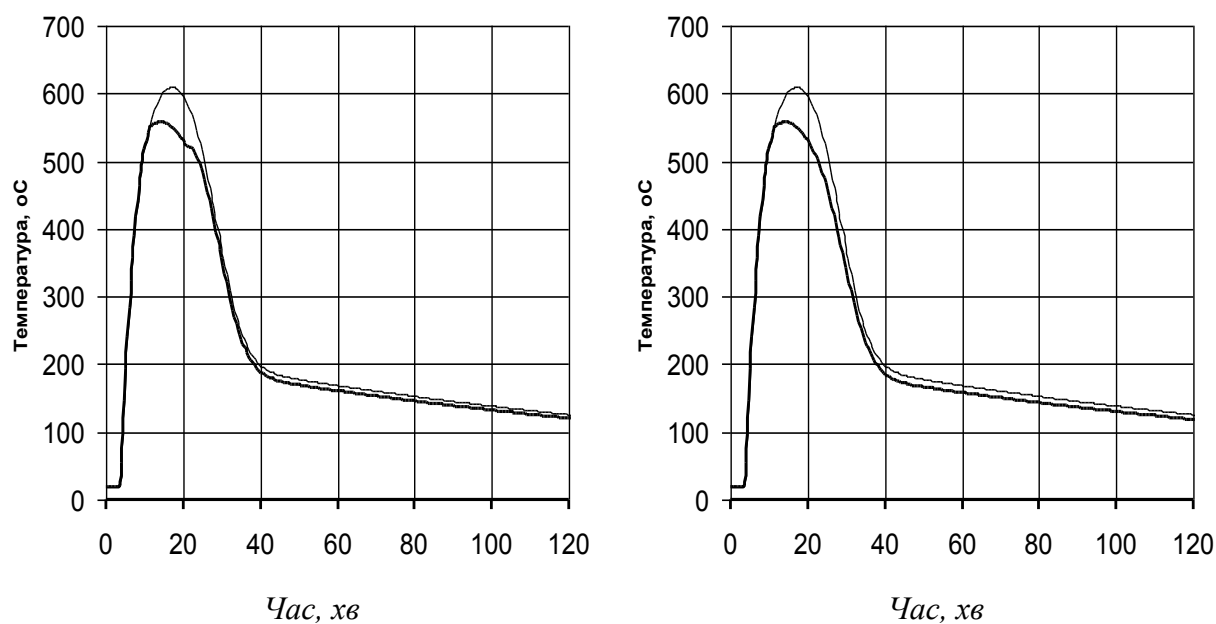


Рисунок 5.6 – Динаміка зміни температури в ізольованому відсіку довжиною 150 м при подаванні діоксиду вуглецю (ліворуч) та при його подаванні з наступною рециркуляцією (праворуч, тонка лінія – вільне горіння)

З результатів розрахунку видно, що якщо подавання азоту на великі відстані призводить до деякого пришвидшення зниження температури (рисунок 5.5), то подавання діоксиду вуглецю на таку саму відстань майже не відображається на динаміці температури навіть з наступною рециркуляцією продуктів згоряння.

Таким чином, розроблений метод та методика комп'ютерного розрахунку гасіння пожежі інертними газами дає змогу наочно спостерігати динаміку зміни температури в зоні горіння без подавання та з подаванням конкретного інертного газу, робити оцінку ефективності гасіння пожежі та вибирати як відстані для подавання інертного газу, так і його витрату, визначати загальну кількість та час інертизації атмосфери ізольованого відсіку тунелю.

#### **5.4. Розрахунок річного економічного ефекту від впровадження технічних засобів, способів та методів гасіння пожеж**

Річний економічний ефект від виробництва і використання нових засобів техніки безпеки довгострокового застосування визначається за формулою (5.16).

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{r1} = [ & [(C_1 + E_n K_1) V_2/V_1 \cdot (P_1 + E_n) / (P_2 + E_n) + [(u_1 - u_2) - \\ & - E_n (K_2^1 - K_1^1)] / (P_2 + E_n) - C_2 + \bar{E} K_2] ] A_2, \end{aligned} \quad (5.16)$$

де  $C_1$ ,  $C_2$  – собівартість одиниці продукції, що випускається, відповідно у базовому і новому варіантах, грн (5000 і 4850);

$K_1$ ,  $K_2$  – питомі капітальні вкладення, необхідні для виготовлення одиниці продукції, що випускається, грн;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт економічної ефективності, рівний 0,15;

$V_2/V_1$  – коефіцієнт врахування зміни продуктивності нового засобу техніки в порівнянні з базовим;

$(P_1 + E_n) / (P_2 + E_n)$  – коефіцієнт врахування зміни терміну служби нового засобу в порівнянні з базовим;

$P_1, P_2$  – частка відрахувань від балансової вартості на повне відновлення відповідно базового і нового варіанта засобів, розраховується як величина, зворотна терміну служби засобів.

$u_1, u_2$  – річні експлуатаційні витрати споживача при використанні одиниці засобів у розрахунку на обсяг робіт, вироблених за допомогою нового засобу (5000 і 2700 грн відповідно);

$k_1^1, k_2^1$  – супутні капітальні вкладення споживача, необхідні для забезпечення нормальної роботи одиниці базового і нового варіантів засобів (без вартості самого засобу), у розрахунку на обсяг робіт, вироблених за допомогою одиниці нового засобу, грн (4200 і 2300);

$A_2$  – річний обсяг випуску в розрахунковому році нових засобів у натуральних одиницях.

Коефіцієнт обліку зміни терміну служби  $(P_1+E_n) / (P_2+E_n) = (1/5+0,15)/(1/8+0,15)$ , питомі капітальні вкладення  $K_1=K_2$ , частка відрахувань від балансової вартості на повне відновлення  $P_1=1/5, P_2=1/8$ , річні експлуатаційні витрати споживача при використанні одиниці засобів  $u_1, u_2$ , що супроводжують капітальні вкладення споживача  $K_1^1, K_2^1$ , річний обсяг випуску в розрахунковому році нових засобів  $A_2 = 200$  одиниць. Нехай  $B_1=B_2$ .

Підставляючи ці дані у формулу (1), отримуємо для одного засобу в рік

$\mathcal{E}_1 = 36864$  грн, а  $\mathcal{E}_{r1} = 7372800$  грн для  $A_2$ .

Річний економічний ефект від виробництва і використання нових засобів пожежогасіння довгострокового застосування, а саме установок газового гасіння азотом становить 7372800 грн.

Наведено техніко-економічне обґрунтування і порохований річний економічний ефект від виробництва і використання нових засобів пожежогасіння довгострокового застосування, який становить 7372800 грн.

## 5.5. Висновки

1. Визначено область застосування і тактико-технічні можливості впливу на осередок горіння азотом або діоксидом вуглецю з наступною рециркуляцією продуктів згоряння в ізолюваних та напівізолюваних об'єктах значної протяжності, таких як кабельні тунелі, коридори, відсіки будівель різноманітного призначення, підземні горизонтальні або похилі до 10 градусів гірничі виробки та подібні аналогічні об'єкти.

2. Розроблено методику розрахунку параметрів гасіння пожеж на основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень в лабораторних та полігонних умовах динаміки зміни концентрацій інертних газів при їх поглинанні стінками каналу, динаміки зміни температури та ефективності впливу на осередок горіння азотом та діоксидом вуглецю з наступною рециркуляцією продуктів згоряння.

3. Застосовано комп'ютерний метод обґрунтування параметрів ефективного гасіння пожежі азотом або діоксидом вуглецю з наступною рециркуляцією продуктів згоряння, що дає змогу в наочному графічному вигляді спостерігати динаміку зміни температури як без подавання, так і з подаванням інертного газу.

4. Встановлено, що подавання інертних газів потрібно здійснювати не далі як за 40 м від зони горіння. Область застосування інертних газів значно розширюється при організації подальшої рециркуляції продуктів згоряння, що дає змогу економно витратити інертний газ.

5. Встановлено, що рециркуляція продуктів згоряння є малоефективною на відстані до зони горіння більше 40 м, оскільки великий об'єм свіжого повітря в ізолюваному об'ємі не дає змоги тривалий час знижувати концентрацію кисню до режиму тління горючого матеріалу.

6. Річний очікуваний економічний ефект від впровадження в практику засобів пожежогасіння, установок газового гасіння азотом буде становити 7372800 грн. Для однієї установки річний економічний ефект становить 36864 грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, яка є завершеною науковою працею, представлено розв'язання актуальної наукової задачі – розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння як наукове підґрунтя підвищення ефективності гасіння пожеж на зазначених об'єктах. При цьому одержано такі наукові та практичні результати:

1. На підставі результатів аналізу пожежної статистики, способів та домінуючих чинників припинення горіння у технологічних об'ємах кабельних тунелів висунуто ідею, що одним із шляхів підвищення ефективності гасіння пожеж об'ємним способом на об'єктах з їх наявністю є дистанційне подавання з обґрунтованими параметрами діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння;

2. За результатами аналізу світових та національних досягнень розроблено методику проведення теоретичних та експериментальних досліджень з розкриття особливостей впливу чинників на процеси припинення горіння в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів у разі подавання діоксиду вуглецю або азоту, а також їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння, яка включає в себе моделювання та проведення обчислювальних експериментів, а також експериментальні дослідження параметрів гасіння пожежі у модельній вогневій споруді;

3. Розроблено математичні моделі заповнення газовими вогнегасними речовинами простору кабельних тунелів; поширювання горіння і розвитку пожежі з урахуванням стиснення та розширення продуктів згоряння; гасіння пожеж діоксидом вуглецю, азотом та їх бінарними сумішами з продуктами згоряння. З їх застосуванням за результатами обчислювальних експериментів встановлено динаміку зміни температури, а також концентрацій компонентів

газового середовища під час розвитку пожеж у технологічних об'ємах кабельних тунелів та їх гасіння;

4. За результатами експериментальних досліджень параметрів гасіння пожежі кабельної продукції у модельній вогневій споруді об'ємом 0,48 м<sup>3</sup> встановлено динаміку зміни температури та концентрацій компонентів газового середовища внаслідок дії діоксиду вуглецю, азоту та їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згорання;

5. Доказано адекватність одержаних результатів теоретичних розрахунків з результатами експериментальних досліджень гасіння макетної пожежі у випробувальній камері, а також з відомими натурними випробуваннями у полігонних умовах, розбіжність між якими не перевищує 15 %. Встановлено, що подавання інертних розріджувачів потрібно здійснювати з відстані не більше 40 м від зони горіння, що дає змогу підтримувати необхідну об'ємну вогнегасну концентрацію протягом певного часу;

6. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що послідовне подавання в технологічній об'єм кабельного тунелю газових вогнегасних речовин – інертних розріджувачів та рециркульованих продуктів згорання, підвищує ефективність гасіння пожежі, що проявляється у скороченні тривалості припинення полуменевого горіння (до 16%), підвищенні швидкості зниження середньооб'ємної температури (до 17%) за однакової витрати зазначених вогнегасних речовин у разі їх роздільного подавання для гасіння та флегматизування газового горючого середовища;

7. Розроблено методику розрахунку параметрів гасіння пожеж в кабельних тунелях газовими вогнегасними речовинами – інертними розріджувачами з наступною рециркуляцією компонентів газового середовища, яка включає в себе алгоритм та відповідне програмне забезпечення, що дає змогу розрахувати очікувану, з урахуванням коефіцієнта поглинання вибраної вогнегасної речовини, 8-відсоткову об'ємну концентрацію кисню в зоні горіння та середньооб'ємну температуру 100 °С, за яких досягається припинення

горіння та неможливість повторного його виникнення в кабельному тунелі довжиною до 200 м та площею поперечного перерізу до 7 м<sup>2</sup>;

8. Розрахунковий річний очікуваний економічний ефект від застосування в практиці гасіння пожеж в кабельних тунелях азотом становить понад 7 млн. грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савоцик А. Н. Взаимосвязь временных характеристик газового пожаротушения / А.Н. Савоцик. – Средства противопожарной защиты : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1993. – С. 94-97.
2. Тубашов Л. К. Натурные огневые испытания установки газового пожаротушения на АЭС «Козлодуй-III» / Л. К. Тубашов, А. Н. Савоцик // Средства противопожарной защиты : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1993. – С. 97-101.
3. Пучков С. И. Способ тушения пожара в кабельном туннеле / С. И. Пучков, А. А. Лебедев // Средства противопожарной защиты : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1993. – С. 49-61.
4. Ильин В. В. Моделирование пожаров в подземных транспортных сооружениях / В. В. Ильин, В. П. Беляцкий // Моделирование пожаров и взрывов. – М. : Пожнаука, 2000. – С. 278-318.
5. Системы пожаротушения в кабельных сооружениях / [Л. И. Белоусов, В. А. Былинкин, Д. Г. Ланин, А. В. Первых, Д. В. Поляков, С. Г. Цариченко] // Пожарная безопасность многофункциональных и высотных зданий и сооружений : матер. 19 науч.-практ. конф. – М. : ВНИИПО, 2005. – Ч. 2. – С. 26-27.
6. Пузач С. В. Математическое моделирование теплообмена при решении задач пожаровзрывобезопасности / С. В. Пузач. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2003. – 150 с.
7. Пузач С. В. Методы расчета теплообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С. В. Пузач. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
8. Осадчий А. В. Технические средства противопожарной защиты кабельных тоннелей и полуэтажей предприятий Минтопэнерго Украины / А. В. Осадчий, А. А. Король, В. Д. Мартыненко // Пути повышения безопасности



горных работ в угольной отрасли : тез. докл. науч.-практ. конф. – Макеевка, МакНИИ, 2004. – С. 374-376.

9. Ковалишин В. В. Математичне моделювання розвитку і гасіння пожеж різними засобами на об'єктах значної протяжності / В. В. Ковалишин. – Київ : Науковий вісник НДІПБ, 2013. – №1 (27). – С. 153-160.

10. Ковалишин В. В. Дослідження процесів генерування піни потоком парогазовою суміші / В. В. Ковалишин, Т. В. Бойко, Н. М. Козяр // Проблеми зниження ризику виникнення надзвичайних ситуацій в Україні : матер. VIII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників. – К. : УкрНДІПБ, 2006. – С. 126-129.

11. Ковалишин В. В. Дослідження гасіння пожежі в кабельному туннелі рециркуляцією продуктів горіння / В. В. Ковалишин, С. Ю. Дмитровський // Проблеми зниження ризику виникнення надзвичайних ситуацій в Україні : матер. VIII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників. – К. : УкрНДІПБ, 2006. – С. 129-132.

12. Горб В. Ю. Исследования процессов заполнения азотом изолированных участков крутого падения / В. Ю. Горб // ВНИИГД «Горноспасательное дело». — М. : Недра, 1971. – Вып. 3. – С. 71 – 74.

13. Горб В. Ю. О влиянии выработанного пространства на динамику заполнения инертным газом изолированного участка при прямом ходе отработки / В. Ю. Горб. // ВНИИГД «Горноспасательное дело». – М. : Недра, 1971. – Вып. 3. – С. 90-93.

14. Присяжнюк Н. Л. Надежность и эффективность функционирования установок пожаротушения кабельных тоннелей / Н. Л. Присяжнюк // Пожарная опасность технологических процессов, зданий, сооружений и профилактика пожаров : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1988. – С. 150-154.

15. Васильев А. Д. Системы автоматического тушения пожаров распыленной водой в кабельных помещениях / А. Д. Васильев // Пожарная техника и тушение пожаров : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1976. – Вып. 13. – С. 70-72.

16. Артюнов С. Н. Устройство для тушения пожаров электроустановок под напряжением / С. Н. Артюнов, А. Е. Сычев, О. А. Коровин // Пожарная техника. Средства и способы пожаротушения : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1992. – С. 178-183.

17. Артюнов С. Н. Организация тушения пожаров электроустановок под напряжением / С. Н. Артюнов, А. Е. Сычев, С. А. Муратов // Теоретические и экспериментальные основы пожаротушения : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1992. – С. 56-63.

18. Оценка эффективности тушения пожаров электрических кабелей распыленной водой / [С. Н. Артюнов, Ю. Р. Журавлев, Я. С. Повзик, В. Е. Макаров] // Организация работ по профилактике и тушению пожаров : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1988. – С. 107-112.

19. Повзик Я. С. Зависимость эффективности тушения электрокабелей тонкораспыленной водой от соотношения интенсивности теплоотвода и тепловыделения / Я. С. Повзик, В. Е. Макаров, Ю. Р. Журавлев // Динамика пожаров и их тушение : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1987. – С. 60-69.

20. Попов А. М. Определение времени достижения опасных факторов пожара при горении кабельных трасс в герметичном помещении / А. М. Попов, В. А. Юдин, И. Н. Никитенко // Вопросы горения и тушения полимерных материалов : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1989. – С. 113-116.

21. Шкоруп А. И. Рекомендации по созданию и применению стационарных автоматических и передвижных установок комбинированного пожаротушения / А. И. Шкоруп // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи : матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників УкрНДПБ. – К., 2005. – С. 283-285.

22. Пашковский П. С. Газообразный азот для профилактики, локализации и тушения подземных пожаров / П. С. Пашковский, С. Г. Филимонов // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи: матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників УкрНДПБ. – К., 2005. – С. 245-248.

23. Визначення умов застосування «мембранного» азоту для флегматизування горючих газових середовищ / [В. М. Жартовський, Ю. В. Цапко, К. І. Соколенко, Д. М. Откідач] // Пожежна безпека : зб. наук. праць ЛПБ, УкрНДПБ МНС України. – Львів, 2004. – № 5. – С. 17-21.

24. Костенко В. К. Удосконалення технології гасіння підземних пожеж у важкодоступних місцях за допомогою мембранних установок / В. К. Костенко, Т. В. Костенко // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи : матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників УкрНДПБ. – К., 2005. – С. 202-204.

25. Системы автоматического пожаротушения объектов повышенной пожарной опасности / [А. В. Осадчий, Н. С. Яковлева, А. А. Король, В. В. Гуржий] // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи : матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників УкрНДПБ. – К., 2005. – С. 121-122.

26. Ковалишин В. В. Підвищення ефективності протипожежного захисту кабельних тунелів / В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, С. Ю. Дмитровський // Техногенна безпека. Теорія, практика, інновації : зб. тез міжнар. наук.-практ. конф. ЛДУБЖД. – Львів, 2008. – С. 138-141.

27. Булгаков Ю. Ф. Тушение пожаров в угольных шахтах / Ю. Ф. Булгаков. – Донецк : НИИГД, 2001. – 280 с.

28. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М. : Мир, 1980. – 616 с.

29. Бот В. Тушение подземных пожаров с применением азота в каменноугольной промышленности ФРГ / В. Бот, Р. Мюллер // Глюкауф. – 1979. – № 19. – С. 11-16.

30. А.с. 299231 СССР, МКИ С 3/00 Установка для получения парогазовой смеси при тушении подземных пожаров / А. М. Апашкин, Г. Г. Соколов / № 134368-14; заявл. 01.07.69; опубл. 26.03.71, Бюл. № 12. – 2 с.

31. А.с. 581306 СССР, МКИ Е 21 5/00 Генератор инертного газа / В. В. Василенко, Л. Д. Вишнеvский / № 2302674/22-03; заявл. 14.12.87; опубл. 25.10.77, Бюл. № 43. – 2 с.

32. Колышенко М. В. Высокопроизводительный генератор инертных газов для тушения пожаров в шахтах / М. В. Колышенко, В. Л. Макаренко // Уголь. – 1979. –№ 11. – С. 50-51.

33. Применение генераторов инертных газов на базе авиационных газотурбинных двигателей как средства пожаротушения/ [П. Л. Мульгинов, М. М. Цховребов, О. М. Байлов, И. В. Земнухов, В. А. Горбатов] // Конверсия в машиностроении. – 2000. –№ 5. – С. 110-115.

34. Лозинський Р. Я. Удосконалення мобільної установки для дистанційного гасіння пожеж парогазовою сумішшю / Р. Я. Лозинський // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи : матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників УкрНДЦПБ. – К., 2005. – С. 228-229.

35. Мамаев В. В. Высокопроизводительная мобильная установка тушения пожаров на объектах повышенной опасности / В. В. Мамаев, Р. Я. Лозинський // Пути повышения безопасности горных работ в угольной отрасли : тез. докл. науч.-практ. конф. – Макеевка : МакНИИ, 2004. – С. 348-350.

36. Тушение подземных пожаров инертной пеной на основе жидкого азота / [А. И. Козлюк, М. А. Яремчук, В. П. Чарков, Г. М. Шецер, В. Г. Богатырев, Э. А. Попов] // Безопасность труда в промышленности. – 1981. – № 3. – С. 8-10.

37. Исследование процессов тушения пожаров в изолированном объеме инертной пеной / [В. П. Чарков, Г. М. Шецер, В. Г. Богатырев, О. Л. Кокотов] // Горение и проблемы тушения пожаров : тез. докл. V Всесоюз. науч.-практ. конф. ВНИИПО. – М., 1977. – С. 159-161.

38. Рыжов А. М. Дифференциальное моделирование динамики пожаров и распространения их опасных факторов в помещениях / А. М. Рыжов. – Пожаровзрывобезопасность. – 1994. –Т. 3. – № 4. – С. 21-34.

39. Пучков С. И. Способ тушения пожаров в кабельном туннеле / С. И. Пучков, А. А. Лебедев // Средства противопожарной защиты : сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1993. – С. 49-61.

40. Пасконов В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. П. Полежаев, Л. А. Чудов. – М. : Наука, 1984. – 288 с.

41. Волков Э. П. Моделирование горения твёрдого топлива / Э. П. Волков, Л. И. Зайчик, В. А. Першуков. – М. : Наука, 1994. – 320 с.

42. Греков С. П. Исследование диффузии углекислого газа в горных выработках при запуске в изолированные пожарные участки / С. П. Греков // ВНИИГД «Горноспасательное дело». – М. : Недра, 1971. – Вып.7. – С. 28-31.

43. Греков С. П. Газодинамика инертных сред и разгазирование горных выработок при авариях / С. П. Греков, А. Е. Калюсский. –М. : Недра, 1975. – 120 с.

44. Греков С. П. Перенос примесей по горным выработкам при наличии нестационарного газообмена между потоком и стенкой выработки / С. П. Греков, А. Е. Калюсский // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1970, № 6. – С. 74-78.

45. Осипов С. Н. Борьба со взрывами газа в горных выработках / С. Н. Осипов. – М. : Недра, 1972. – 160 с.

46. А.с. 863883 СССР, МКИ Е 21 F 5/00. Способ тушения подземных пожаров / Н. В. Бухтий, А. Е. Горбатенко / Заявл. 23.08.79; Опубл. 15.08.91.

47. Рыжов А.М. Моделирование пожаров и пожаротушения в помещениях / А. М. Рыжов // Пожаровзрывобезопасность, №4. – 1995. – С. 87-94.

48. Пат. 23065 Украина, МПК А 62 с 39/00. Спосіб гасіння пожежі в ізольованій ділянці туннелю (в закритому об'ємі) рециркуляцією продуктів

горіння / В. В. Ковалишин, С. Ю. Дмитровський / Заявл. 13.11.2006; Опубл. 10.05.2007.

49. Kukuczka F. Likwidacja pól pożarowych metoda recykulacji = Ліквідація осередків пожежі на ізольованій ділянці методом рециркуляції продуктів згоряння: 6 Międzynar. konf. automat. gorn. – Katowice, 1980. – Ref. m. 4. – S. 93 – 105.

50. Пашковский П. С. Параметры подачи газообразного азота в рециркулирующий поток пожарных газов / П. С. Пашковский, Э. А. Попов, И. А. Шайтан, М. А. Яремчук // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД. – Донецк, 2002. – С. 16-22.

51. Ковалишин В. В. Аналитические исследования тепломассообменных процессов в закрытых объектах большой длины при возникновении пожаров / В. В. Ковалишин, Т. В. Бойко, С. Ю. Дмитровский // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы : сб. тез. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2006. – С. 157-159.

52. Ярембаш И. Ф. Компьютерное моделирование динамики температуры в изолированном выемочном участке шахты при рециркуляции пожарных газов / И. Ф. Ярембаш, И. Н. Зинченко, А. В. Ревякин // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 126-131.

53. Рыжов А. М. Математическое моделирование локальных значений пожаров / А. М. Рыжов, И. Р. Хасанов / Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов народного хозяйства : тез. докл. IX Всесоюз. науч.-практ. конф. Секция: Системные исследования пожаров и проблем пожарной безопасности ВНИИПО. – М., 1988. – С. 28-29.

54. Повзик Я. С. Особенности развития пожаров по кабельным коммуникациям подземных сооружений / Я. С. Повзик, В. Е. Макаров, Ю. Г. Журавлев // Проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов народного хозяйства : тез. докл. IX Всесоюз. науч.-практ. конф. Секция: Проблема пожарной безопасности подземных сооружений ВНИИПО. – М., 1988. – С. 7-8.

55. Навценя Н. В. Некоторые направления повышения эффективности конструкции CO<sub>2</sub> – прицепа / Н. В. Навценя, Н. Е. Грушин, С. Н. Шиховцев. – Средства противопожарной защиты : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1993. – С. 27-31.

56. Пустынников С. С. Исследование огнетушащей эффективности состава 5050 в натуральных условиях / С. С. Пустынников, А. Н. Савошик. – Средства противопожарной защиты : сб. науч. тр. ВНИИПО. – М., 1993. – С. 75-78.

57. Gustafsson N. E. Leichtschaumerzeugung unter Verwendung von Luft aus dem Brandbereich // Получение пены высокой кратности с использованием газов из зоны пожара / N. E. Gustafsson. – Fire International. – 1972. – Vol. 4. – № 38. – S. 18-36.

58. Березина Л. И. Исследование углекислотно-хладоновых составов / Л. И. Березина, А. Н. Савошик // Пожарная техника и средства пожаротушения : сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1991. – С. 85-90.

59. Ясінський М. Ф. Математичне моделювання процесу подавання піни / [М. Ф. Ясінський, А. Д. Кузик, В. М. Юзевич, Л. М. Ясінська, В. В. Ковалишин, О. В. Ковалишин] // Пожежна безпека : зб. наук. праць ЛПБ, УкрНДПБ. – Львів, 2004. – № 5. – С. 52-55.

60. Лозинский Р. Я. Исследование процессов охлаждения и влагонасыщения высокотемпературных газовых струй в ограниченных каналах / Р. Я. Лозинский, И. Н. Зинченко, В. В. Мамаев, В. В. Ковалишин // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2003. – № 2 (8). – С. 22-27.

61. Бойко Т. В. Особливості процесу генерування піни потоком парогазоводяної суміші / Т. В. Бойко // Горноспасательное дело : сб. науч. пр. НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 90-96.

62. Дмитровский С. Ю. Динамика температуры в кабельных туннелях при рециркуляции продуктов горения / С. Ю. Дмитровский, А. В. Ревякин // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 79-83.

63. Жидецкий В. Ц. Основы охраны труда / В. Ц. Жидецкий, В. С. Джигирей, А. В. Мельников. – Львов, 2000. – 350 с.
64. Потетюев С. Ю. Исследование температурного поля очага пожара в тоннеле метрополитена / С. Ю. Потетюев // Проблемы пожарной безопасности : сб. науч. тр. АПБ Украины. – Харьков, 2000. – Вып. 8. – С. 135-141.
65. Косарь А. М. Моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях метрополитена при пожаре / А. М. Косарь, П. С. Пашковский // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2002. – № 2. – С. 38-47.
66. Карпов А.В. Трехмерное численное моделирование пожара в экспериментальном туннеле / [А.В. Карпов, Д.В. Макаров, В.В. Мольков, А.М. Рыжов] // Пожаровзрывоопасность. – 2000. - № 1. – С. 28 – 37.
67. Saton R. Numerical Study of Large Fires in Tunnels = Численные исследования крупных пожаров в туннелях / К. Satoh, S. Mijazaki // Report of Fire Research Institute of Japan. – 1989. – № 68. – P. 19-34.
68. Лойцянский Л. Г. Механика жидкостей и газов / Л. Г. Лойцянский. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.
69. Лыков А. В. Тепломассообмен : справочник. – М. : Энергия, 1980. – 580 с.
70. Брушлинский Н. Н. Моделирование пожаров и взрывов / Н. Н. Брушлинский, А. Я. Корольченко. – М. : Пожнаука, 2000. – 492 с.
71. Леонтьев А. И. Пути развития теории тепломассообмена / А. И. Леонтьев. – Известия РАН. Энергетика. – 1996. – №2. – С. 22-27.
72. Алексащенко А. А. Тепломассоперенос при пожаре / А. А. Алексащенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский. – М. : Стройиздат, 1982. – 173 с.
73. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М. : Стройиздат, 1990. – 424 с.
74. Молчадский И. С. Тушение пожаров в кабельных шахтах / И. С. Молчадский, А. В. Гомозов, С. Н. Артюнов, Т. Н. Степанова // Автоматические установки пожаротушения. – М. : 1985. – С. 41-46.



75. Астапенко В. М. Термогазодинамика пожаров в помещениях / В. М. Астапенко, Ю. А. Кошмаров, И. С. Молчадский, А. Н. Шевляков. – М. : Стройиздат, 1988. – 448 с.

76. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

77. Добрянский Ю. Н. Расчёт тепловлажностных режимов подземных объектов на ЭВМ / Ю. Н. Добрянский. – Киев : Наук. думка, 1991. – 112 с.

78. Кремнев О. А. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях / О. А. Кремнев, В. А. Журавленко. – Киев : Наук. думка, 1986. – 344 с.

79. Гончаров С. А. Термодинамика : учебник / С. А. Гончаров // 2-е изд., стер. – М. : Москов. госуд. горн. ун-т, 2001. – 441с.

80. Йо Судзуки. Исследование горения электрического кабеля внутри вентиляционного канала / Судзуки Йо, Ханэ Йосинари // Касай. – 1978. – 28. – 12. – С. 22-30.

81. Иванников В. Л. Прогнозирование обстановки при пожарах в кабельных тоннелях / В. Л. Иванников, Ю. Г. Журавлев, А. П. Богданович. – Тактика и процессы пожаротушения. – М. : ВНИИПО, 1989. – С. 77-83.

82. Бадер Ю. А. Исследование факторов, влияющих на эффективность тушения пожаров в кабельных туннелях / Ю. А. Бадер, Ю. Г. Журавлев // Пожарная техника и тактика тушения пожаров. – М. : 1984. – С. 65-71.

83. Курбатов Б.Е. Исследование динамики тушения закрытых пожаров / Б.Е. Курбатов, Н.Ю. Недбайло // Профилактика и тушение пожаров на объектах народного хозяйства : тезисы докл. Республ. науч.-техн. семинара. – Севастополь, 1988. – 146 с.

84. Снегирёв А. Ю. Численное моделирование диффузионного турбулентного горения при различных режимах пожара в помещениях / А. Ю. Снегирёв, Г. М. Махвиладзе, Дж. Робертс // Труды II Российской национальной конференции по теплообмену. – М. : МЭИ, 1998. – Т.3. – С. 273-276.

85. Кошмаров Ю. А. Экспериментальное исследование процесса развития пожара в помещении / Ю. А. Кошмаров, В. М. Астапенко, А. Н. Шевляков, С. И. Зернов : сб. трудов. Пожарная профилактика. – М. : ВНИИПО МЧС СССР, 1987. – С. 5 – 54.

86. Устинов А. М. Изменение скорости вентиляционной струи, поступающей к очагу при пожаре в горизонтальной горной выработке / А. М. Устинов, В. С. Иванов // Горноспасательное дело : сб. науч. трудов. – Кемерово : ВО ВНИИГД, 1978 – № 8. – С. 18-32.

87. Воскобойников В. И. Опрокидывание вентиляционной струи в шахте при пожарах в горизонтальных выработках / В. И. Воскобойников, А. К. Каратаев, В. В. Дебелый // Уголь. – 1974. – № 11. – С. 53-56.

88. Виноградов Ю. А. Влияние очага пожара на расход воздуха в тоннеле / Ю.А. Виноградов // Протипожарная защита подземных сооружений метрополитенов : сб. науч. трудов. – М. : ВНИИПО, 1984. – С. 68-70.

89. Ильин В. В. Основные принципы физического моделирования пожаров в метрополитенах / В. В. Ильин // Пожаровзрывобезопасность. –1994.– № 3. – С. 37-44.

90. Джалурия И. Естественная конвекция / И. Джалурия // Тепломассообмен // Пер. с англ. – М. : Мир, 1983. – 400 с.

91. Бот В. Оценка тепловой депрессии подземного пожара на основе пожарной нагрузки горящей выработки / В. Бот, Я. Минарт, Г. Поллак, Э. Шуберт // Глюкауф. – 1982. – № 2. – С. 4-10.

92. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев. – М. : Энергия, 1977. – 343 с.

93. Топчиенко Б. И. Схема вентиляционных соединений изолированного участка при рециркуляции пожарных газов / Б. И. Топчиенко, И. Н. Зинченко // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. – Донецк : НИИГД, 1994. – С. 61-63.

94. Ярембаш И. Ф. Компьютерное моделирование динамики температуры в изолированном выемочном участке шахты при рециркуляции пожарных газов

/ И. Ф. Ярембаш, И. Н. Зинченко, А. В. Ревякин // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. – Донецк : НИИГД, 1999. – С. 126-131.

95. Осипов С.Н. Вентиляция шахт при подземных пожарах / С.Н. Осипов, В.М. Жадан. – М. : Недра, 1973. – 152 с.

96. Пузач С. В. Трёхмерное математическое моделирование начальной стадии пожара в помещении / С. В. Пузач // Инженерно-физический журнал. - 2000. –Т. 73, № 3. – С. 621-626.

97. Пузач С. В. Некоторые трёхмерные эффекты теплообмена в помещении / С. В. Пузач. – Инженерно-физический журнал. – 2001. –Т. 74. – № 1. – С. 35-40.

98. Осадчий А. В. Автоматическая противопожарная защита объектов энергоснабжения шахт / А. В. Осадчий, И. Ф. Дикенштейн, Н. С. Яковлева, В. В. Гуржий // «Горноспасательное дело» : сб. науч. тр. – Донецк : НИИГД «Респиратор». – 2005. – Вып. 42. – С. 63-68.

99. Волков В. П. Моделирование горения твёрдого топлива / В. П. Волков, Л. И. Зайчик, В. А. Першуков. – М. : Наука, 1994. – 320 с.

100. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения / Я. Б. Зельдович, Г. Б. Баренблат, Г. М. Махвиладзе, В. Н. Либрович. – М. : Наука, 1981. – 419 с.

101. Присяжнюк Н. Л. Надёжность и эффективность функционирования установок пожаротушения кабельных тоннелей / Н. Л. Присяжнюк // Пожарная опасность технологических процессов, зданий сооружений и профилактика. – М. : 1988. – С. 150-154.

102. Пузач С. В. К расчёту динамики опасных факторов пожара в помещении / С. В. Пузач // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1999. – Вып. 7. – С. 122-127.

103. Система пожаротушения для кабельных тоннелей / Sprinkler system inbles in eneck // Consult. Eng/ (Gr/Brit). – 1981, 45. – № 4. – S. 30-31.

104. Смелков Г. И. Пожарная безопасность кабельных изделий: проблемы нормирования / Г. И. Смелков, В. А. Пехотиков, А. И. Рябиков // Пожарная безопасность. – 2005. – № 4. – С. 96-105.

105. Снижение пожарной опасности кабельных трасс : Обзор. информ. / Г. И. Смелков, В. Ф. Бойцов, И. Ф. Поединцев, В. В. Смирнов. – М. : ГИЦ МВД СССР, 1990. – Вып. 3/90. – 50 с.

106. Пузач С. В. Особенности начальной стадии пожара в помещении / С. В. Пузач, А. А. Таранцов, А. В. Ершов // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 2000. – Вып. 3. – С. 79-83.

107. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещеиии : учебное пособие / Ю. А. Кошмаров. – М. : Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

108. Баратов А. Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность / А.Н. Баратов. – М. : ФГУ ВНИИ ПО МЧС России, 2003. – 35 с.

109. Чарков В. П. Комбинированное тушение подземных пожаров порошком и пеной / В. П. Чарков, А. А. Король, В. П. Засевский // В кн.: Ведение горноспасательных работ и предупреждение аварий : сб. науч. тр./ ВНИИГД. – Донецк, 1984. – С. 73-79.

110. Абдурагимов И. М. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И. М. Абдурагимов, В. Ю Говоров, В. Е. Макаров. – М. : ВИПТШ МВД СССР, 1980. – 80 с.

111. Ющенко Ю. Н. Автоматические установки пожаротушения и локализации для горных выработок шахт / Ю. Н. Ющенко, К. И. Лапин // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД. – Донецк, 2002. – С. 32-37.

112. Тушение подземных пожаров на угольных шахтах / Г. Г. Соболев, В. П. Чарков, А. М. Кушнарёв и др. – М. : Недра, 1977. – 248 с.

113. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. – М. : Наука, 1976. – 576 с.

114. Иванов Е. Н. Расчёт и проектирование систем противопожарной защиты / Е. Н. Иванов. – М. : Химия, 1990. – 384 с.

115. Мышак Ю. А. Исследование условий подачи комбинированных огнетушащих составов при тушении пожара в объёме / Ю. А. Мышак, Ю. А.

Кошмаров // Средства и способы пожаротушения : сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1981. – С. 65-71.

116. Савоцик А. Н. Натурные испытания комбинированных и углекислотных-хладоновых составов / А. Н. Савоцик, С. С. Пустынников, В. И. Яловко // Теоретические и экспериментальные вопросы автоматического пожаротушения : сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1987. – С. 67-71.

117. Крюков В. Н. Особенности расчёта параметров двуокиси углерода при истечении из насадков / В. Н. Крюков, С. И. Пучков, Н. В. Навценя // Пожарная техника, средства и способы пожаротушения : сб. науч. тр. – М. : ВНИИПО, 1992. – С. 85-89.

118. Рыжов А. М. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях. Методические рекомендации / А. М. Рыжов, И. Р. Хасанов, А. В. Карпов. – М. : ВНИИПО МЧС России, 2003. – 35 с.

119. Статистика пожеж від електротехнічних виробів за 2010 - 2014 роки. Український науково-дослідний інститут цивільного захисту.

120. Статут ДВГРС по організації і веденню гірничорятувальних робіт – Київ, 1997. – 453 с.

121. Geibler H. Wasserspruhanlagen zur Brandbekämpfung in Kabelkanalen und Kabelböden = Установки водяного пожаротушения в кабельных тоннелях / H. Geibler // Sicherh., Bergbau, Energiewirt., Geol. Met. – 1982. – V. 28. N 6. – S. 137 – 138.

122. Woolberd F. Risk management: preventing and controlling cable fibers / Комплексная противопожарная защита кабельных коммуникаций / F Woolberd // Fire Surv. – 1989. – V. 18. – № 3. – S. 24-28.

123. Пат. 3692118 США, МПК А 62 с 1/14, 169/1А, 169/12. Fixed fire extinguishing system utilizing recirculation of combustion products / С. Jao = Стационарна система гасіння пожеж з використанням рециркуляції продуктів згорання. – Заявл. 07.09.71; Опубл. 19.09.72.

124. Пат. 63726 Польша, МПК Е 21 F 5/00, Кл. 5d, 5/00. Sposib gaszenia podzemnych pozarow Kopalnianych I urzadzenie do stosowania tego sposobu / А.

Kukuczka = Спосіб гасіння підземних пожеж шахт та пристрій для реалізації цього способу. Заявл. 30.08.69; Опубл. 10.01.72.

125. Пат. 3708015 США, МПК А 62 с 35/52, 169/12, 169/41, 169/42. System for fire protection using recirculation of combustion products / С. Jao = Система пожежогасіння, що використовує рециркуляцію продуктів згорання. Опубл. 02.01.73.

126. Taylor G.J. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proc. Roy. Soc. – London, 1954. v. A. 233 p.

127. Ковалишин В. В. Моделювання інертизації об'єкта великої протяжності з метою гасіння пожежі / В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик, Т. В. Бойко // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД, 2013. – № 23. – С. 81-85.

128. Ковальчик В. М. Моделювання чисельним методом подавання інертного газу до осередку пожежі на значні відстані / В. М. Ковальчик, В. В. Ковалишин // Науковий вісник. – Київ : УкрНДІЦЗ № 1(29), 2014. – С. 144-150.

129. Ковалишин В. В. Моделювання розвитку та гасіння пожежі в каналах інертними газами з наступною їх рециркуляцією / В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик, Т. Б. Юзьків // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД, 2014. – № 24. – С. 55-61.

130. Ковалишин В. В. Розрахунок параметрів гасіння пожежі інертними газами з подальшою їх рециркуляцією / В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик, М. П. Сорочич // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні : матер. ІХ Міжнар. наук.-техн. конф. (05-07 червня). – Миколаїв, 2014. – С. 163-166.

131. Ковалишин В. В. Інертизація об'єкту великої протяжності для гасіння пожежі / В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, В. М. Ковальчик, С. І. Гончаренко // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи : матер. XVI Всеукраїнської наук.-практ. конф. рятувальників (23-24 вересня). – Київ : ІДУЦЗ, 2014. – С. 142-143.

132. Ковалишин В. В. Обґрунтування та розрахунок параметрів гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією в кабельних тунелях /

В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик, С. І. Гончаренко // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Черкаси : ЧПБ, 2014. – № 17. – С. 39-46.

133. Ковалишин В. В. Фізичне і математичне моделювання процесу гасіння пожеж інертними газами в кабельному тунелі / В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик, Р. Я. Лозинський, С. І. Гончаренко, В. В. Мамаєв // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД, 2014. – № 25. – С. 39-46.

134. Ковалишин В. В. Процессы пиролиза и горения твёрдого топлива / В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – Минск: КИИ МЧС Республики Беларусь, 2015. – № 2(22). – С.19-22.

135. Ковалишин В. В. Математичне і фізичне моделювання гасіння пожеж інертними газами в кабельному тунелі / В. В. Ковалишин, В. М. Ковальчик // Сучасний стан цивільного захисту: перспективи та шляхи до Європейського простору : матер. XVII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників (22-23 вересня). – Київ : ІДУЦЗ, 2015. – С 184-186.

136. Ковальчик В. М. Обґрунтування і розрахунок параметрів гасіння пожежі інертними газами з подальшою їх рециркуляцією в кабельних тунелях / В. М. Ковальчик, В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, С. І. Гончаренко // Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матер. всеукр. наук. - практич. конф. з міжнародною участю (09-10 жовтня). – Черкаси, 2015. – С. 255-258.

## **ДОДАТКИ**



**ДОДАТОК А**  
**ПРОТОКОЛ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ АЗОТОМ БЕЗ**  
**РЕЦИРКУЛЯЦІЇ**

Затверджую  
 Начальник відділу організації  
 науково-дослідної роботи

к.т.н. доцент  
 помічник служби ЦЗ



Ю.І.Рудик  
 2013

### Протокол

Експериментального дослідження модельного вогнища пожежі в модельній (вогневій) споруді з визначення параметрів гасіння пожеж

**Дата проведення експерименту:** 17.12.2013 р.

**Умови проведення експерименту:**

- Температура 14°C
- Атмосферний тиск 97,2кПа
- Відносна вологість 66%

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії ЛДУ БЖД  
 Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** трьохжильний маслонаповнений кабель на напругу 35 кВ марки АСБ

**ЗРАЗКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** дослідженню піддавався 3 зразки кабельної продукції

**ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Редуктор тиску подачі азоту, секундомір, термомпари, газовий хроматограф «CHROM-5»

#### **Результати досліджень модельного вогнища пожежі подаванням азоту**

Кабельна продукція розміщувалася на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В камеру згоряння завантажили 24 кг маслонаповненої кабельної продукції, з якої 16 кг це горюча ізоляція, масло, кабелі довжиною 1,2 м, частин займають площу 0,5 м<sup>2</sup>.

Запалювання здійснюється при швидкості потоку повітря, на вході в камеру, 0,25 м<sup>3</sup>/хв. Підсмоктування повітря проходить через прямокутний отвір площею 0,078 м<sup>2</sup>.

Підпалюють кабельну продукцію 4 хв. за допомогою газового пальника з робочою довжиною 30 см, висота полум'я 15 см, зі сторони отворів, через які подається повітря для підтримки горіння. За даний період часу настає стійке полуменеве горіння.

Вільне самостійне горіння відбувається 5 хвилин. Температура швидко зростає за рахунок достатньої кількості кисню в споруді. Найбільший ріст температури 703 °С спостерігається в центрі камери, полум'я рухається до місця підсмоктування повітря.

З 5 до 10 хвилини відбувається подавання азоту через круглий отвір площею 0,00785 м<sup>2</sup>, час подавання азоту становить 300 с. На 6 хвилині візуально зафіксовано припинення полуменевого горіння, температура при цьому знизилася до 450 °С. На 10 хвилині подавання азоту припиняється. Витрату азоту визначено у кількості 1 м<sup>3</sup>/хв.

На 11 хвилині відбувається зростання температури до 400 °С, після чого вона знову знижується.

Таблиця 1. Результати експериментів з визначення температури

№ з/п	Тривалість дослідів хв.	Дослід 1 °С	Розбіжність, %	Дослід 2 °С	Розбіжність, %	Дослід 3 °С	Розбіжність, %	Т сер. °С	Примітки
1.	0	14		14		14		14	Вільне горіння
2.	1	83	2	77	9	84	3	82	
3.	2	213	5	184	3	211	4	203	
4.	3	437	4	442	9	487	7	456	
5.	4	687	5	596	8	681	4	655	
6.	5	706	5	619	4	740	10	695	
7.	6 Припинення полуменевого горіння 450 °С	646	8	731	9	731	4	703	Подавання азоту
8.	7	367	5	318	3	364	4	350	
9.	8	316	4	320	9	353	7	330	
10.	9	330	5	286	9	327	4	315	
11.	10	315	5	273	9	312	4	300	
12.	11	304	5	263	4	319	10	290	
13.	12	368	8	416	9	416	4	400	
14.	13	367	5	318	3	364	4	350	
15.	14	288	4	291	9	321	7	300	
16.	15	294	5	254	8	291	4	280	
17.	20	225	5	197	4	236	10	215	
18.	25	174	8	197	9	197	4	190	
19.	30	173	5	150	9	171	4	165	
20.	35	147	5	127	9	145	4	140	
21.	40	131	5	113	4	137	10	125	
22.	45	105	8	119	9	119	4	115	
23.	50	105	5	91	3	104	4	100	
24.	55	81	4	82	9	90	7	85	
25.	60	78	5	68	8	78	4	75	

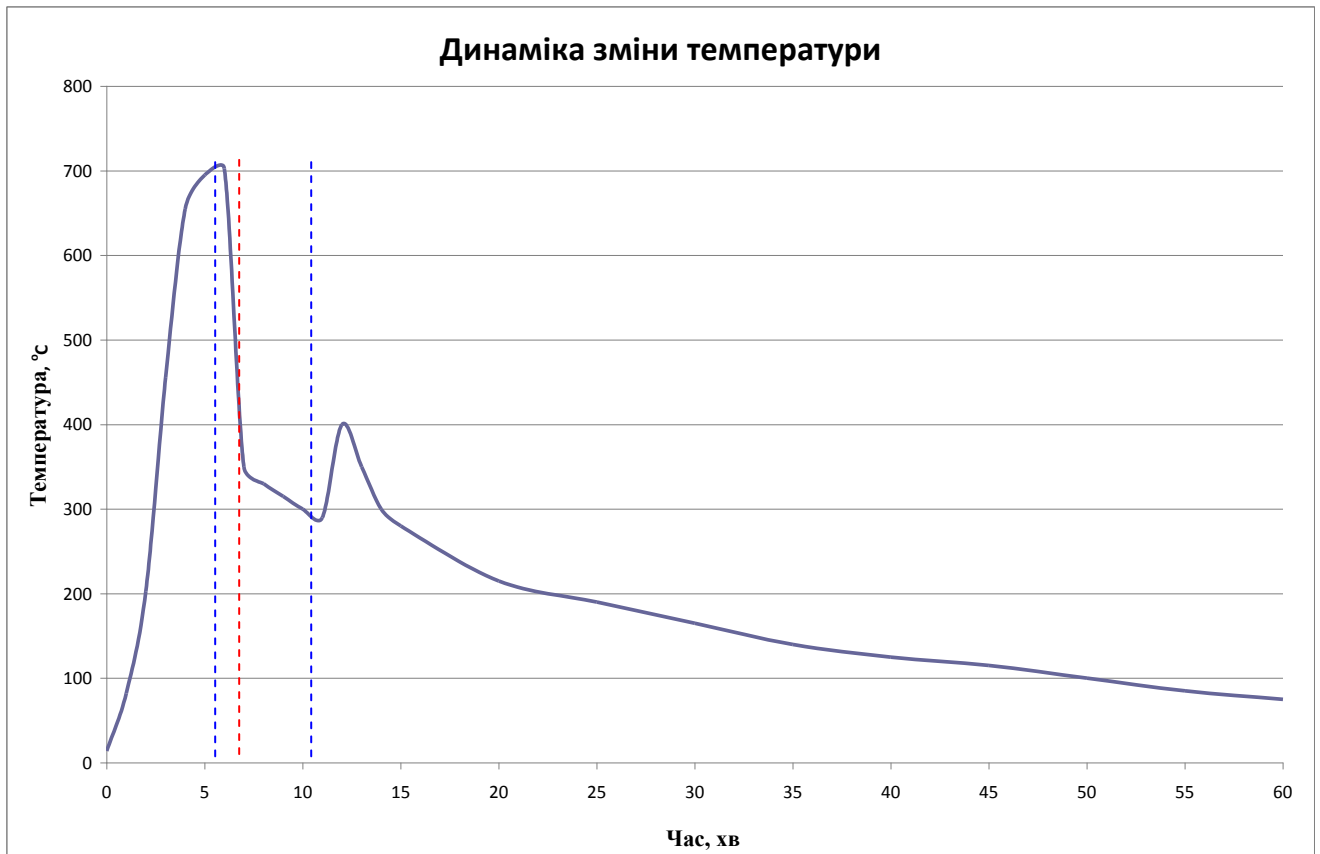


Рис. 1. Динаміка зміни температури у модельній вогневій споруді при подаванні азоту

Об'єм модельної вогневої споруди становить  $0,48 \text{ м}^3$ .

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу проходить утворення значної кількості продуктів згорання.

Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря становила  $F_{\text{отв.}} = 0,0358 \text{ м}^2$ .

Одночасно з точок А та Б за допомогою шприців відбувається відбір проб газового середовища в модельній вогневій споруді в точці А - на вході та точці Б - на виході з неї з подальшим проведенням аналізу в газовому хроматографі «СНРОМ-5» з виведенням результатів. Проби відбираються з однаковою періодичністю протягом експерименту.

Обробка експериментальних даних показала, що при виникненні навіть дрібномасштабної пожежі концентрація кисню спочатку різко падає і досягає значення 5 % на 6 хв. без урахування часу розпалу. Під час подавання азоту вона продовжує знижуватися навіть до 2 %, після чого в результаті гасіння пожежі концентрація кисню поступово відновлюється.

Таблиця 2. Результати експериментів з визначення концентрації кисню

№ з/п	Тривалість дослідів, хв.	Дослід 1 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 2 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 3 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Сер. O <sub>2</sub> , %	Примітки
1.	0	21		21		21		21	Вільне горіння
2.	1	21	5	18,2	9	20,8	4	20	
3.	2	16,32	4	16,49	3	18,19	7	17	
4.	3	10,5	5	9,1	9	10,4	4	10	
5.	4	8,4	5	7,36	8	8,72	9	8	
6.	5	5,52	8	6,24	4	6,24	4	6	
7.	6 Припинення полум'яного горіння	5,25	5	4,55	9	5,2	4	5	Подавання азоту
8.	7	1,92	4	1,94	3	2,14	7	2	
9.	8	2,31	5	2	9	2,28	4	2,2	
10.	9	2,52	5	2,18	9	2,49	4	2,4	
11.	10	2,62	5	2,27	9	2,72	9	2,5	
12.	11	2,76	8	3,12	4	3,12	4	3	
13.	12	10,5	5	9,1	9	10,4	4	10	
14.	13	14,4	4	14,55	3	16,05	7	15	
15.	14	18,9	5	16,38	9	18,72	4	18	
16.	15	21	5	18,4	8	21,8	9	20	
17.	16	19,32	8	21,84	4	21,84	4	21	

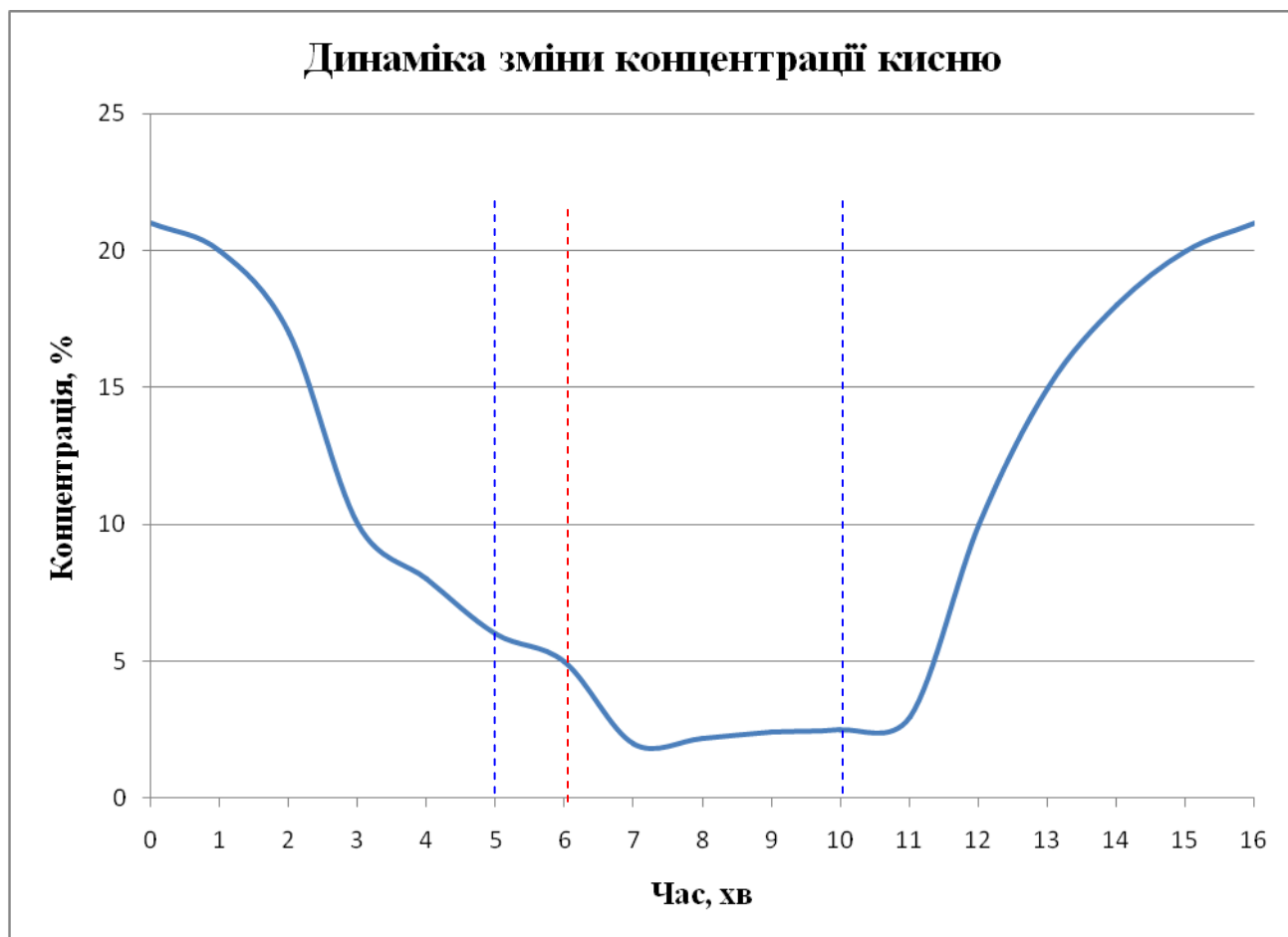


Рис.2. Динаміка зміни концентрацій кисню

**Висновок:** за результатами досліджень встановлено максимальну температуру 703 °С, температуру при якій припинилося полуменеве горіння 450 °С. Концентрація кисню при якій припинилося полуменеве горіння складала 5 %.

Начальник науково-дослідної  
лабораторії ЛДУБЖД

В.Л.Петровський

Ад'юнкт ЛДУБЖД  
підполковник служби ЦЗ

В.М.Ковальчик

## Результати математичного моделювання при подаванні азоту

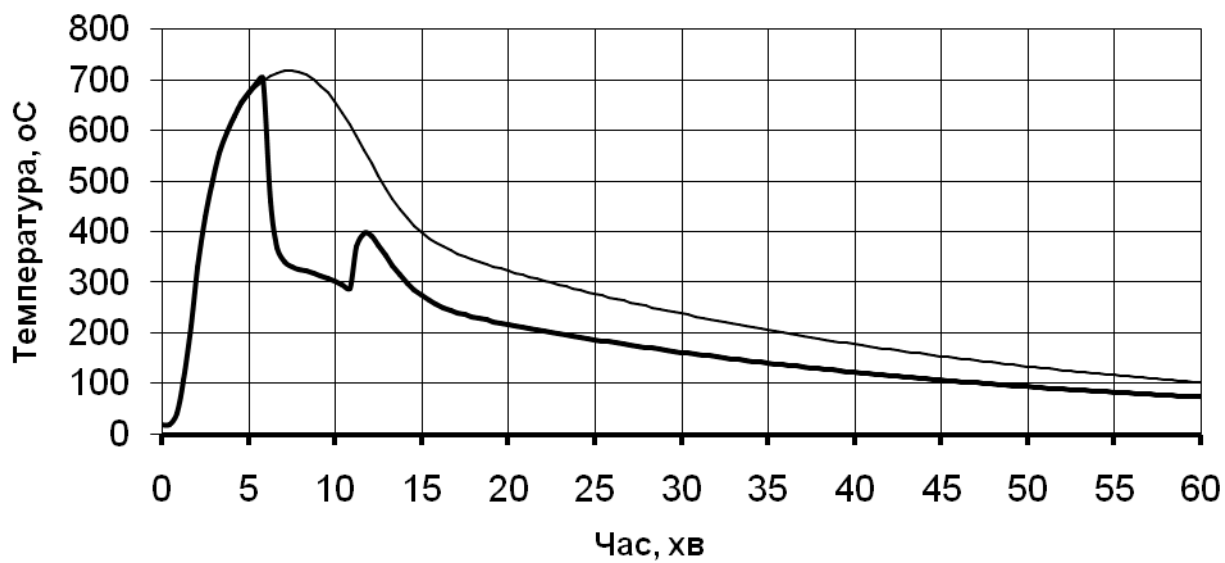


Рис.3. Динаміка зміни температури

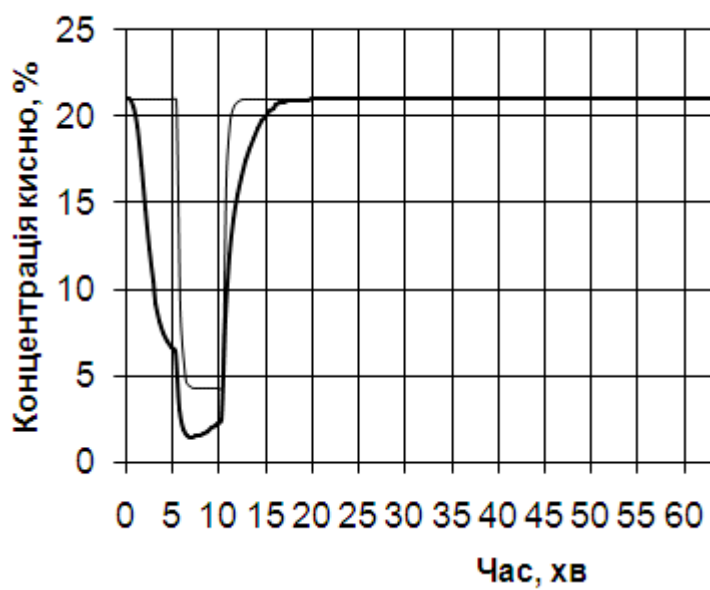



Рис.4. Динаміка зміни концентрацій кисню

**ДОДАТОК Б**  
**ПРОТОКОЛ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ АЗОТОМ З**  
**НАСТУПНОЮ РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ**



Затверджую  
 Начальник відділу організації  
 науково-дослідної роботи  
 Т. НАЦОНЕНТ  
 ДОСЛІДНО-ДОСЛІДНИКА  
 ЛАБОРАТОРІЯ ЦЗ  
 Ю.І.Рудик  
 2013



### Протокол

Експериментального дослідження модельного вогнища пожежі в модельній (вогневій) споруді з визначення параметрів гасіння пожеж

**Дата проведення експерименту:** 24.12.2013 р.

**Умови проведення експерименту:**

- Температура 15°C
- Атмосферний тиск 96,1кПа
- Відносна вологість 65%

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії ЛДУ БЖД  
 Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** трьохжильний маслонаповнений кабель на напругу 35 кВ марки АСБ

**ЗРАЗКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** дослідженню піддавався 3 зразки кабельної продукції

**ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Редуктор тиску подавання азоту, секундомір, термомпари, газовий хроматограф «CHROM-5»

**Результати досліджень модельного вогнища пожежі подаванням азоту з наступною рециркуляцією газового середовищу**

Кабельна продукція розміщувалася на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В камеру згоряння завантажили 24 кг маслонаповненої кабельної продукції, з якої 16 кг це горюча ізоляція, масло, кабелі довжиною 1,2 м, частин займають площу 0,5 м<sup>2</sup>.

Запалювання здійснюється при швидкості потоку повітря, на вході в камеру, 0,25 м<sup>3</sup>/хв. Підсмоктування повітря проходить через прямокутний отвір площею 0,078 м<sup>2</sup>.

Підпалюють кабельну продукцію 4 хв. за допомогою газового пальника з робочою довжиною 30 см, висота полум'я 15 см, зі сторони отворів, через які подається повітря для підтримки горіння. За даний період часу настає стійке полуменеве горіння.

Вільне самостійне горіння відбувається 5 хвилин. Температура швидко зростає за рахунок достатньої кількості кисню в споруді. Найбільший ріст температури 705 °С спостерігається в центрі камери, полум'я рухається до місця підсмоктування повітря.

З 5 до 10 хвилини відбувається подавання азоту через круглий отвір площею 0,00785 м<sup>2</sup>, час подавання азоту становить 300 с. На 6 хвилині візуально зафіксовано припинення полуменевого горіння, температура при цьому знизилася до 455 °С. На 10 хвилині подавання азоту припиняється. Включається в роботу вентилятор рециркуляційного трубопроводу. Витрату азоту визначено у кількості 4 м<sup>3</sup>/хв.

Таблиця 1. Результати експериментів з визначення температури

№ з/п	Тривалість дослідів хв.	Дослід 1 °С	Розбіжність, %	Дослід 2 °С	Розбіжність, %	Дослід 3 °С	Розбіжність, %	T сер. °С	Примітки
1.	0	15		15		15		15	Вільне горіння
2.	1	87	2	80	5	87	3	85	
3.	2	215	5	186	9	213	4	205	
4.	3	441	4	446	3	492	7	460	
5.	4	703	5	609	9	696	4	670	
6.	5	735	5	644	8	763	9	700	
7.	6 Припинення полуменевого горіння 455 °С	648	8	733	4	733	4	705	Подавання азоту
8.	7	372	5	323	9	369	4	355	
9.	8	326	4	329	3	363	7	340	
10.	9	341	5	295	9	338	4	325	
11.	10	324	5	281	9	321	4	309	
12.	11	309	5	268	9	321	9	295	Увімкнення рециркуляції
13.	12	248	8	280	4	280	4	270	
14.	13	262	5	227	9	260	4	250	
15.	14	222	4	225	3	248	7	232	
16.	15	231	5	200	9	228	4	220	
17.	20	194	5	170	8	201	9	185	
18.	25	149	8	168	4	168	4	162	
19.	30	151	5	131	9	149	4	144	
20.	35	127	5	110	9	125	4	121	
21.	40	120	5	104	9	125	9	115	
22.	45	92	8	104	4	104	4	100	
23.	50	89	5	77	9	88	4	85	
24.	55	67	4	67	3	74	7	70	
25.	60	68	5	59	9	67	4	65	

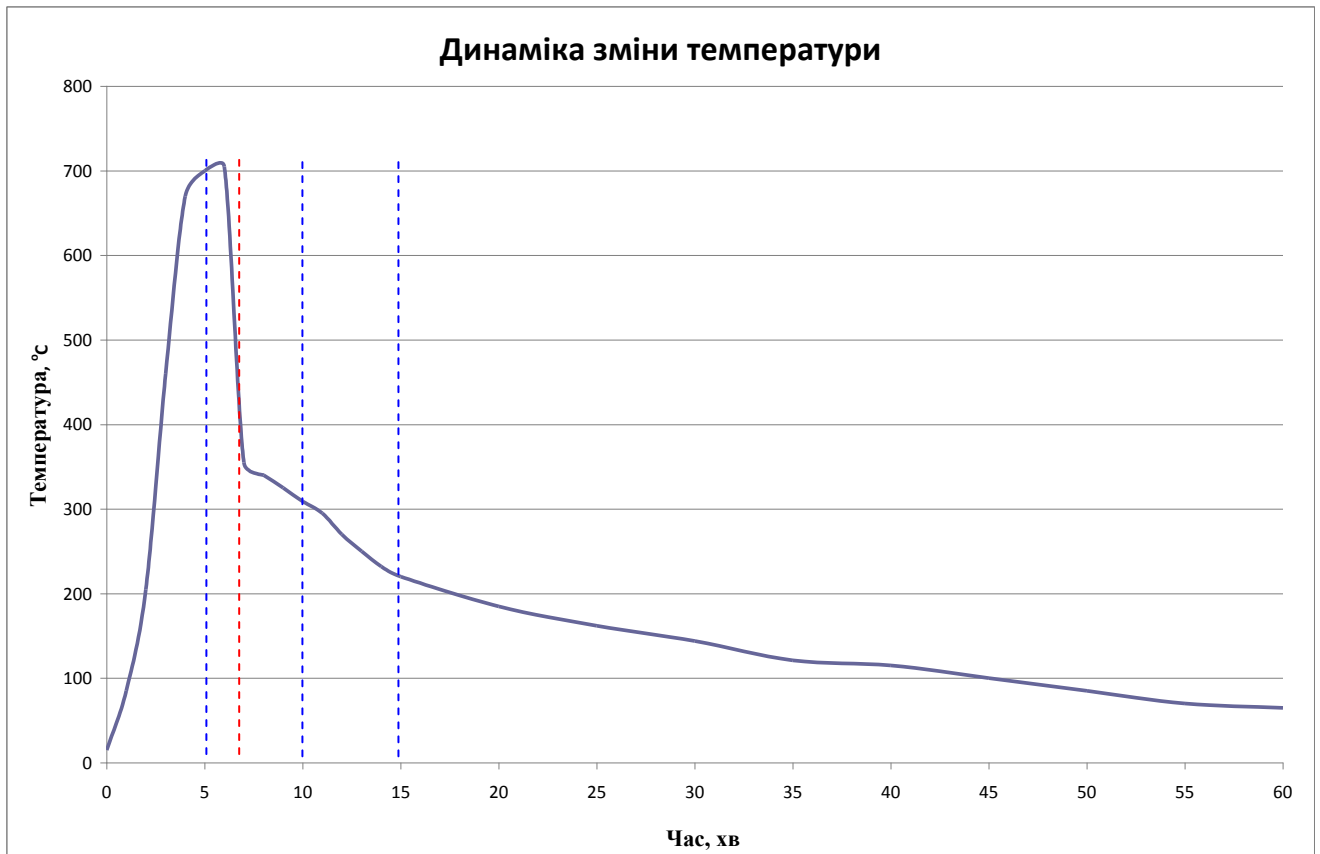


Рис.1. Динаміка зміни температури у модельній вогневій споруді при подаванні азоту з наступною рециркуляцією газового середовища

Об'єм модельної вогневої споруди становить  $0,48 \text{ м}^3$ .

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу проходить утворення значної кількості продуктів згоряння.

Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря становила  $F_{\text{отв.}} = 0,0358 \text{ м}^2$ .

Одночасно з точок А та Б за допомогою шприців відбувається відбір проб газового середовища в модельній вогневій споруді в точці А - на вході та точці Б - на виході з неї з подальшим проведенням аналізу в газовому хроматографі «СНРОМ-5» з виведенням результатів. Проби відбираються з однаковою періодичністю протягом експерименту.

Обробка експериментальних даних показала, що при виникненні навіть дрібномасштабної пожежі концентрація кисню спочатку різко падає і досягає значення 5,2 % на 6 хв. без урахування часу розпалу. Під час подавання азоту вона продовжує знижуватися навіть до 2 %, після чого в результаті гасіння пожежі концентрація кисню поступово відновлюється.

Таблиця 2. Результати експериментів з визначення концентрації кисню

№ з/п	Тривалість дослідів, хв.	Дослід 1 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 2 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 3 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Сер. O <sub>2</sub> , %	Примітки
1.	0	21		21		21		21	Вільне горіння
2.	1	20,79	5	18,01	9	20,59	4	19,8	
3.	2	16,51	4	16,68	3	18,40	7	17,2	
4.	3	10,60	5	9,19	9	10,50	4	10,1	
5.	4	8,61	5	7,54	8	8,93	9	8,2	
6.	5	5,79	8	6,55	4	6,55	4	6,3	
7.	6 Припинення полум'я невого горіння	5,46	5	4,73	9	5,40	4	5,2	Подавання азоту
8.	7	2,01	4	2,03	3	2,24	7	2,1	
9.	8	2,41	5	2,09	9	2,39	4	2,3	
10.	9	2,62	5	2,27	9	2,6	4	2,5	
11.	10	2,73	5	2,36	9	2,83	9	2,6	
12.	11	2,3	8	2,6	4	2,6	4	2,5	Увімкнення рециркуляції
13.	12	2,52	5	2,18	9	2,49	4	2,4	
14.	13	2,20	4	2,23	3	2,46	7	2,3	
15.	14	2,52	5	2,18	9	2,49	4	2,4	
16.	15	2,62	5	2,3	8	2,72	9	2,5	
17.	16	13,8	8	15,6	4	15,6	4	15	
18.	17	18,9	5	16,38	9	18,72	4	18	
19.	18	18,24	4	18,43	3	20,33	7	19	
20.	19	21	5	18,2	9	20,8	4	20	

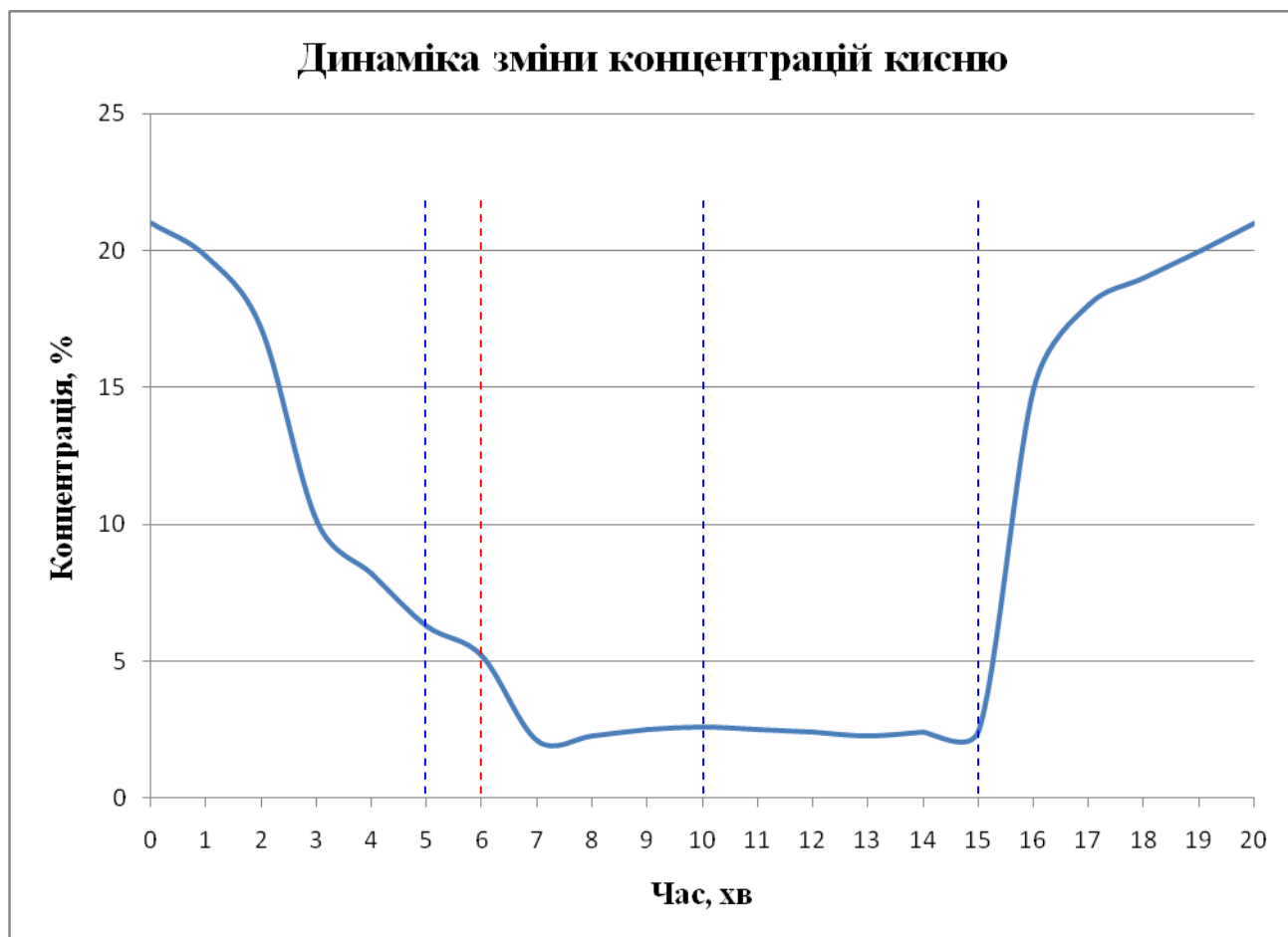


Рис.2. Динаміка зміни концентрацій кисню

Висновок: за результатами досліджень встановлено максимальну температуру 705 °С, температуру при якій припинилося полуменеве горіння 455 °С. Концентрація кисню при якій припинилося полуменеве горіння складала 5,2 %.

Начальник науково-дослідної  
лабораторії ЛДУБЖД

В.Л.Петровський

Ад'юнкт ЛДУБЖД  
підполковник служби ЦЗ

В.М.Ковальчик

Результати математичного моделювання при подаванні азоту з наступною рециркуляцією

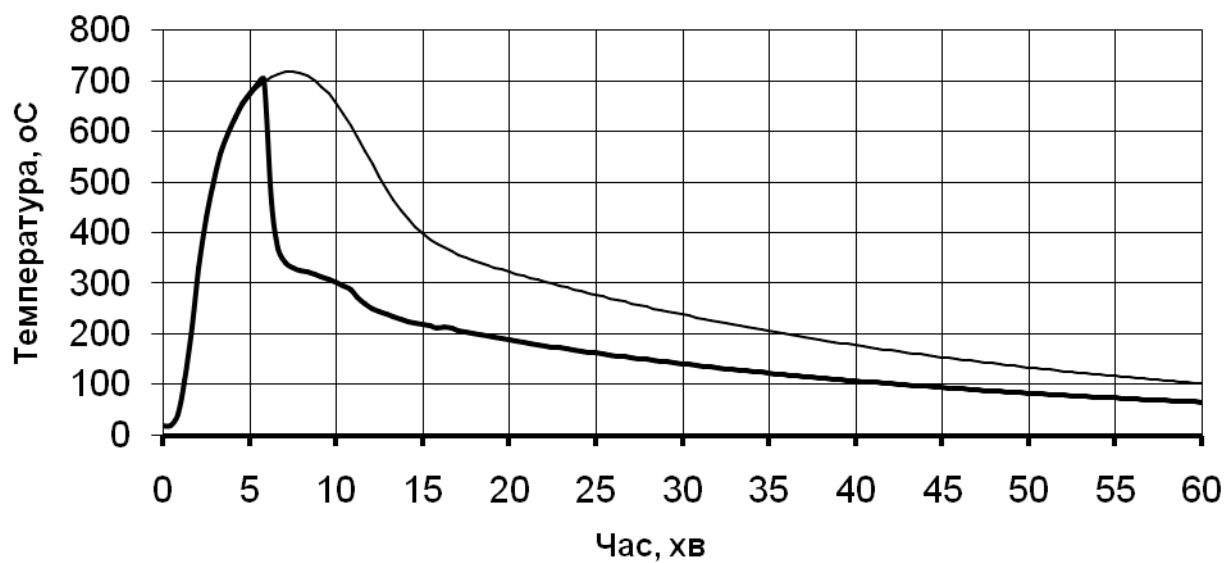


Рис.3. Динаміка зміни температури

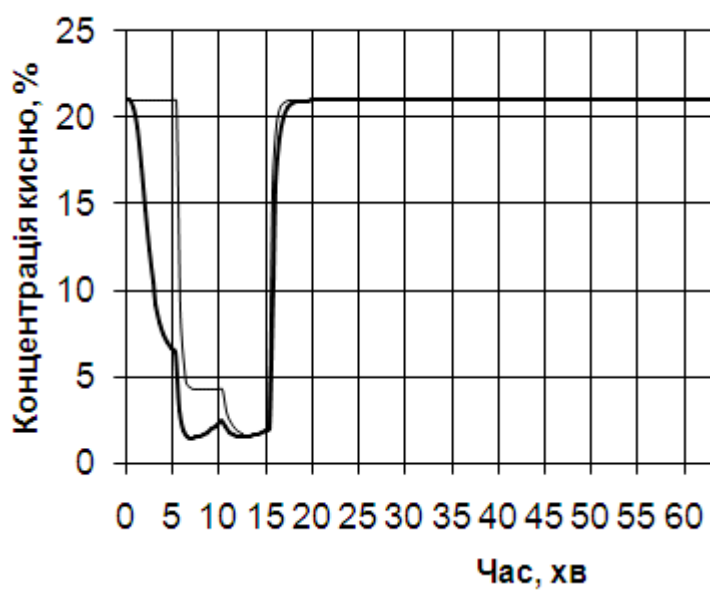


Рис.4. Динаміка зміни концентрацій кисню

Таблиця 1. Порівняння експериментальних результатів температурних режимів при подаванні азоту на гасіння модельної пожежі

№ з/п	Тривалість дослідів, хв.	Вільне горіння °С	Без рециркуляції °С	З рециркуляцією °С	Примітки	
1.	0	16	14	15		Вільне горіння
2.	1	80	82	85		
3.	2	200	203	205		
4.	3	450	456	460		
5.	4	650	655	670		
6.	5	695	698	700		Подавання азоту
7.	6	710	703	705		
8.	7	720	350	345		
9.	8	715	330	327		
10.	9	700	315	313		
11.	10	665	300	298		
12.	11	620	290	287		
13.	12	565	400	270		
14.	13	500	350	250		
15.	14	438	300	232		
16.	15	385	280	220		
17.	20	320	215	185		
18.	25	270	190	162		
19.	30	230	165	144		
20.	35	200	140	121		
21.	40	175	125	111		
22.	45	153	115	92		
23.	50	135	100	85		
24.	55	120	85	70		
25.	60	115	75	65		

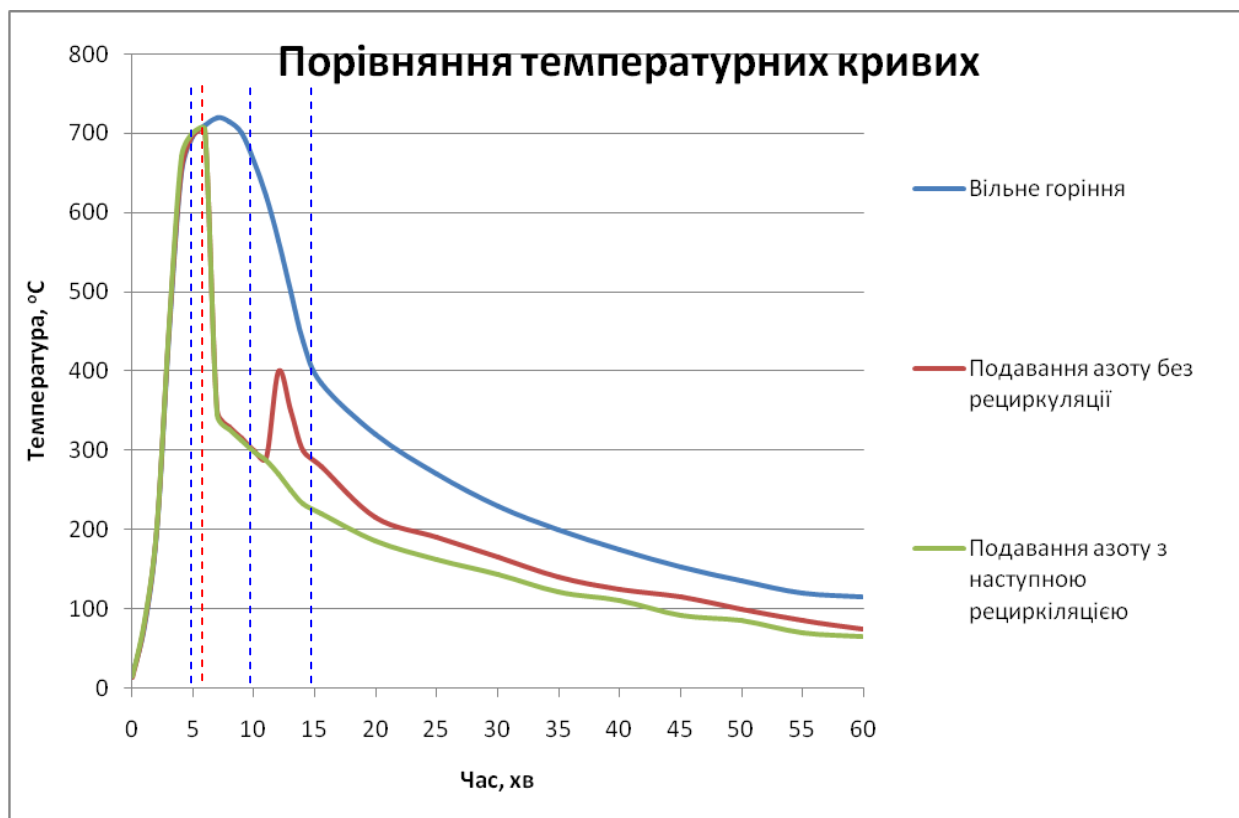


Рис. 1. Динаміка зміни температури у модельній вогневій споруді при подаванні азоту



**ДОДАТОК В**  
**ПРОТОКОЛ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ДІОКСИДОМ**  
**ВУГЛЕЦЮ БЕЗ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ**

Затверджую  
 Начальник відділу організації  
 науково-дослідної роботи  
 к.т.н., доцент  
 полковник служби ЦЗ  
 Ю.І.Рудик  
 «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2014



### Протокол

Експериментального дослідження модельного вогнища пожежі в модельній (вогневій) споруді з визначення параметрів гасіння пожеж

#### Умови проведення експерименту:

Дата проведення експерименту: 16.01.2014 р.

- Температура 16°C
- Атмосферний тиск 95,3кПа
- Відносна вологість 62%

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії ЛДУ БЖД

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** трьохжильний маслонаповнений кабель на напругу 35 кВ марки АСБ

**ЗРАЗКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** дослідженню піддавався 3 зразки кабельної продукції

**ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Редуктор тиску подачі азоту, секундомір, термомпари, газовий хроматограф «CHROM-5»

#### Результати досліджень модельного вогнища пожежі подаванням діоксиду вуглецю

Кабельна продукція розміщувалася на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В камеру згоряння завантажили 24 кг маслонаповненої кабельної продукції, з якої 16 кг це горюча ізоляція, масло, кабелі довжиною 1,2 м, частин займають площу 0,5 м<sup>2</sup>.

Запалювання здійснюється при швидкості потоку повітря, на вході в камеру, 0,25 м<sup>3</sup>/хв. Підсмоктування повітря проходить через прямокутний отвір площею 0,078 м<sup>2</sup>.

Підпалюють кабельну продукцію 4 хв. за допомогою газового пальника з робочою довжиною 30 см, висота полум'я 15 см, зі сторони отворів, через які подається повітря для підтримки горіння. За даний період часу настає стійке полуменеве горіння.

Вільне самостійне горіння відбувається 5 хвилин. Температура швидко зростає за рахунок достатньої кількості кисню в споруді. Найбільший ріст температури 710 °С спостерігається в центрі камери, полум'я рухається до місця підсмоктування повітря.

З 5 до 10 хвилини відбувається подавання діоксиду вуглецю через круглий отвір площею 0,00785 м<sup>2</sup>, час подавання азоту становить 300 с. На 6 хвилині візуально зафіксовано припинення полуменевого горіння, температура при цьому знизилася до 420 °С. На 10 хвилині подавання діоксиду вуглецю припиняється. Витрату діоксиду вуглецю визначено у кількості 1 м<sup>3</sup>/хв.

На 11 хвилині відбувається зростання температури до 370 °С, після чого вона знову знижується.

Таблиця 1. Результати експериментів з визначення температури

№ з/п	Тривалість дослідів хв.	Дослід 1 °С	Розбіжність, %	Дослід 2 °С	Розбіжність, %	Дослід 3 °С	Розбіжність, %	T сер. °С	Примітки
1.	0	16		16		16		16	Вільне горіння
2.	1	83	2	77	5	84	3	82	
3.	2	213	5	184	9	211	4	203	
4.	3	437	4	442	3	487	7	456	
5.	4	687	5	596	9	681	4	655	
6.	5	733	5	643	8	761	9	699	
7.	6 Припинення полуменевого горіння 420 °С	653	8	738	4	738	4	710	Подавання діоксиду вуглецю
8.	7	336	5	291	9	332	4	320	
9.	8	288	4	291	3	321	7	300	
10.	9	299	5	259	9	296	4	285	
11.	10	283	5	245	9	280	4	270	
12.	11	273	5	236	9	283	9	260	
13.	12	340	8	384	4	384	4	370	
14.	13	336	5	291	9	332	4	320	
15.	14	259	4	261	3	288	7	270	
16.	15	273	5	236	9	270	4	260	
17.	20	210	5	184	8	218	9	200	
18.	25	170	8	192	4	192	4	185	
19.	30	168	5	145	9	166	4	160	
20.	35	152	5	131	9	150	4	145	
21.	40	136	5	118	9	141	9	130	
22.	45	105	8	119	4	119	4	115	
23.	50	99	5	86	9	98	4	95	
24.	55	76	4	77	3	85	7	80	
25.	60	73	5	63	9	72	4	70	

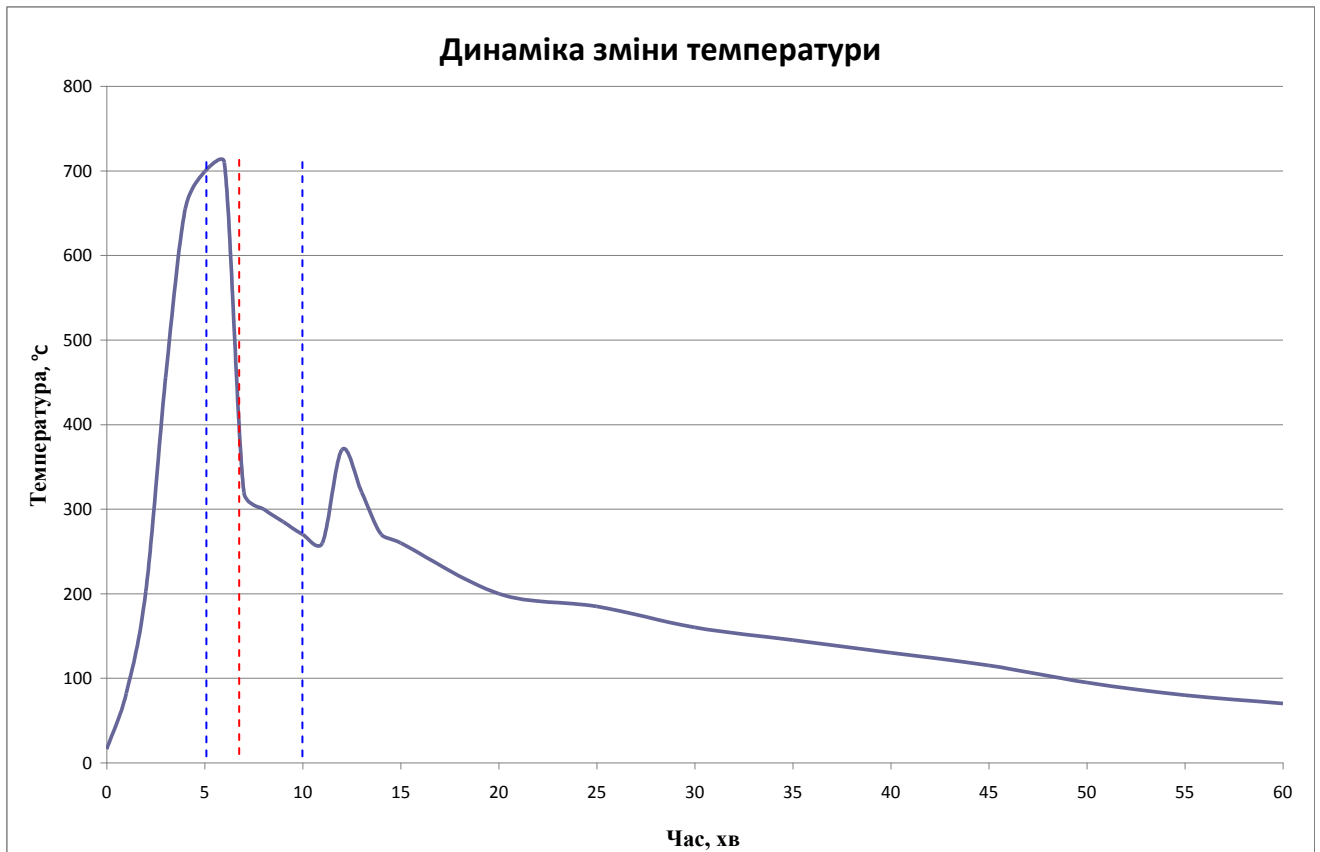


Рис. 1. Динаміка зміни температури у модельній вогневій споруді при подаванні діоксиду вуглецю

Об'єм модельної вогневої споруди становить  $0,48 \text{ м}^3$ .

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу проходить утворення значної кількості продуктів згорання.

Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря становила  $F_{\text{отв.}} = 0,0358 \text{ м}^2$ .

Одночасно з точок А та Б за допомогою шприців відбувається відбір проб газового середовища в модельній вогневій споруді в точці А - на вході та точці Б - на виході з неї з подальшим проведенням аналізу в газовому хроматографі «CHROM-5» з виведенням результатів. Проби відбираються з однаковою періодичністю протягом експерименту.

Обробка експериментальних даних показала, що при виникненні навіть дрібномасштабної пожежі концентрація кисню спочатку різко падає і досягає значення 4,5 % на 6 хв. без урахування часу розпалу. Під час подачі азоту вона продовжує знижуватися навіть до 2 %, після чого в результаті гасіння пожежі концентрація кисню поступово відновлюється.

Таблиця 2. Результати експериментів з визначення концентрації кисню

№ з/п	Тривалість дослідів, хв.	Дослід 1 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 2 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 3 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Сер. O <sub>2</sub> , %	Примітки
1.	0	21		21		21		21	Вільне горіння
2.	1	20,47	5	17,74	9	20,28	4	19,5	
3.	2	15,84	4	16,0	3	17,65	7	16,5	
4.	3	9,97	5	8,64	9	9,88	4	9,5	
5.	4	7,87	5	6,9	8	8,17	9	7,5	
6.	5	5,06	8	5,72	4	5,72	4	5,5	
7.	6 Припинення полум'яного горіння	4,72	5	4,09	9	4,68	4	4,5	Подання діоксиду вуглецю
8.	7	1,92	4	1,94	3	2,14	7	2	
9.	8	2,20	5	1,91	9	2,18	4	2,1	
10.	9	2,41	5	2,09	9	2,39	4	2,3	
11.	10	2,52	5	2,18	9	2,61	9	2,4	
12.	11	2,57	8	2,91	4	2,91	4	2,8	
13.	12	9,97	5	8,64	9	9,88	4	9,5	
14.	13	13,92	4	14,06	3	15,51	7	14,5	
15.	14	18,37	5	15,92	9	18,2	4	17,5	
16.	15	19,69	1	17,94	8	19,89	2	19,5	
17.	16	18,86	8	20,7	1	20,91	2	20,5	

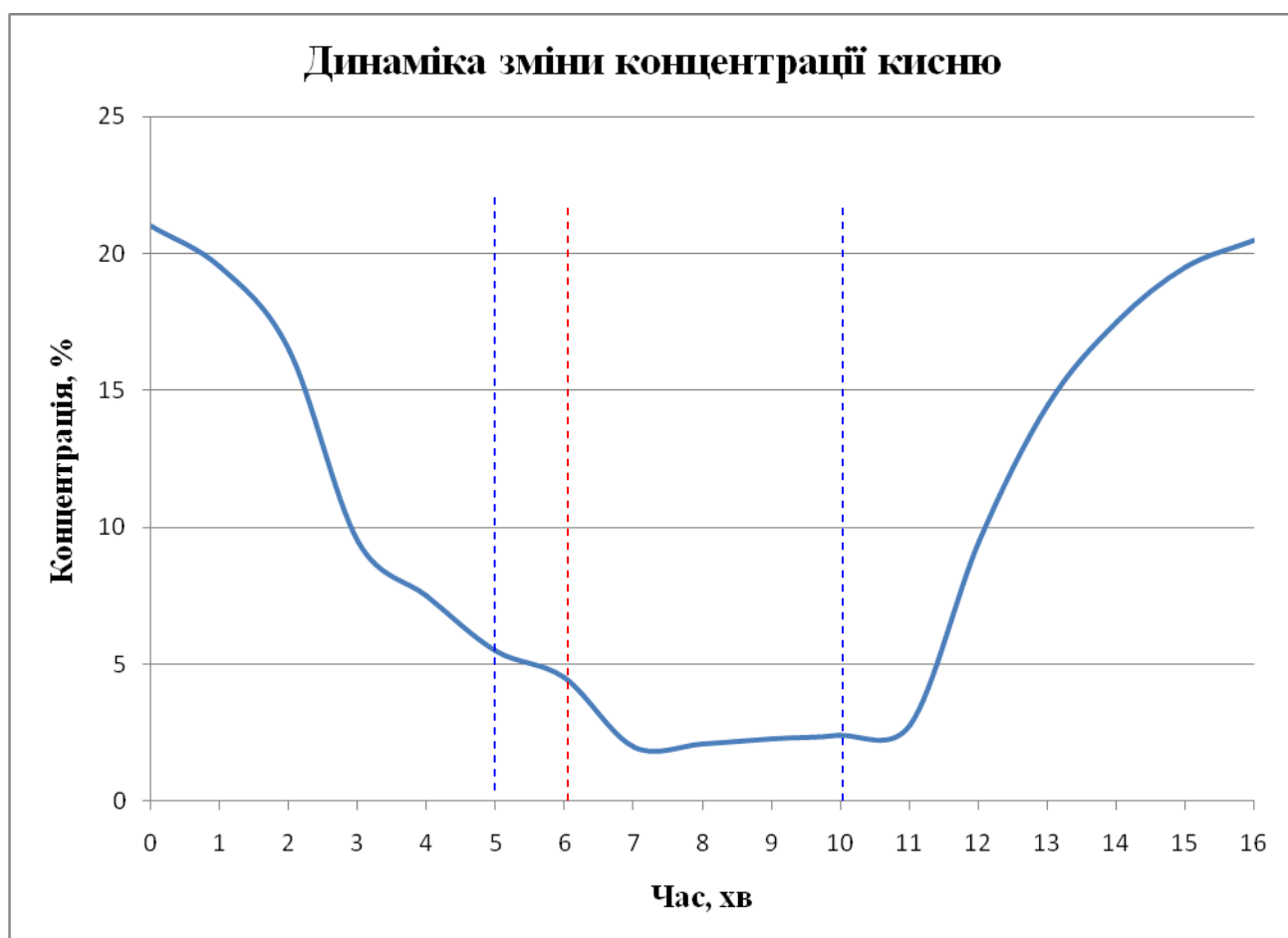


Рис.2. Динаміка зміни концентрацій кисню

**Висновок:** за результатами досліджень встановлено максимальну температуру 710 °С, температуру при якій припинилося полуменеве горіння 420 °С. Концентрація кисню при якій припинилося полуменеве горіння складала 4,5 %.

Начальник науково-дослідної  
лабораторії ЛДУБЖД

В.Л.Петровський

Ад'юнкт ЛДУБЖД  
підполковник служби ЦЗ

В.М.Ковальчик

Результати математичного моделювання при подаванні діоксиду вуглецю

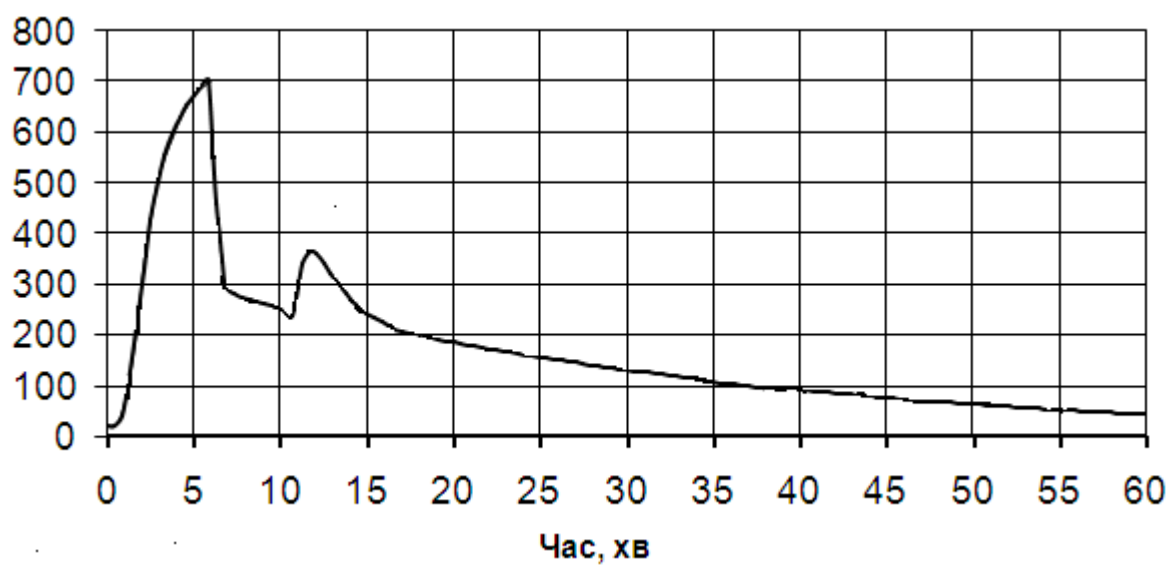


Рис.3. Динаміка зміни температури

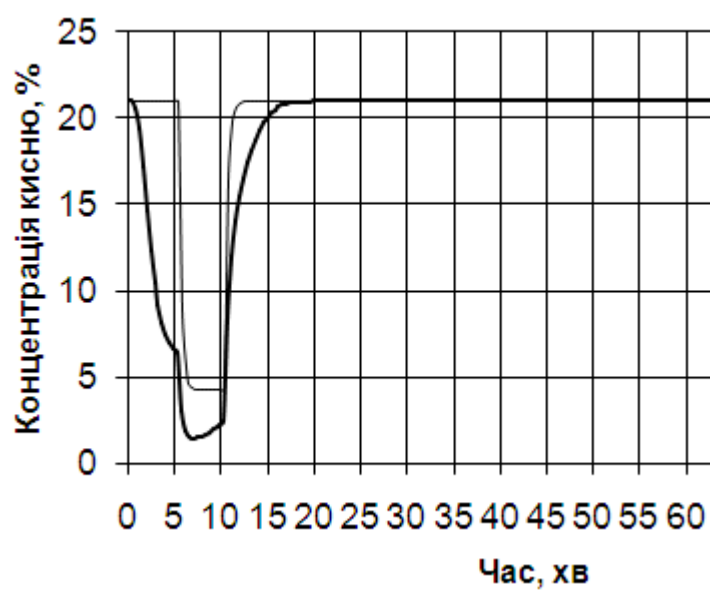


Рис.4. Динаміка зміни концентрацій кисню

**ДОДАТОК Д**  
**ПРОТОКОЛ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ДІОКСИДОМ**  
**ВУГЛЕЦЮ З НАСТУПНОЮ РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ**



Затверджую

Начальник відділу організації  
науково-дослідної роботи

Ю.І.Рудик

Ю.І.Рудик

2014

## Протокол

Експериментального дослідження модельного вогнища пожежі в модельній (вогневій) споруді з визначення параметрів гасіння пожеж

**Дата проведення експерименту:** 23.01.2014 р.

**Умови проведення експерименту:**

- Температура 17 °С
- Атмосферний тиск 94,9 кПа
- Відносна вологість 60 %

**МІСЦЕ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** теплотехнічна лабораторія науково-дослідної лабораторії ЛДУ БЖД

Адреса: м. Львів, вул. Клепарівська, 35

**ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕНЬ:** трьохжильний маслonaповнений кабель на напругу 35 кВ марки АСБ

**ЗРАЗКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** дослідженню піддавався 3 зразки кабельної продукції

**ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ:** Редуктор тиску подачі діоксиду вуглецю, секундомір, термомпари, газовий хроматограф «СНРОМ-5»

**Результати досліджень модельного вогнища пожежі подаванням діоксиду вуглецю з наступною рециркуляцією газового середовища**

Кабельна продукція розміщувалася на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В камеру згоряння завантажили 24 кг маслonaповненої кабельної продукції, з якої 16 кг це горюча ізоляція, масло, кабелі довжиною 1,2 м, частин займають площу 0,5 м<sup>2</sup>.

Запалювання здійснюється при швидкості потоку повітря, на вході в камеру, 0,25 м<sup>3</sup>/хв. Підсмоктування повітря проходить через прямокутний отвір площею 0,078 м<sup>2</sup>.

Підпалюють кабельну продукцію 4 хв. за допомогою газового пальника з робочою довжиною 30 см, висота полум'я 15 см, зі сторони отворів, через які

подається повітря для підтримки горіння. За даний період часу настає стійке полум'яне горіння.

Вільне самостійне горіння відбувається 5 хвилин. Температура швидко зростає за рахунок достатньої кількості кисню в споруді. Найбільший ріст температури 715 °С спостерігається в центрі камери, полум'я рухається до місця підсмоктування повітря.

З 5 до 10 хвилини відбувається подавання діоксиду вуглецю через круглий отвір площею 0,00785 м<sup>2</sup>, час подавання діоксиду вуглецю становить 300 с. На 6 хвилині візуально зафіксовано припинення полум'яного горіння, температура при цьому знизилася до 430 °С. На 10 хвилині подавання діоксиду вуглецю припиняється. Включається в роботу вентилятор рециркуляційного трубопроводу. Витрату діоксиду вуглецю визначено у кількості 1 м<sup>3</sup>/хв.

Таблиця 1. Результати експериментів з визначення температури

№ з/п	Тривалість дослідів хв.	Дослід 1 °С	Розбіжність, %	Дослід 2 °С	Розбіжність, %	Дослід 3 °С	Розбіжність, %	Т сер. °С	Примітки
	0	17		17		17		17	Вільне горіння
	1	88	2	82	5	89	3	87	
	2	218	5	189	9	216	4	208	
	3	442	4	447	3	493	7	461	
	4	703	5	609	9	696	4	670	
	5	745	5	653	8	773	9	710	Подавання діоксиду вуглецю
	6 Припинення полум'яного горіння 430 °С	657	8	743	4	743	4	715	
	7	340	5	294	9	336	4	324	
	8	290	4	293	3	324	7	303	
	9	302	5	262	9	299	4	288	
	10	281	5	243	9	278	4	268	Увімкнення рециркуляції
	11	269	5	233	9	280	9	257	
	12	230	8	260	4	260	4	250	
	13	253	5	219	9	250	4	241	
	14	222	4	225	3	248	7	232	
	15	222	5	192	9	220	4	212	
	20	190	5	166	8	197	9	181	
	25	145	8	164	4	164	4	158	
	30	148	5	128	9	146	4	141	
	35	127	5	110	9	125	4	121	
	40	113	5	98	9	117	9	108	
	45	84	8	95	4	95	4	92	
	50	84	5	72	9	83	4	80	
	55	68	4	68	3	75	7	71	
	60	67	5	58	9	66	4	64	

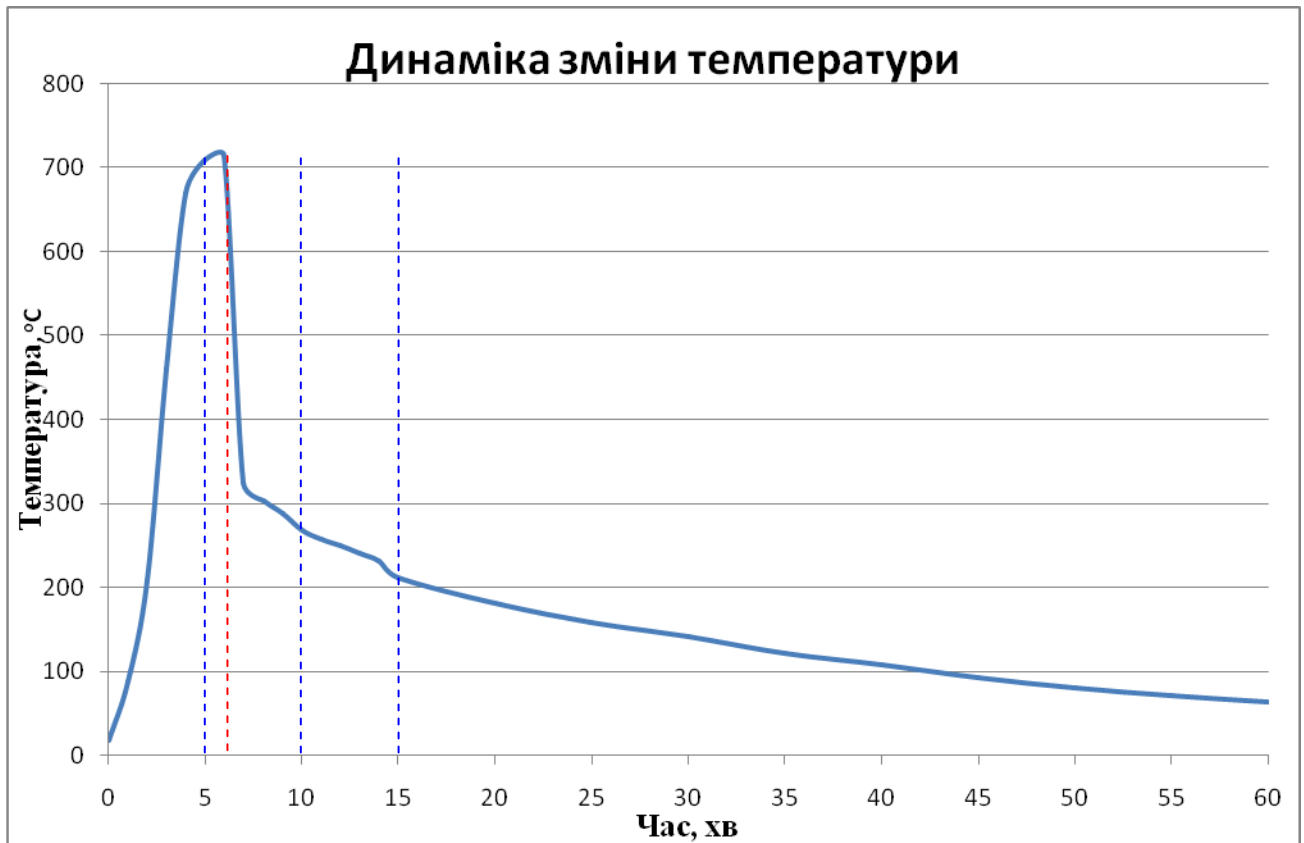


Рис. 1. Динаміка зміни температури у модельній вогневій споруді при подаванні діоксиду вуглецю

Об'єм модельної вогневої споруди становить  $0,48 \text{ м}^3$ .

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу проходить утворення значної кількості продуктів згорання.

Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря становила  $F_{\text{отв.}} = 0,0358 \text{ м}^2$ .

Одночасно з точок А та Б за допомогою шприців відбувається відбір проб газового середовища в модельній вогневій споруді в точці А - на вході та точці Б - на виході з неї з подальшим проведенням аналізу в газовому хроматографі «CHROM-5» з виведенням результатів. Проби відбираються з однаковою періодичністю протягом експерименту.

Обробка експериментальних даних показала, що при виникненні навіть дрібномасштабної пожежі концентрація кисню спочатку різко падає і досягає значення 4,6 % на 6 хв. без урахування часу розпалу. Під час подачі діоксиду вуглецю вона продовжує знижуватися навіть до 2 %, після чого в результаті гасіння пожежі концентрація кисню поступово відновлюється.

Таблиця 2. Результати експериментів з визначення концентрації кисню

№ з/п	Тривалість дослідів, хв.	Дослід 1 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 2 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Дослід 3 O <sub>2</sub> , %	Розбіжність, %	Сер. O <sub>2</sub> , %	Примітки
1.	0	21		21		21		21	Вільне горіння
2.	1	20,58	5	17,83	9	20,38	4	19,6	
3.	2	16,03	4	16,19	3	17,86	7	16,7	
4.	3	10,29	5	8,91	9	10,19	4	9,8	
5.	4	8,08	5	7,08	8	8,39	9	7,7	
6.	5	5,15	8	5,82	4	5,82	4	5,6	
7.	6 Припинення полумене- вого горіння	4,72	5	4,09	9	4,68	4	4,5	Подаван- ня діоксиду вуглецю
8.	7	2,01	4	2,03	3	2,24	7	2,1	
9.	8	2,31	5	2,0	9	2,28	4	2,2	
10.	9	2,41	5	2,09	9	2,39	4	2,3	
11.	10	2,52	5	2,18	9	2,61	9	2,4	
12.	11	2,11	8	2,39	4	2,39	4	2,3	Увімкнен- ня рецирку- ляції
13.	12	2,31	5	2,0	9	2,28	4	2,2	
14.	13	2,01	4	2,03	3	2,24	7	2,1	
15.	14	2,31	5	2,0	9	2,28	4	2,2	
16.	15	2,41	5	2,11	8	2,5	9	2,3	
17.	16	13,98	8	15,8	4	15,8	4	15,2	
18.	17	19,0	5	16,47	9	18,82	4	18,1	
19.	18	18,52	4	18,72	3	20,65	7	19,3	
20.	19	20,89	5	18,1	9	20,69	4	19,9	
21.	20	21		21		21		21	

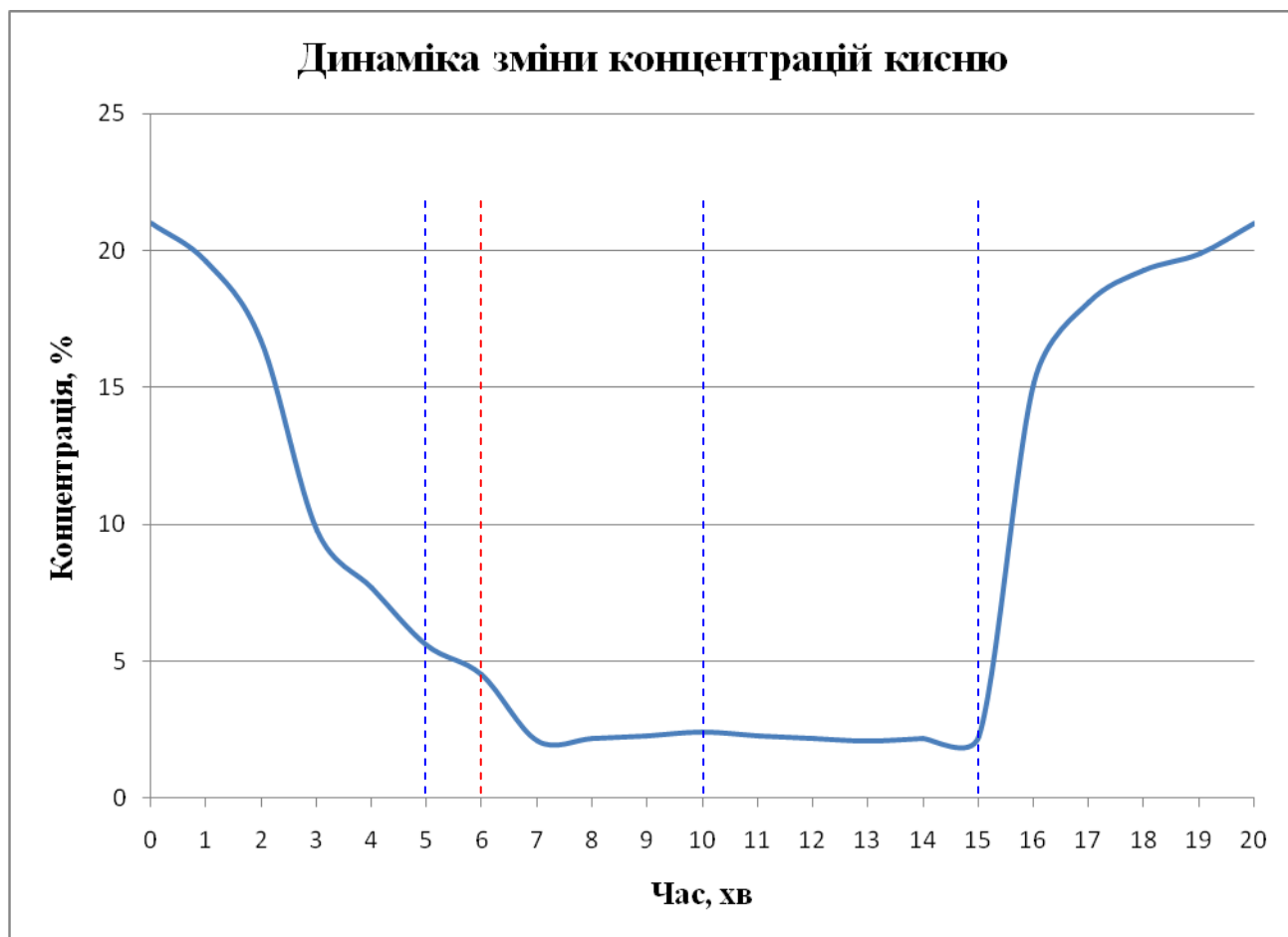


Рис.2. Динаміка зміни концентрацій кисню

**Висновок:** за результатами досліджень встановлено максимальну температуру 715 °С, температуру при якій припинилося полуменеве горіння 460 °С. Концентрація кисню при якій припинилося полуменеве горіння складала 4,6 %.

Начальник науково-дослідної  
лабораторії ЛДУБЖД

В.Л.Петровський

Ад'юнкт ЛДУБЖД  
підполковник служби ЦЗ

В.М.Ковальчик

Результати математичного моделювання при подаванні діоксиду вуглецю з наступною рециркуляцією

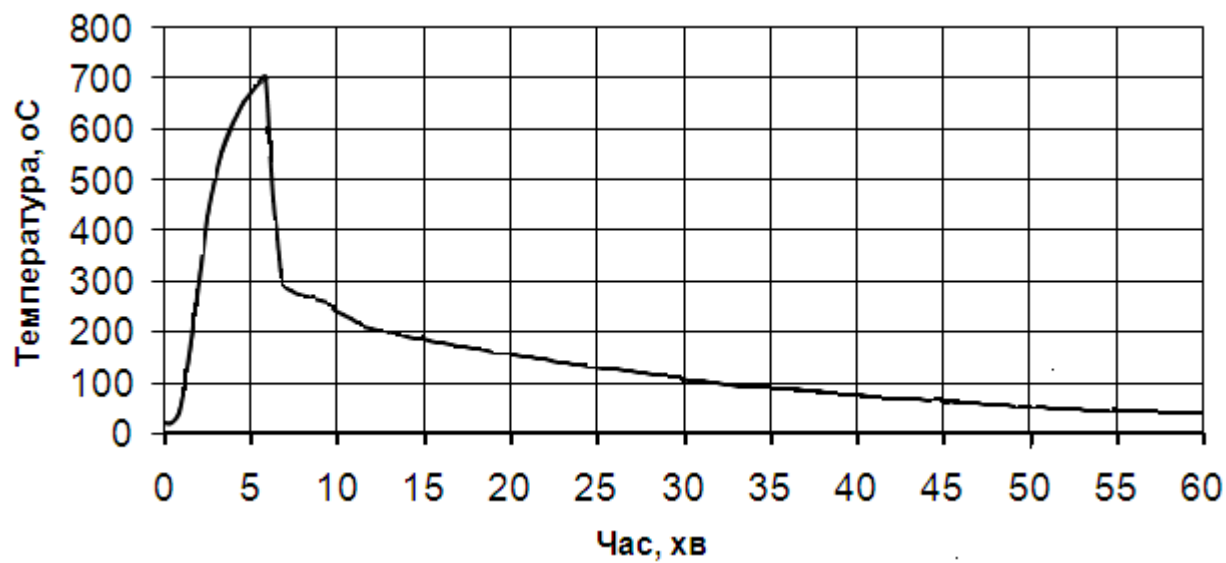


Рис.3. Динаміка зміни температури

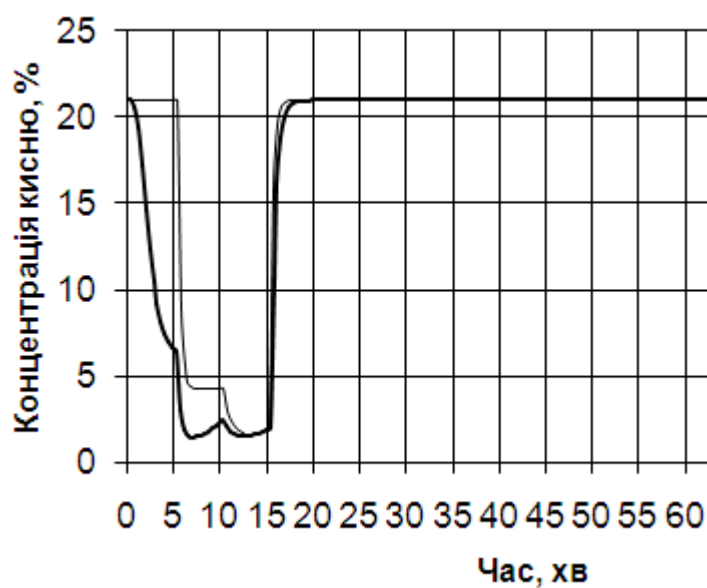


Рис.4. Динаміка зміни концентрацій кисню

Таблиця 1. Порівняння експериментальних результатів температурних режимів при подаванні діоксидом вуглецю на гасіння модельної пожежі

№ з/п	Тривалість дослідів хв.	Вільне горіння °С	Без рециркуляції °С	З рециркуляцією °С	Примітки	
1.	0	16	16	17		Вільне горіння
2.	1	80	82	87		
3.	2	200	203	208		
4.	3	450	456	461		
5.	4	650	655	670		
6.	5	695	699	710		Подавання Діоксиду вуглецю
7.	6	710	710	715		
8.	7	720	320	324		
9.	8	715	300	303		
10.	9	700	285	288		
11.	10	665	270	268		
12.	11	620	260	257		
13.	12	565	370	250		
14.	13	500	320	241		
15.	14	438	270	232		
16.	15	385	248	212		
17.	20	320	208	181		
18.	25	270	185	158		
19.	30	230	160	141		
20.	35	200	145	121		
21.	40	175	130	108		
22.	45	153	115	92		
23.	50	135	103	80		
24.	55	120	91	71		
25.	60	115	83	64		

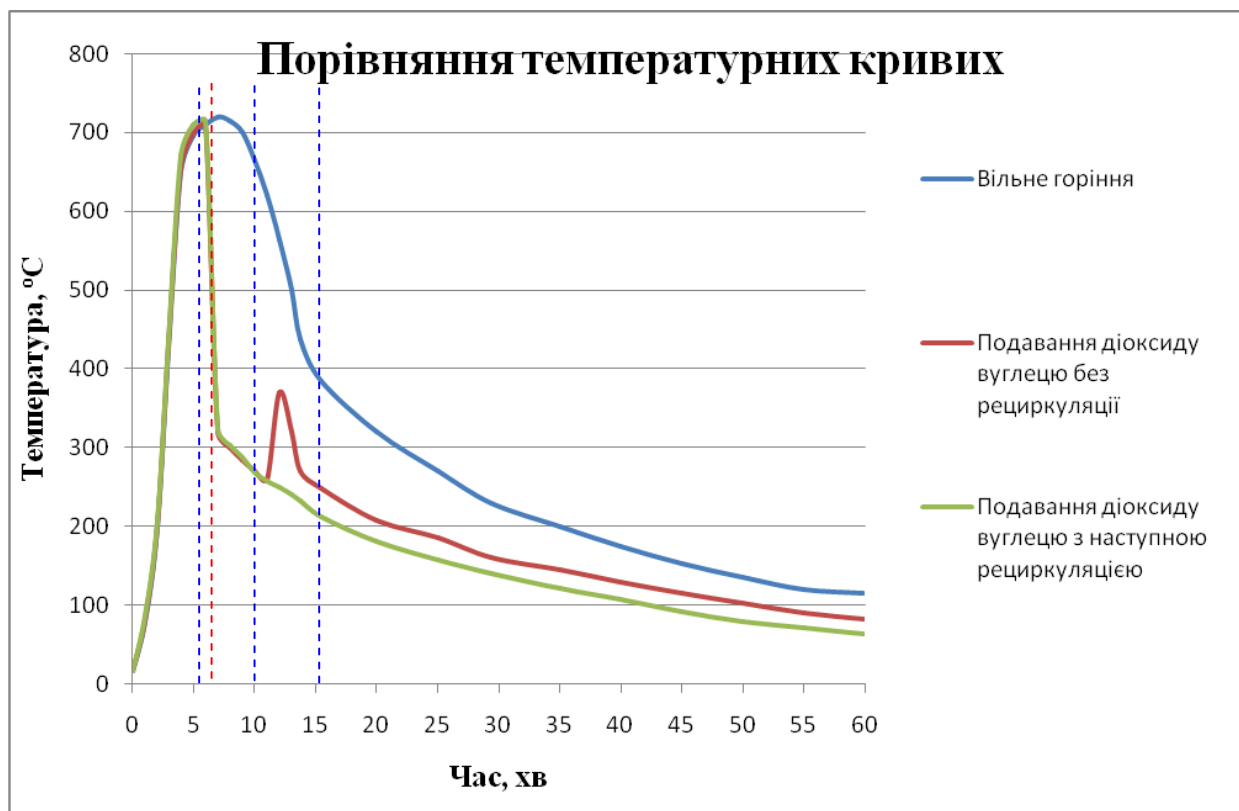


Рис. 1. Динаміка зміни температури у модельній вогневій споруді при подаванні діоксиду вуглецю



**ДОДАТОК Е**  
**ПРОТОКОЛ ПОЛІГОННИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**  
**З ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ В КАБЕЛЬНОМУ**  
**ТУНЕЛІ ШАХТИ «ВІЗЕЙСЬКА»**

Затверджую

Перший заступник начальника

ГУ ДСНС України

Львівської області

полковник служби цивільного захисту



Дідух І.М.

2015 р.

« 12 » червня

### Протокол

**полігонних випробувань в кабельному тунелі шахти «Візейська» за результатами дисертаційної роботи Ковальчика Василя Михайловича на тему «Обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях»**

Комісія в складі: голови – начальника відділу пасивних та активних засобів захисту ГУ ДСНС України у Львівській області, майора служби цивільного захисту, к.т.н. Ковалишина Володимира Васильовича, і членів комісії: – заступника начальника інституту пожежної та техногенної безпеки підполковника служби цивільного захисту, к.т.н. Бойка Тараса Володимировича, провідного наукового співробітника ВОНДД к.т.н., с.н.с. Кириліва Ярослава Богдановича, склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Ковальчика В.М. «Обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях» перевірялись на тренувальному тунелі шахти «Візейська» природних умовах.

В якості горючого навантаження було використано кабельну продукцію загальною масою 100 кг та 200 кг деревини. Горюче навантаження було розміщене на 10м довжини тунелю. Об'єм тунелю становив 120 м<sup>3</sup>. Підпал кабельної продукції здійснювався за допомогою 3л дизельного палива. Температура в зоні горіння контролювалась термодатчиками.

При досягненні температури 600 °С був поданий інертний газ (азот) з 4 транспортних балонів. Газ подавався 7 хв. Продукти згорання охолоджувались в рекуперативному теплообміннику, який підключався до

димосмоктувача ДП-7.

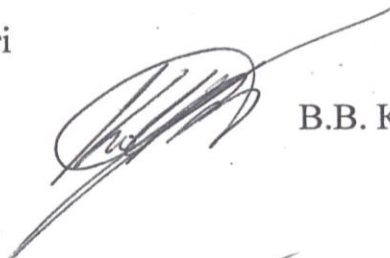
Через 6,5 хвилин горіння було припинене. Рециркуляція газів проводилась 15 хв.

Члени комісії дійшли спільного висновку, що представлені здобувачем результати щодо **обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях** мають науково-практичне значення, що підтверджується експериментальними дослідженнями в тренувальному тунелі шахти «Візейська» і стати підставою для проектування систем пожежогасіння в кабельних тунелях.

Начальник відділу пасивних та активних засобів захисту

ГУ ДСНС України у Львівській області

к.т.н.



В.В. Ковалишин

Провідний науковий співробітник

ВОНДД к.т.н., с.н.с.



Я.Б. Кирилів

Заступник начальника інституту

пожежної та техногенної безпеки,

підполковник вн.сл., к.т.н.



Т.В. Бойко

**ДОДАТОК Є**  
**АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ**  
**РОБОТИ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС**



## АКТ

### про впровадження результатів дисертаційної роботи

**Ковальчика Василя Михайловича**

Комісія в складі: голови – начальника Інституту пожежної та техногенної безпеки, к.т.н. Лина А.С. і членів комісії – професора кафедри «термодинаміки і фізики», к.т.н., доцента Лозинського Р. Я.; заступника начальника кафедри «пожежної тактики та аварійно-рятувальних робіт», к.т.н., доцента Луца В.І., склала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Ковальчика В.В. «Обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях» у вигляді:

- математичної моделі теплогазообміну між зоною горіння і зоною перед осередком пожежі та навколишнім масивом з урахуванням стиснення та розширення газів (врахування стиснення газів призводить до швидкого процесу тепломасообміну, що значно відрізняється від процесу, якщо не враховувати стиснення);

- математичної моделі горіння твердого палива на основі його високотемпературного піролізу та переходу вуглецю зі зв'язаного у вільний газоподібний стан з наступною дифузією з обугленої маси в потік повітря;

- методики та обґрунтування параметрів гасіння пожеж в ізольованих каналах різноманітної протяжності інертними газами з наступною рециркуляцією пожежних газів, в розробці комп'ютерного методу розрахунку параметрів ефективного гасіння пожеж (що дає змогу встановлювати найбільш ефективні параметри способів та засобів пожежогасіння, дозволяє заздалегідь закладати їх в плани ліквідації аварій



подібного типу в ізольованих і напівізольованих протяжних об'єктах із заданими геометричними розмірами);

- уточненого механізму впливу інертних газів на вогнище пожежі; використовуються в навчальному процесі Університету при вивченні предметів «Термодинаміка та теплопередача», «Пожежна тактика» та «Основи розвитку та припинення горіння».

Голова комісії:

Начальник Інституту пожежної

та техногенної безпеки, к.т.н



А.С. Лин

Члени комісії:

Професор кафедри «термодинаміки і фізики»

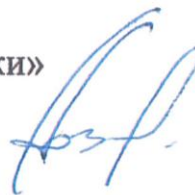
к.т.н., доцент

Заступник начальника

кафедри «пожежної тактики та

аварійно-рятувальних робіт»

к.т.н., доцент



Р.Я. Лозинський



В. І. Луц

**ДОДАТОК Ж**  
**АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ**  
**РОБОТИ В ПРАКТИЧНУ ДІЯЛЬНІСТЬ**

Затверджую

Начальник

У ДСНС України  
у Черкаській області

генерал-майор  
служби цивільного захисту  
к.т.н., професор

«04» \_\_\_\_\_ В.М.Гвоздь 2016 р.

### АКТ

**впровадження за результатами дисертаційної роботи Ковальчика Василя Михайловича на тему «Обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях»**

Комісія в складі: голови – начальника відділу державного нагляду (контролю) у сфері пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту УДСНС України у Черкаській області підполковника служби цивільного захисту Бормотова Олексія Васильовича, і членів комісії: – начальника сектору техногенної безпеки відділу державного нагляду (контролю) у сфері пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту УДСНС України у Черкаській області майора служби цивільного захисту Гвоздя Романа Володимировича, провідного наукового співробітника ВОНДД ЛДУ БЖД к.т.н., с.н.с. Кириліва Ярослава Богдановича, складала цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Ковальчика В.М. «Обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях» впроваджені в практичну діяльність для керування в роботі органів державного нагляду у сфері пожежної, техногенної безпеки та цивільного захисту при проектуванні та експлуатації автоматичних установок газового пожежогасіння та проведенні розрахунків в планах пожежогасіння та інших оперативних документів.



Члени комісії дійшли спільного висновку, що представлені здобувачем результати щодо **обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях** мають науково-практичне значення, що підтверджується їх застосуванням в практичній діяльності підрозділів області.

Використання комп'ютерного методу розрахунку параметрів ефективного гасіння пожеж дало змогу визначати та вибирати найефективніші способи та засоби пожежогасіння, завчасно передбачати ситуацію і розглядати її в планах ліквідації аварійних ситуацій.

Начальник відділу державного нагляду  
(контролю) у сфері пожежної, техногенної безпеки  
та цивільного захисту УДСНС України  
у Черкаській області  
підполковник служби цивільного захисту

О.В.Бормотов

Начальника сектору техногенної безпеки  
відділу державного нагляду  
(контролю) у сфері пожежної, техногенної безпеки  
та цивільного захисту УДСНС України  
у Черкаській області  
майор служби цивільного захисту

Р.В.Гвоздь

Провідний науковий співробітник  
ВОНДД к.т.н., с.н.с.

Я.Б. Кирилів