

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

**КОВАЛЬЧИК ВАСИЛЬ МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 614.844.4

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

Спеціальність 21.06.02 – пожежна безпека

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів-2016

Дисертація є рукописом

Робота виконана у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Ковалишин Василь Васильович**  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, професор кафедри промислової безпеки та охорони праці

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Костенко Віктор Климентович**  
Донецький Національний технічний університет, завідувач кафедри природоохоронної діяльності

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

**Дунюшкін Володимир Олександрович**  
Науково-виробниче об'єднання «Фактор», начальник відділу автоматизованих систем пожежогасіння

Захист відбудеться 31 березня 2016 року о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 Львівського державного університету безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35

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

Автореферат розісланий „29” лютого 2016 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доцент

В.М. Баланюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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.

**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 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 згорання;

- розробити відповідні математичні моделі та з їх застосуванням провести обчислювальні експерименти з виявлення динаміки змінення 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 змінення температури та концентрацій компонентів газового середовища макетної пожежі у випробувальній камері внаслідок дії діоксиду вуглецю, азоту або їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згорання;

- 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 згорання.

*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 згорання.

**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 змінення 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 змінення 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 змінення 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.); IX 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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовані мета і задачі дослідження, викладені основні наукові положення та результати, що виносяться на захист, їх новизна та практична цінність.

**В першому розділі** проведено огляд стану пожежної безпеки кабельних тунелів та проаналізовано існуючі способи гасіння пожеж у них. Для гасіння пожеж у відсіках кабельних тунелів передбачають стаціонарні системи дистанційного та автоматичного пожежогасіння, окрім цього передбачається використання пересувних засобів з подачею від них вогнегасних речовин.

Традиційно гасіння пожеж в кабельних тунелях здійснюють повітряно-механічною піною, розпиленою водою, водяною парою, порошками, інертними газами (азотом, діоксидом вуглецю, хладоном).

Ефективність гасіння пожеж залежить від науково обґрунтованого вибору параметрів подачі вогнегасних засобів.

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

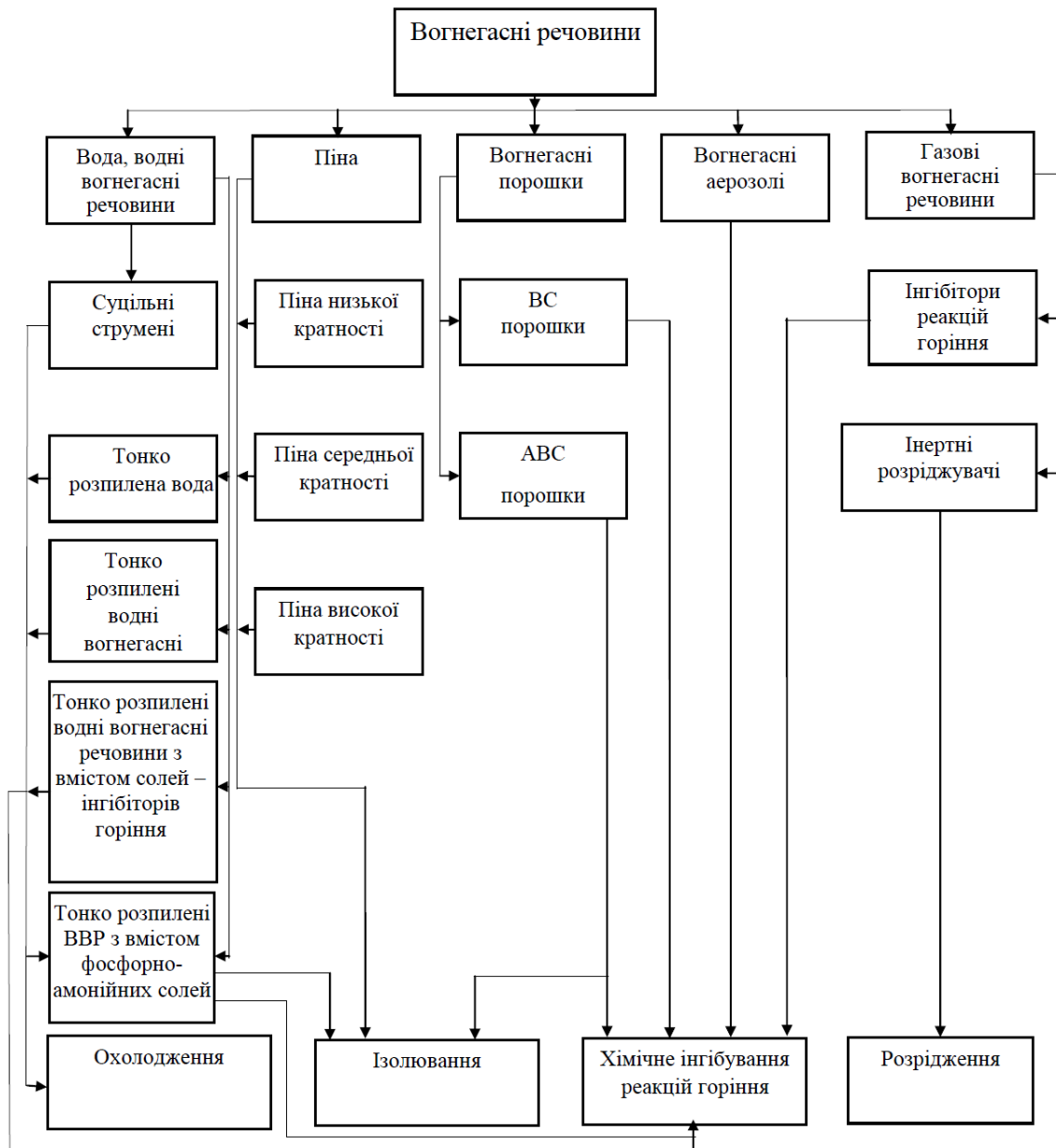


Рисунок 1 – Схема домінуючих чинників вогнегасних речовин у разі подавання їх на гасіння пожеж в кабельних тунелях

Питання пожежної безпеки об'єктів визначаються їх геометричними параметрами, величиною пожежного навантаження, технічним оснащенням системами протипожежного захисту, які повинні забезпечувати швидке виявлення пожежі, увімкнення сигналізації та ліквідацію пожежі в найкоротші терміни з мінімальними матеріальними втратами.

На основі аналізу сучасного стану технологій пожежогасіння, переваг та недоліків їх застосування на об'єктах, показано, що ефективне використання вогнегасних засобів пов'язане з розробкою нових методів та методик розрахунку параметрів їх дистанційної подачі до зони горіння.

В ряді наукових робіт розглядаються процеси тепломасообміну при пожежі та не розглядаються процеси гасіння різноманітними засобами. В роботах пропонується для розрахунку тільки вогнегасна концентрація та концентрація кисню. При цьому не вказується час їх впливу на зону горіння для повного гасіння, не досліджується ефективність впливу тим чи іншим засобом пожежогасіння.

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

Огляд та аналіз відомих математичних моделей розвитку та гасіння пожеж показав, що необхідно дослідити обчислювальним методом процеси інертизації кабельного тунелю газовими вогнегасними речовинами 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 газового середовища при високих температурах, виразивши 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; розробити математичну модель та дослідити обчислювальним методом динаміку розвитку пожежі та її гасіння інертними газами з наступною рециркуляцією компонентів газового середовища в замкнутому контурі.

Застосування засобів комп'ютерного моделювання розвитку та гасіння пожежі дасть змогу спростити проведення проектних робіт та розрахунків з одночасним зменшенням собівартості при забезпеченні протипожежного захисту об'єкта.

**У другому розділі** розглянуті процеси нестационарного переносу інертних газів (азоту та діоксиду вуглецю) в кабельному тунелі. При цьому враховано, що при заповненні азотом або діоксидом вуглецю в замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємах кабельних тунелів буде різко змінюватися склад повітря спочатку безпосередньо біля місця подачі інертного газу, а пізніше на підступах до зони горіння та в самій зоні горіння. Для описання процесу переносу інертного газу використано рівняння нестационарної конвективної його дифузії у вигляді

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} + \frac{\partial(uZ)}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \gamma(Z_0 - Z), \quad (1)$$

де  $Z$  – концентрація інертного газу, %;  $Z_0$  – концентрація інертного газу в навколишньому середовищі до гасіння пожежі, %;  $u$  – швидкість газоповітряної суміші вздовж осі координат, м/с;  $D_x$  – коефіцієнт турбулентної дифузії інертного газу вздовж напрямку руху газоповітряної суміші, м<sup>2</sup>/с;  $\gamma$  – коефіцієнт поглинання інертного газу стінками каналу, 1/с.;  $\tau$  – час з моменту подавання інертного газу в канал, с;  $x$  – координата вздовж напрямку руху газоповітряної суміші, м.



Початкову умову для рівняння (1) представлено у вигляді  $Z(x,0) = Z_0$ , а граничні умови задані: 1)  $Z(0,\tau)_1 = Z(\tau)$  – ліворуч, в місці подавання інертного газу; 2)  $\frac{\partial Z(L,\tau)}{\partial x} = \beta[(Z_0 - Z(L,\tau))]$  – праворуч, в місці встановленої ізоляційної перегородки. Тут  $\beta$  – коефіцієнт газообміну через перегородку,  $1/m$ ;  $L$  – довжина каналу, м.

Функція  $Z(\tau)$  є довільною та повинна відображати процеси перемішування повітря з інертним газом в місці його подачі.

Існує декілька складних аналітичних рішень рівняння (1) при постійному подаванні інертного газу та при перемінному за експонентою його подавання.

Однак рішення рівняння (1) надає великі можливості для вивчення закономірностей заповнення замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємів кабельних тунелів інертним газом при постійному чи змінному його подаванні.

Для отримання рішення задачі, рівняння (1) представлене в критеріальному вигляді та в кінцевих різницях проти потоку:

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

де  $Cu = u\Delta t / \Delta x$  – критерій 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;  $\Delta t$  – крок за часом, с;  $m$  – номер вузла на осі координат  $x$ ;  $n$  – номер часового шару.

Розроблена математична модель нестационарного переносу інертного газу дає змогу дослідити усі закономірності заповнення замкнених та напівзамкнених технологічних об'ємів кабельних тунелів інертними газами при постійному або перемінному їх подаванні з будь-якою тривалістю за часом.

На рис. 2 показано розподіл концентрації інертного газу вздовж каналу в різний час (різні кроки за часом) з моменту його постійного подавання. Розрахунок проводився за формулою (2) при критеріях моделювання:  $Cu = 0,5$ ;  $Fo = 0,15$ ;  $\bar{\gamma} = 0,01$ . Як видно (рис. 2), з протіканням часу канал все більше заповнюється інертним газом та через 50 кроків відбувається його майже повне заповнення. Попри те з урахуванням поглинання інертного газу стінками каналу вдається заповнити його віддалену частину тільки до 70 %.

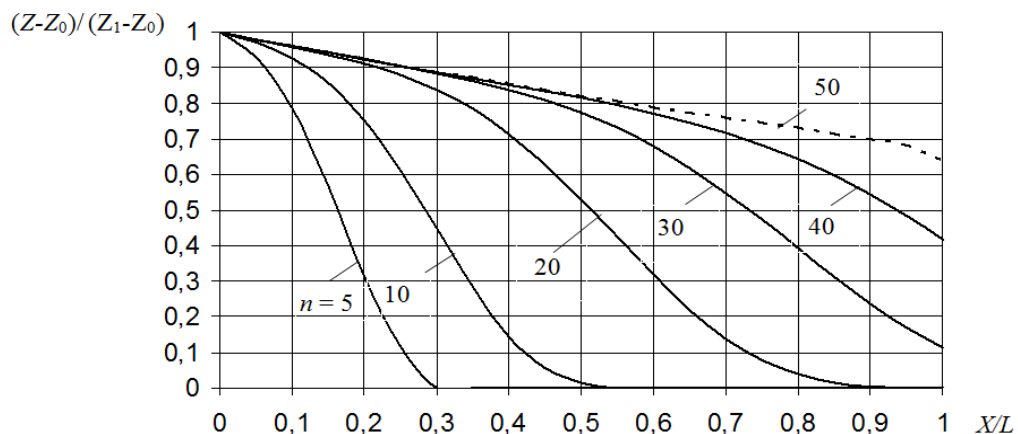


Рисунок 2 – Розподіл безрозмірної концентрації інертного газу по довжині каналу в різний час з моменту його подавання з поглинанням (штрихова лінія означає завершення подавання інертного газу)

Результати моделювання показують, що при довжині каналу  $L = 40$  м та відстані до зони горіння  $x = 36$  м, концентрація інертного газу в цьому місці буде становити 0,7 від максимального значення. Якщо в місці подавання діоксиду 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, по довжині каналу в результаті поглинання концентрація діоксиду в зоні горіння буде рівною 35 %. Тоді концентрація кисню тут стане рівною 13 %, що недостатньо для гасіння пожежі.

Довготривале стаціонарне подавання інертного газу дає змогу оцінити, яка концентрація інертного газу буде в зоні горіння. В цьому випадку рішення рівняння (1) при  $t \rightarrow \infty$  має вигляд

$$Z(x) = Z_0 + (Z_1 - Z_0) \exp\left(-\frac{2\gamma x}{u + \sqrt{u^2 + 4\gamma D_x}}\right). \quad (3)$$

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту використані експериментальні дані НДІГРС, отримані при заповненні азотом ( $N_2$ ) та діоксидом вуглецю ( $CO_2$ ) ізолюваних гірничих виробок.

В результаті встановлено, що коефіцієнт поглинання інертного газу стінками каналу може бути визначений за формулою

$$\gamma = 16 \frac{D_0 + pu\sqrt{S}}{S}. \quad (4)$$

Опрацювання розрахункових та експериментальних даних при подаванні вуглекислого газу показали, що емпірична константа  $p = 2,8 \cdot 10^{-4}$ . При цьому коефіцієнт молекулярної дифузії газів може бути прийнятий  $D_0 = 2,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с. При подаванні азоту емпірична константа в цьому випадку  $p = 1,5 \cdot 10^{-4}$ .

Експериментальні дослідження показали, що в місці подавання азоту або діоксиду вуглецю його концентрація не одразу досягає своєї межі, а відбувається спочатку заповнення деякого об'єму за експоненціальною залежністю. 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 в якому відбувається перемішування газів, буде знаходитися в межах  $V = 64 - 1667$  м<sup>3</sup>, що не відповідає дійсності. Так, при площі поперечного перерізу каналу  $S = 4$  м<sup>2</sup> отримаємо довжину динамічної зони, рівної  $\Delta x = 16 - 417$  м, яка буде зменшуватися зі збільшенням швидкості, що заперечує теорію струменів газів.

Другий підхід може бути запропонований, якщо припустити, що інтенсивність перемішування пов'язана з поперечними пульсаціями швидкості. Чим більша швидкість, тим більші повинні бути пульсації та краще перемішування газів. Тому введемо в розгляд коефіцієнт перемішування газів. Тоді при експоненціальному законі заповнення зони перемішування функція  $Z(t)$  буде мати вигляд

$$Z(t) = Z_1 - (Z_1 - Z_0) \exp(-kut/\sqrt{S}), \quad (5)$$

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

$k$  – коефіцієнт перемішування газів в поперечному перерізі.

Обробка експериментальних даних показала, що коефіцієнт перемішування газів може бути визначений за формулою

$$k = \frac{u}{70(0,3u + 0,7)}. \quad (6)$$

Порівняння розрахункових кривих з експериментальними даними, показали, що вони задовільно збігаються один з одним, що підтверджує правильність запропонованої теорії перемішування газів в місці їх подавання завдяки поперечним пульсаціям швидкості потоку.

**В третьому розділі** розроблена математична модель розвитку пожежі та поширення горіння з урахуванням стиснення та розширення газового середовища, що описується системою рівнянь тепломасообміну.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} &= a_x \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} + 16a_y \frac{\bar{T}_c - \bar{T}}{S} + \frac{q}{\rho_0 c_p T_0}; \\ \frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} &= D_x \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + 16D_y \frac{1 - \bar{C}}{S} - M / \rho_0; \\ \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\bar{T} = T/T_0$  – безрозмірна температура суміші газів;  $\bar{\theta} = \theta/T_0$  – безрозмірна температура порід, що оточують канал;  $\bar{C} = C/C_0$  – безрозмірна концентрація кисню;  $C_0$  – початкова концентрація кисню, %;  $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$  – масова швидкість газів вздовж каналу, м/с;  $\rho$  – змінна густина газів, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_0$  – густина повітря при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – питома теплоємність газів при постійному тиску, Дж/(кг·К);  $T_0$  – температура повітря при нормальних умовах, К;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності порід, м<sup>2</sup>/с;  $y$  – поперечна координата вглиб порід, м;  $D_x$  – коефіцієнт турбулентної дифузії кисню вздовж напрямку потоку газів, м<sup>2</sup>/с;  $D_y$  – коефіцієнт турбулентної дифузії кисню в поперечному перерізі каналу, м<sup>2</sup>/с;  $q$  – інтенсивність внутрішнього джерела тепла при горінні, Вт/м<sup>3</sup>;  $M = \delta q / H_c$  – інтенсивність джерела поглинання кисню при горінні, кг/(с·м<sup>3</sup>);  $H_c$  – теплота згорання легких речовин, кДж/кг;  $\delta$  – емпірична константа.

Отримана система рівнянь (7) шляхом переходу від тривимірних рівнянь до одновимірних відрізняється від звичайних рівнянь переносу якої-небудь субстанції врахуванням стиснення та розширення газового середовища шляхом введення масової швидкості та множника  $T_0/T$  перед похідною температури або концентрації кисню за часом.

Для визначення джерел тепла в зоні горіння, що входять в систему рівнянь (7), замість емпіричних залежностей використана та вдосконалена модель, запропонована В. В. Ковалишиним. Модель горіння твердого палива основана на тому, що надходження при піролізі продуктів горіння в потік повітря пов'язане з його дифузиею та рухом в порах та тріщинах, в результаті чого формула для описування інтенсивності тепловиділення при горінні представлена у вигляді

$$q = \frac{\chi v_0 H_c b}{2S} \frac{C}{C_0} k_1 [(\tau - x/w) + |\tau - x/w|] \exp[-k_1(\tau - x/w)], \quad (8)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт неповноти згоряння горючого матеріалу;  $v_0$  – початкова масова швидкість надходження продуктів піролізу в потік повітря, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $b$  – ширина поверхні термічного розкладання, м;  $k_1$  – показник швидкості реакції при піролізі, 1/с;  $w$  – швидкість переміщення осередку пожежі, м/с.

Введення модуля числа в формулу (8) показує, що множник перед експонентою перетворюється в нуль, якщо час  $\tau$  менший від часу  $x/w$  переміщення переднього фронту горіння до заданого місця.

На рис. 3 представлені криві розвитку та переміщення осередку горіння вздовж каналу.

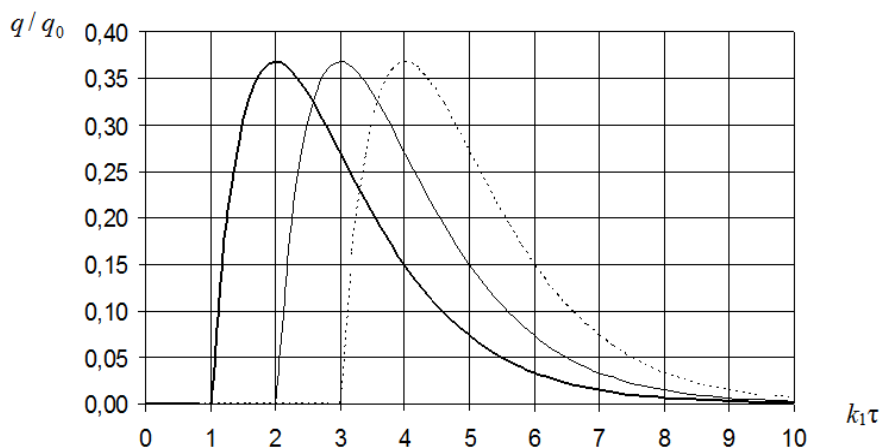


Рисунок 3 – Криві розвитку та переміщення осередку горіння вздовж каналу (товста лінія –  $k_1x/w = 1$ , тонка лінія –  $k_1x/w = 2$ , штрихова лінія –  $k_1x/w = 3$ )

Тут  $q_0 = \chi v_0 H_c b C / (C_0 S)$  – константа інтенсивності тепловиділення, Вт/м<sup>3</sup>.

Як видно (рис. 3), доти поки фронт полум'я не досягнув визначеної відстані від місця виникнення пожежі, горіння там відсутнє. Потім в місці розміщення фронту полум'я відбувається дуже швидкий розвиток піролізу та виділення його газоподібних продуктів з подальшим горінням та затуханням протягом визначеного проміжку часу.

Запропонована формула (8), на відміну від відомих емпіричних і аналітичних залежностей, вперше одночасно враховує як процес розвитку горіння твердого матеріалу, так і його вигорання з урахуванням переміщення фронту полум'я.

Формула (8) призначена для використання її в рівняннях тепломасообміну (7), як функція джерел теплоти та інтенсивності витрати кисню при горінні твердого матеріалу, яка буде впливати на температуру в зоні горіння і на концентрацію кисню.

**В четвертому розділі** викладені результати моделювання розвитку та гасіння пожежі інертними газами в кабельних тунелях. Для обчислювального моделювання розвитку та гасіння пожежі з наступною рециркуляцією суміші газового середовища в замкненому контурі використана зональна модель, шляхом умовного розділення каналу на дві зони: перед зоною горіння довжиною  $l$  та безпосередньо зону горіння довжиною  $L - l$ . Це спрощує задачу та дає змогу розглядати процеси тепломасообміну тільки у часі в кожній зоні.

На рис. 4 приведена схема гасіння пожежі в напівзамкненому об'ємі кабельних тунелів із застосуванням стельових насадок радіального типу

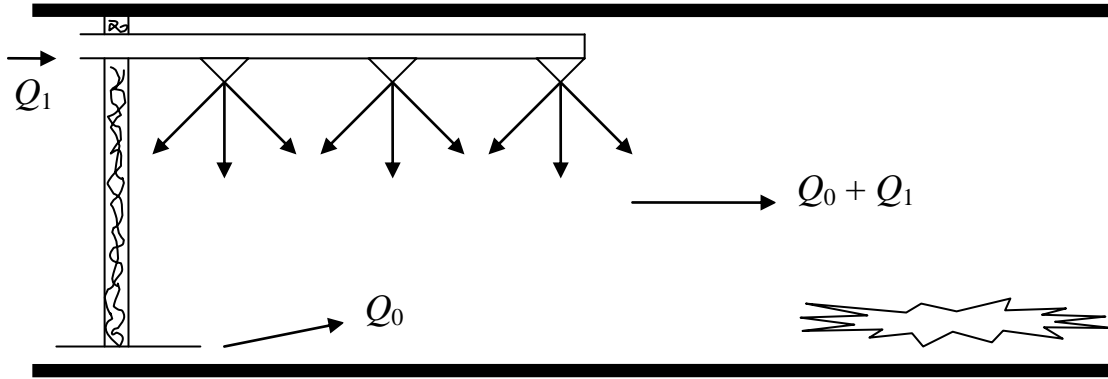


Рисунок 4 – Схема гасіння пожежі в кабельному тунелі із застосуванням стельових радіальних насадок для подачі інертних розріджувачів

Для обчислювальних розрахунків використана система рівнянь (7) та її представлення в кінцевих різницях проти потоку для двох зон при допущенні, що дифузійне перенесення маси і тепла є дуже незначним ( $a_b = D_x \approx 0$ ) в порівнянні з конвективним переносом суміші газів. В результаті система рівнянь (7) приведена до вигляду

$$\begin{aligned}\bar{\zeta}^{n+1} &= \frac{\bar{\zeta}^n + \bar{\zeta}_0^{n+1} Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}{1 + Cu \Delta x_2 / \Delta x_1 + \bar{\gamma}_2}; \\ \bar{C}^{n+1} &= \frac{\bar{C}^n + \bar{T}^n (Cu \bar{\zeta}^{n+1} + \bar{\gamma}_2)}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_2 + \delta \bar{q}^n)}; \\ \bar{T}^{n+1} &= \bar{T}^n \frac{1 + Cu + \bar{\gamma}_1 \bar{\theta}^n + \bar{q}^n \bar{C}^n}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_1)}; \\ \bar{\theta}^{n+1} &= \frac{\bar{\theta}^n + \bar{a} (\bar{T}^n + 2)}{1 + 3\bar{a}},\end{aligned}\quad (9)$$

де  $\bar{\zeta}$  – безрозмірна концентрація кисню перед зоною горіння;  $\bar{\zeta}_0$  – безрозмірна концентрація кисню в місці подавання інертного газу;  $n$  – номер кроку за часом;  $\bar{\gamma}_1 = 8a_y \Delta \tau / S$  – безрозмірний коефіцієнт теплообміну зі стінками каналу в зоні горіння;  $\bar{\gamma}_2 = 16D_y \Delta \tau / S$  – безрозмірний коефіцієнт поглинання інертного газу;

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

$\bar{q}_0$  – відносне максимальне тепловиділення при пожежі;  $\bar{a} = \frac{a \Delta \tau}{2\Delta y^2}$  – безрозмірний коефіцієнт температуропровідності навколишнього масиву.  $\Delta \tau$  – крок за часом, с;  $\Delta y$  – крок в глибину навколишнього масиву, м.

Джерело тепловиділення при горінні представлене в аналітичному вигляді

$$\bar{q}^n = \bar{q}_0 kn \Delta \tau \exp(-kn \Delta \tau). \quad (10)$$

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

За початкові умови перед виникненням пожежі для системи рівнянь (9) прийнято:  $\bar{\zeta}_0 = \bar{C}_0 = \bar{T}^0 = 1$ . Граничні умови при подаванні інертного газу на вході мають такий вигляд

$$\bar{\zeta}_0^{n+1} = 1 + 0,25 \left( 1 + \frac{n - n_1}{|n - n_1|} \right) \left( 1 + \frac{n_2 - n}{|n_2 - n|} \right) \left\{ \left( \frac{Q_0}{Q_0 + Q_1} - 1 \right) [1 - \exp(-\tilde{u} n \Delta \tau)] \right\}, \quad (11)$$

де  $Q_0$  – витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;  $Q_1$  – витрата інертного газу, м<sup>3</sup>/с;  $n_1$  та  $n_2$  номери часових шарів відповідно початку та завершення подавання інертного газу.

Аналіз залежності (11) 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 за експонентою. При рециркуляції приймається, що концентрація кисню на вході в першу зону дорівнює концентрації кисню на виході з другої зони:  $\bar{\zeta}_0 = \bar{C}$ .

Розроблені алгоритм та програмне забезпечення для розрахунку за часом динаміки зміни 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.

Паралельно з теоретичними дослідженнями проведено експериментальні дослідження гасіння дрібномасштабної пожежі в модельній вогневій споруді, що являє собою камеру довжиною 2 м, висотою 0,6 м і шириною 0,4 м.

Схема експериментальної модельної «вогневої» споруди об'ємом 0,48 м<sup>3</sup> для дослідження параметрів гасіння пожежі наведена на рис. 5.

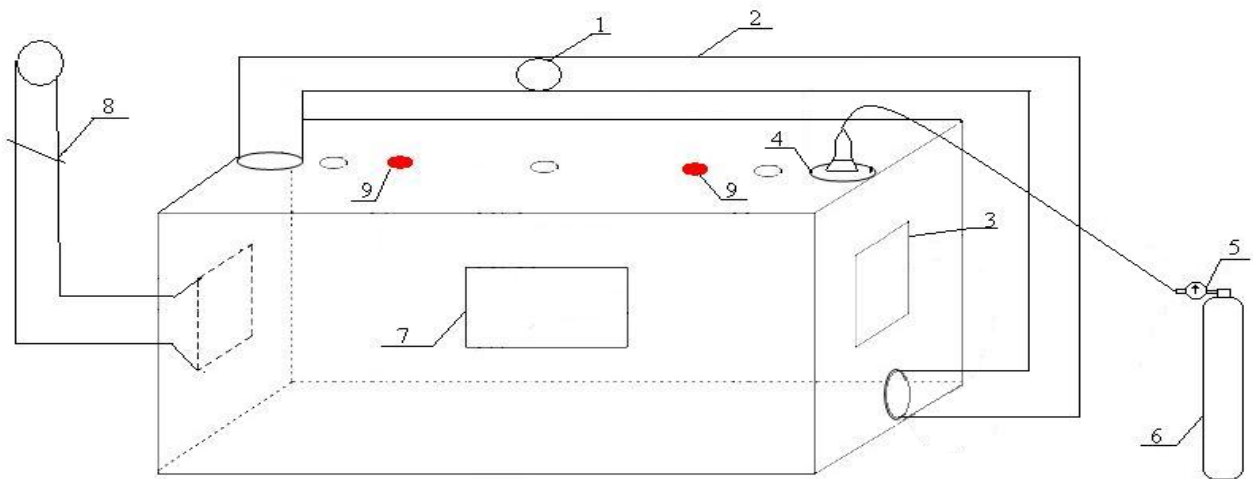


Рисунок 5 – Схема модельної вогневої споруди для гасіння пожежі кабельної продукції під час досліджень та випробувань:

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

Схема розміщення термоперетворювачів та отворів для забору проб газового середовища наведена на рис. 6.

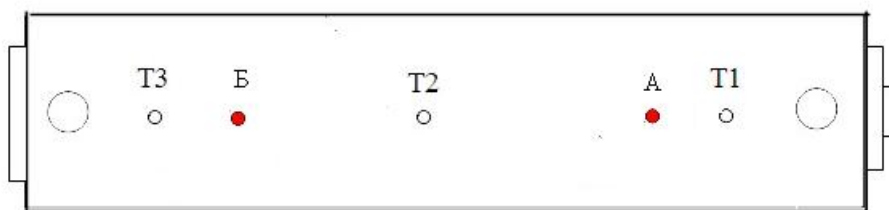


Рисунок 6 – Схема розташування термопар та отворів для забору проб газового середовища модельної вогневої споруди

Кабельна продукція розміщується в лотках на висоті 0,2 м та 0,3 м від нижнього рівня камери. 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 м<sup>2</sup>. Підпалюють кабельну лінію протягом 4 хв газовим пальником з робочою довжиною 0,3 м, висота полум'я 0,15 м, зі сторони отворів, через які подається повітря для підтримки горіння. За цей період часу настає стійке полуменеве горіння.

Запалювання здійснюється при витраті потоку повітря 0,25 м<sup>3</sup>/хв на вході в камеру. Підсмоктування повітря відбувається через отвір прямокутної форми з площею 0,078 м<sup>2</sup>. Подавання газових вогнегасних речовин здійснюється через круглий отвір площею 0,00785 м<sup>2</sup>.

Ряд експериментів в камері було проведено при гасінні пожежі азотом та діоксидом вуглецю при середній швидкості повітря 0,2 м/с.

Розрахунки проводились за формулою (9) при числі Куранта  $Cu = 1$ ;  $\bar{q}_0 = 8$ ;  $\bar{y}_2 = 0$ ;  $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 2$  м;  $\tau_0 = 4$  хв.

На рис. 7 представлені результати змінення за часом температури газового середовища в модельній вогневій споруді при подаванні азоту (а) та діоксиду вуглецю (б).

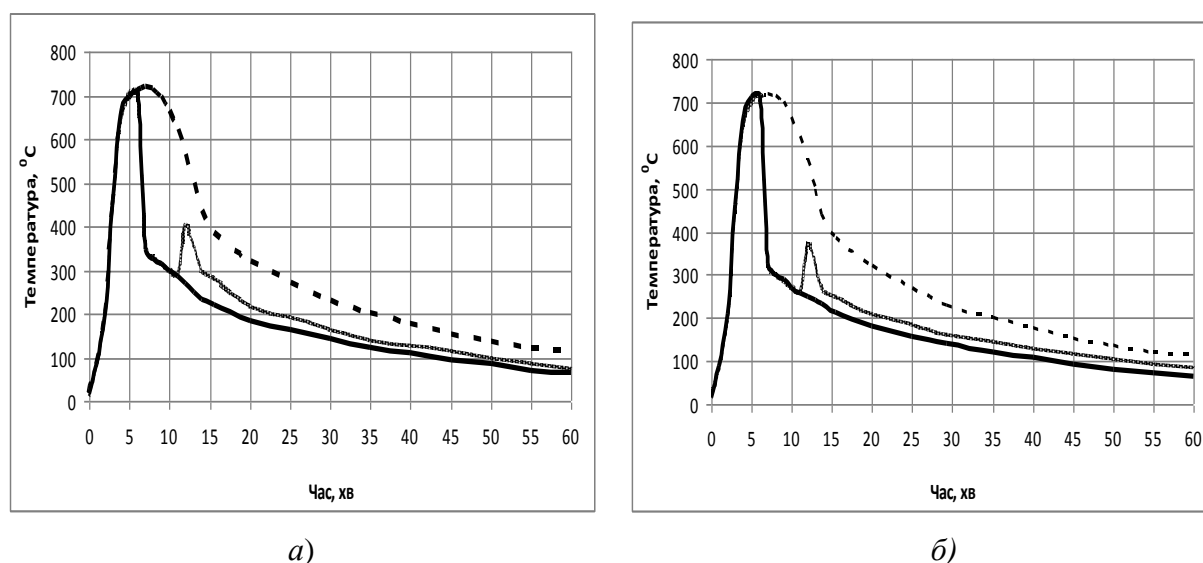


Рисунок 7 – Динаміка зміни температури при гасінні пожежі азотом (а) та діоксидом вуглецю (б) (штрихова лінія – без подавання, тонка лінія – гасіння без рециркуляції, товста лінія – гасіння з наступною рециркуляцією)

Азот або діоксид вуглецю подавався в камеру з 5 хв по 10 хв з моменту виникнення вільного горіння. В інших експериментах була включена рециркуляція суміші газового середовища після припинення подавання інертного розріджувача також протягом 5 хв.

Подавання азоту з витратою  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$  привело до зниження концентрації кисню в камері до 5 %. Кращі результати спостерігаються при подаванні діоксиду вуглецю з витратою також  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$ , що привело до зниження концентрації кисню в камері до 4,5 %.

Як видно (рис. 7 а), подавання азоту протягом 5 хв привело до зниження температури до  $200^\circ\text{C}$  без рециркуляції на 22-й хв, а з рециркуляцією на 17-й хв. Встановлено, що додаткова рециркуляція у цих випадках приводить до пониження температурних режимів загалом на 17 %, та скорочення часу гасіння пожежі на 16 %.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та дали змогу обґрунтувати параметри гасіння пожеж інертними газами з наступною їх рециркуляцією.

Формула для визначення концентрації кисню по довжині каналу

$$C(x) = C_0 + (C_1 - C_0) \exp\left(-\frac{px}{\sqrt{S}}\right). \quad (12)$$

В якості прикладу прийемо, що витрата повітря при подаванні інертного газу становить його половину. Тоді гранична концентрація азоту буде дорівнювати  $N_2 = 93 \%$ , а концентрація діоксиду вуглецю –  $\text{CO}_2 = 67 \%$ . 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 рис. 8 представлені криві розподілу граничної концентрації кисню вздовж каналу, заповненого інертним газом за даними розрахунку за формулою (12).

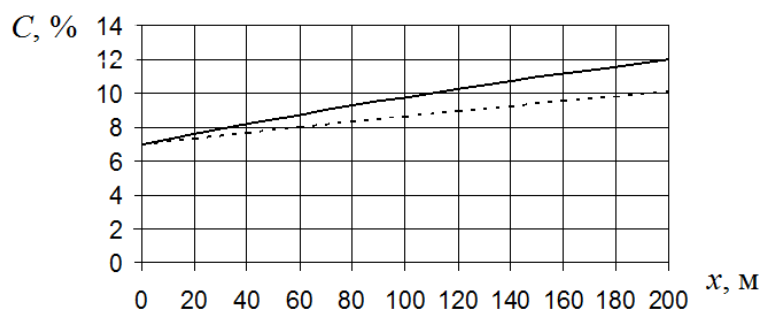


Рисунок 8 – Криві граничного розподілу концентрацій кисню вздовж каналу, заповненого азотом (штрихова лінія) та заповненого діоксидом вуглецю (суцільна лінія)

З порівняння кривих (рис. 8) випливає, що гасіння пожежі 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 пожежі 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.

**В п'ятому розділі** встановлена область застосування і тактико-технічні можливості впливу на зону горіння інертними газами, розроблена методика розрахунку параметрів гасіння пожежі інертними газами при їх поглинанні стінками каналу та ефективності впливу на зону горіння азотом та вуглекислим газом з наступною рециркуляцією суміші газового середовища.

До проведення розрахунку вибираємо інертний газ – азот або діоксид вуглецю, задаємо його витрату, а витрату іншого інертного газу приймаємо рівним нулю.

Далі приймаємо витрати повітря та їх витрату через ізольований об'єм з його геометричними параметрами (довжиною відсіку кабельного тунелю, відстанню від місця подачі інертного газу до зони горіння).

Метою розрахунку є визначення:

- коефіцієнта поглинання інертного газу залежно від відстані до осередку пожежі;
- очікуваної концентрації кисню в зоні горіння;
- температури в зоні горіння без застосування інертних газів;
- очікуваної температури в зоні горіння при заданому часі її гасіння;
- часу гасіння пожежі до температури 100 °С з наступною рециркуляцією інертних розріджувачів та їх бінарних сумішей з продуктами згорання.

Розрахунок параметрів гасіння пожеж (концентрацій кисню і температури в зоні горіння та 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 пожежі дає можливість прослідкувати, як змінюється з часом ситуація в зоні горіння до тих пір, поки пройде не менше двох годин з часу виникнення горіння.

Алгоритм розрахунку за часом динаміки зміни температурного режиму та концентрацій газового середовища представлений на рис. 9.

Результати розрахунку в зоні горіння надаються в наочному графічному вигляді як без застосування засобів пожежогасіння, так і при подачі інертного газу з наступною рециркуляцією. Це дає змогу наочно аналізувати ефективність застосування того чи іншого інертного газу і вибирати відстань до осередку пожежі для подачі інертного газу, його витрату, визначати загальну кількість необхідного газу та час інертизації атмосфери ізольованого відсіку тунелю.

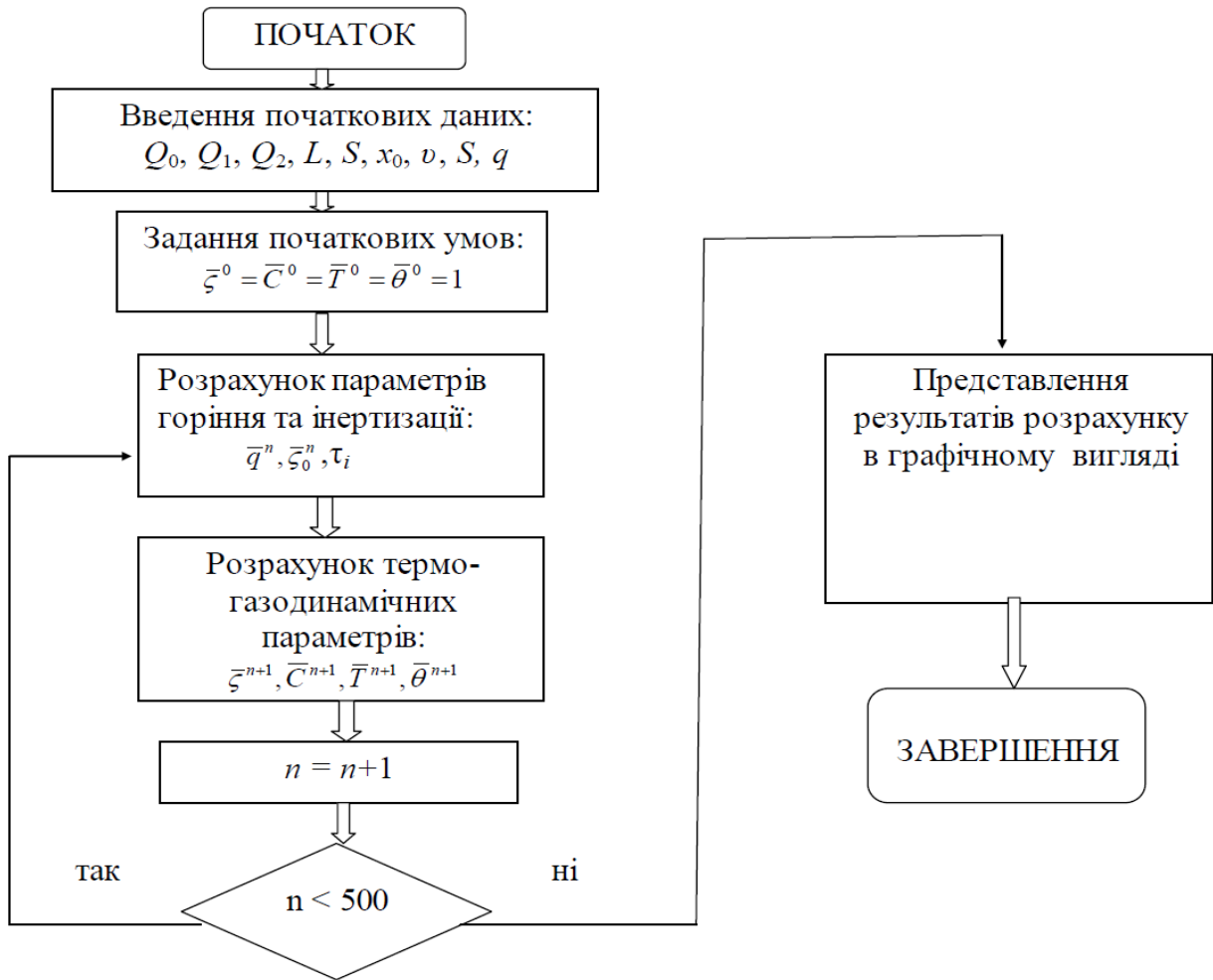


Рисунок 9 – Алгоритм розрахунку параметрів гасіння пожеж інертними розріджувачами в кабельних тунелях

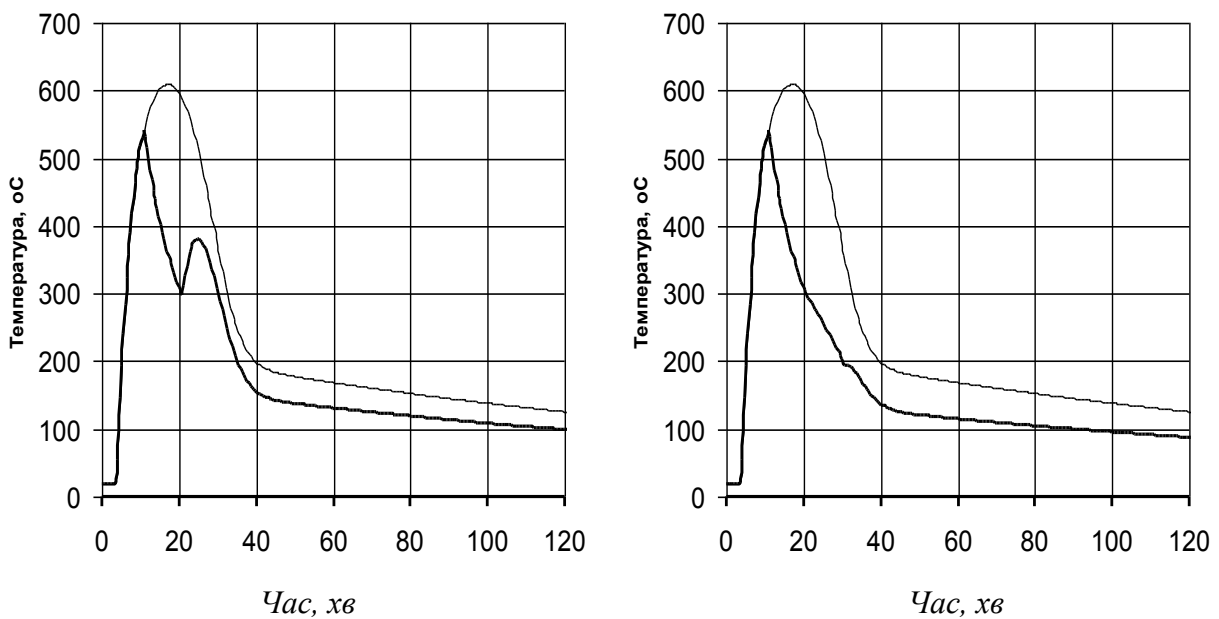


Рисунок 10 – Динаміка зміни температури в ізольованому відсіку довжиною 40 м при подаванні вуглекислого газу без рециркуляції (ліворуч) та з наступною рециркуляцією (праворуч), тонка лінія – вільне горіння

## 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 методика 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 змінення 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  $0,48 \text{ м}^3$  встановлено динаміку змінення температури та концентрацій компонентів газового середовища внаслідок дії діоксиду вуглецю, азоту та їх бінарних сумішей з рециркульованими продуктами згоряння;

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 повинно здійснюватися 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 технологічний 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;

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 ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. 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.

2. Ковальчик В. М. Моделювання числовим методом подавання інертного газу до осередку пожежі на значні відстані / В. М. Ковальчик, В. В. Ковалишин // Науковий вісник. – Київ : УкрНДІЦЗ, 2014. № 1(29) – С. 144-150.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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 Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників (23-24 вересня). – Київ, 2014. – С. 142-143.

9. 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, 2015. – С. 184-186.

10. 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. - практ. конф. з міжнародною участю (09-10 жовтня). – Черкаси, 2015. – С. 255-258.

### АНОТАЦІЯ

**Ковальчик В. М.** Обґрунтування параметрів гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. – Львівський державний університет безпеки життєдіяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій, Львів, 2016.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності гасіння пожеж інертними газами в кабельних тунелях шляхом розробки та впровадження комп'ютерної системи науково обґрунтованого прийняття рішень, які враховують вплив вибору конкретного інертного газу, часу та інтенсивності його подачі до осередку пожежі.

Проведений комплекс теоретичних та експериментальних досліджень розвитку і гасіння пожежі інертними газами в кабельних тунелях з урахуванням піролізу та дифузії утворених газоподібних продуктів в твердому матеріалі, їх змішування з повітрям та інертними газами, що впливають на процеси горіння.

Розроблена математична модель переносу до осередку пожежі інертних газів з урахуванням їх поглинання в кабельних каналах. Розроблена математична модель розвитку пожежі при розширенні газів в зоні високих температур і впливі на зону горіння того чи іншого інертного газу, що істотно знижує концентрацію кисню.

Доведена адекватність розроблених математичних моделей натурному об'єкту, розроблені алгоритм та програма комп'ютерного розрахунку параметрів розвитку та гасіння пожеж в кабельному тунелі, що дає змогу в наочному графічному вигляді робити висновки про режими гасіння пожежі та вибрати з них найбільш економічний та ефективний.

**Ключові слова:** кабельний тунель, пожежа, гасіння, азот, діоксид вуглецю, рециркуляція, температура, концентрація, математична модель, моделювання, експерименти, ефективність.

## АННОТАЦИЯ

**Ковальчик В. М.** Обоснование параметров тушения пожаров инертными газами в кабельных туннелях. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. – Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности ГСЧС Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена повышению эффективности тушения пожаров инертными газами в кабельных туннелях путём разработки и внедрения компьютерной системы научно обоснованного принятия решений, которые учитывают влияние выбора конкретного инертного газа, времени и интенсивности его подачи к очагу пожара.

Проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований развития и тушения пожара инертными газами в кабельных туннелях с учётом пиролиза и диффузии образующихся газообразных продуктов в твёрдом материале, их смешивание с воздухом и инертными газами, влияющими на процессы горения. Получено аналитическое решение задачи горения твёрдого топлива, использующего модель перехода углерода из связанного в свободное состояние при термическом разложении топлива с последующим проникновением образованного газообразного продукта в поток воздуха. Полученное решение удовлетворительно согласуется с известной эмпирической зависимостью интенсивности горения твёрдого топлива как регулируемого твёрдым топливом, так и регулируемого вентиляцией.

Разработана математическая модель переноса к очагу пожара инертных газов с учётом их поглощения в длинных каналах. Разработана математическая модель развития пожара при расширении газов в зоне высоких температур и воздействии на очаг горения того или иного инертного газа, существенно снижающего концентрацию кислорода. Определены область применения и тактико-технические возможности комплексного воздействия на очаг пожара инертными газами с последующей их рециркуляцией. Установлено, что при организации только рециркуляции пожарных газов эффективность тушения пожара будет тем ниже, чем более изолированный объём и тем самым больше в нём кислорода.

Доказана адекватность разработанных математических моделей натурному объекту, разработаны алгоритм и программа расчёта на ЭВМ параметров развития и тушения пожаров в кабельном туннеле, что позволяет в наглядном графическом виде судить о режимах тушения пожара и выбирать из них наиболее экономичный и эффективный.

**Ключевые слова:** кабельный туннель, пожар, тушение, азот, диоксид углерода, рециркуляция, температура, концентрация, математическая модель, моделирование, эксперименты, эффективность.

**ABSTRACT**

**Vasyl Kovalchyk** Substantiation of Parameters of Extinguishing Cable Tunnel Fires by Applying Inert Gases. – The manuscript.

The thesis for the degree of a Candidate of Technical Sciences, speciality 21.06.02 – Fire Safety. – Study performed at the Lviv State University of Life Safety of the State Emergency Service of Ukraine, Lviv, 2016

The thesis is devoted to improving the efficiency of extinguishing cable tunnel fires by applying inert gases through the development and implementation of a computer system of scientifically grounded decisions, which takes into account the impact of a specific choice of an inert gas, time and intensity of its supply to the fire hearth.

Through a complex of theoretical and experimental research of development and extinguishing cable tunnel fires by applying inert gases, taking into consideration pyrolysis and diffusion of gaseous products formed in solid material, their mixing with air and inert gases, which affect the burning process, conclusions are drawn.

A mathematical model of transferring inert gases to the fire hearth, taking into account their absorption in great length channels, has been constructed. A mathematical model of fire development during the expansion of gases in the area of high temperatures and influence of a certain inert gas on the combustion centre, which significantly reduces the concentration of oxygen, has been suggested.

Adequacy of the developed mathematical models to a full-scale facility has been proven, an algorithm and computer program for calculating the parameters of development and extinguishing cable tunnel fires has been developed, which allows to draw graphically clear conclusions about the modes of extinguishing fires and choose the most economical and efficient of them.

**Keywords:** cable tunnel, fire, fire-fighting, nitrogen, carbon dioxide, recirculation, temperature, concentration, mathematical model, simulation, effectiveness, experiments.

---

Підписано до друку 26.02.2016 р.  
Друк різнограф.  
Наклад 100 прим.

Формат 60x80/16  
Ум. друк. арк. 0,9  
Зам. № 02/2016

---