

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ
З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**ЛЬВІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ**

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ГАСІННЯ
ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ ЗНАЧНОЇ
ПРОТЯЖНОСТІ**

**Василь КОВАЛИШИН
Роман ЛОЗИНСЬКИЙ
Тарас БОЙКО
Володимир КОВАЛИШИН
Володимир МАРИЧ
Роман ПЕЛЕХ**

МОНОГРАФІЯ

**Під загальною редакцією доктора
технічних наук, професора
Ковалишина Василя Васильовича**

Львів 2025

УДК 614.8

Рецензенти: **Семерак М. М.** – доктор технічних наук, заслужений діяч науки і техніки, завідувач кафедри теплоенергетики, теплових та атомних станцій інституту енергетики та систем керування НУ ЛП
Поздєєв С.В. – доктор технічних наук, професор кафедри пожежної профілактики у населених пунктах ННІПБ НУЦЗУ

**Рекомендовано до друку Вченою радою
Львівського державного університету безпеки життєдіяльності
(протокол №3 від 31 жовтня 2024 року)**

Ковалишин, Василь Васильович

Розвиток наукових основ гасіння пожеж на об'єктах значної протяжності: монографія/за загальною редакцією доктора технічних наук, професора В.В. Ковалишина. – Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2025.-305 с.

В монографії глибоко розкриваються наукові основи гасіння пожеж на об'єктах значної протяжності шляхом розкриття закономірностей процесів їх розвитку та припинення горіння у разі реалізації запропонованих технологій і способів застосування різних видів вогнегасних речовин з визначеними параметрами подавання, що суттєво сприяє підвищенню ефективності протипожежного захисту таких об'єктів.

Монографія буде корисною для наукових і практичних працівників, а також для студентів, аспірантів і докторантів, які займаються проблемами пожежної безпеки.

ISBN 978-617-95365-6-4

© В.В. Ковалишин, 2025

© Р.Я. Лозинський, 2025

© Т.В. Бойко, 2025

© В.В. Ковалишин, 2025

© В.М. Марич, 2025

© Р.Л. Пелех, 2025

© ЛДУБЖД, 2025

Зміст

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. СТАН РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	8
1.1. Стан пожежної безпеки та умови виникнення пожеж у тунелях різного призначення та об'єктах значної протяжності.....	8
1.2. Теоретичні основи припинення горіння в закритих об'ємах.....	17
1.3. Аналітичні дослідження тепломасообмінних процесів в закритих об'ємах значної протяжності при виникненні пожеж.....	25
1.4. Способи і засоби гасіння пожеж на промислових об'єктах та інших спорудах значної протяжності.....	31
1.5. Аналіз нормативної бази, що забезпечує захист закритих об'ємів.....	38
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПОЖЕЖ В КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ.....	51
2.1. Піроліз горючих матеріалів, їх фазовий перехід до газоподібного стану.....	51
2.2. Розробка математичної моделі розвитку пожеж на об'єктах значної протяжності.....	58
2.3. Моделювання тепломасообмінних процесів під час пожеж в каналах значної протяжності.....	65
2.4. Квazистаціонарні процеси тепломасопереносу в каналах значної протяжності під час пожежі.....	75
2.5. Перевірка адекватності математичної моделі пожежі натурному об'єкту.....	83
2.6. Експериментальне дослідження умов виникнення і розвитку пожеж в кабельних тунелях і їх порівняння з теоретичними даними.....	91
Висновки.....	101
РОЗДІЛ 3. ПЕРЕМІЩЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ В КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ ТА ВПЛИВ ЇХ ІНГІБУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ.....	104
3.1. Розробка математичної моделі переносу вогнегасних порошків до осередку пожежі.....	104

3.2. Моделювання процесу переносу вогнегасного порошку в потоці повітря.....	115
3.3. Співставлення, порівняння результатів математичного моделювання переносу порошку в поле сили тяжіння з даними експериментальних досліджень.....	119
3.4. Моделювання характеру впливу вогнегасного порошку на осередок великомасштабної пожежі.....	129
3.5. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі гасіння пожеж вогнегасним порошком в натурних умовах.....	134
3.6. Експериментальні дослідження ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях порошками за допомогою рециркуляції летких продуктів згоряння.....	137
Висновки.....	148
РОЗДІЛ 4. ВЗАЄМОДІЯ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ ІЗ ДИСПЕРГОВАНОЮ ВОДОЮ У КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ....	
4.1. Розробка математичної моделі переносу диспергової води в протяжних каналах.....	151
4.2. Моделювання динаміки дрібнодисперсної рідини в протяжному каналі.....	157
4.3. Вплив диспергової води в потоці повітря на осередок пожежі.....	163
4.4. Експериментальні дослідження по гасінню пожеж дисперговою водою і встановлення адекватності математичної моделі натурному об'єкту.....	173
Висновки.....	177
РОЗДІЛ 5. ДИНАМІКА І ХАРАКТЕР ВПЛИВУ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ ПАРОГАЗОВИХ ПОТОКІВ (ІНЕРТНИХ ГАЗІВ) В КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ.....	
5.1. Розробка математичної моделі динаміки парогазових сумішей та інертних газів та їхнього впливу на осередок пожежі в каналах значної протяжності.....	179
5.2. Моделювання динаміки парогазових потоків і їх впливу на осередок пожежі в каналах значної протяжності.....	187
5.3. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі гасіння пожеж парогазовою сумішшю.....	191
Висновки.....	202

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА І ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СПОСОБУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ІНЕРТНОЮ ПІНОЮ, ЩО УТВОРЕНА НА ОСНОВІ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ В РЕЦИРКУЛЬОВАНОМУ ПОТОЦІ ГАЗІВ.....	204
6.1. Розробка математичної моделі щодо утворення і динаміки інертної піни до осередку пожежі разом із продуктами згоряння.....	204
6.2. Дослідження впливу вмісту кисню на осередок пожежі при рециркуляції продуктів згоряння в ізольованому об'ємі.....	206
6.3. Комплексний вплив на осередок пожежі продуктів згоряння і отриманої на їх основі газомеханічної піни.....	211
6.4. Експериментальні дослідження динаміки пінного потоку і його впливу на осередок пожежі в натурних і лабораторних умовах.....	215
Висновки.....	225
РОЗДІЛ 7. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РІЗНИМИ ЗАСОБАМИ І ПРОГНОЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ВПЛИВУ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ.....	227
7.1. Розроблення узагальненого підходу до математичного моделювання розвитку та гасіння пожеж різними засобами.....	227
7.2. Розробка алгоритму та програми розрахунку параметрів гасіння пожеж різними засобами.....	239
7.3. Комп'ютерний розрахунок параметрів гасіння пожеж та ефективності впливу на осередок різними засобами.....	242
7.4. Технічні засоби гасіння пожеж в замкнутих об'ємах на об'єктах великої протяжності та нормативно правова база для їх застосування.....	251
Висновки.....	271
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	273
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	278

ВСТУП

Актуальність теми. На промислових об'єктах підвищеної небезпеки часто трапляються загоряння з подальшим швидким розвитком і розповсюдженням пожежі. Стан їх протипожежного захисту не завжди відповідає сучасним вимогам, а підвищення енергоємності технологічних процесів сприяє зростанню ризику і рівня небезпечних негативних наслідків від пожеж та аварій, а також матеріального збитку від них. Значною мірою це пов'язано з недостатньою ефективністю засобів та способів протипожежного захисту таких об'єктів, насамперед, значної протяжності (кабельні та транспортні тунелі, шахти, підвальні приміщення тощо).

Як відомо, ліквідація пожеж, особливо розвинених, включає створення вибухобезпечної концентрації газів в об'ємі, припинення полуменевого горіння і охолодження технологічного устаткування. Для зниження температури при об'ємному гасінні пожеж, зменшення вмісту кисню в зоні пожежі, запобігання утворенню вибухонебезпечної суміші і охолодження зони горіння та навколишніх конструкцій використовують інертну парогазову суміш, піну, продукти згорання, що рециркулюють, вогнегасні порошки. Але у кожному конкретному випадку треба підбирати способи та засоби пожежогасіння з урахуванням особливостей об'ємно-планувальних рішень та пожежної навантаги.

Основними вимогами до сучасних способів і засобів гасіння пожеж в ізольованих і напівізольованих об'єктах середньої та великої протяжності, а також у підземних комунікаціях та спорудах є мобільність, автономність і висока інтенсивність гасіння осередків горіння в короткі терміни. Цим вимогам в деякій мірі відповідають способи і засоби ліквідації пожеж шляхом водяного, порошкового, пінного впливу на осередок пожежі. До цих способів також належить інертизація ізольованих обсягів інертними газами або шляхом рециркуляції продуктів згорання.

Проблемам пожежної безпеки об'єктів електроенергетики завжди приділялася та приділяється велика увага. Пожежі, які там виникають, призводять до значних матеріальних втрат як на електростанціях, так і у користувачів електроенергії. Найчастіше пожежі на об'єктах електроенергетики виникають в кабельних тунелях. Незважаючи на застосування останнім часом кабелів нового типу з важкогорючою оболонкою, кількість пожеж не знижується. Згідно зі статистичними даними, матеріальні втрати від пожеж у кабельних тунелях, значно перевищують загальну кількість втрат від пожеж на інших спорудах об'єктів електроенергетики. За останні 25 років збитки внаслідок загорянь в кабельних спорудах великих об'єктів енергетики становили понад 70% від загальної суми збитків, заподіяних пожежами (це без врахування причин, пов'язаних з війною).

Способи та технічні засоби протипожежного захисту, що застосовуються на об'єктах електроенергетики та інших об'єктах (шахти, тунелі, підвали), де є канали значної протяжності, а це, переважно, засоби водяного та пінного пожежогасіння, недостатньо ефективні, насамперед, через значні прямі та побічні збитки та матеріальні втрати від застосування цих вогнегасних речовин. Використання таких технологій гасіння пожеж в закритих об'ємах стримується через невизначеність параметрів їх подавання та комплексного вивчення їх впливу на пожежу в закритому об'ємі.

Тому, розвиток наукових основ гасіння пожеж на об'єктах значної протяжності шляхом розкриття закономірностей процесів їх розвитку та припинення горіння у разі реалізації запропонованих способів і технологій застосування різних видів вогнегасних речовин з визначеними параметрами подавання, є актуальною науково-прикладною проблемою, вирішення якої сприяє підвищенню ефективності протипожежного захисту таких об'єктів.

РОЗДІЛ 1

СТАН РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМИ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Стан пожежної безпеки та умови виникнення пожеж у тунелях різного призначення та об'єктах значної протяжності

Протяжність кабельних тунелів, їх обмежені розміри, складна форма трас і розгалуженість, а також значна кількість кабелів практично унеможливають ефективне гасіння пожеж у кабельних тунелях традиційними способами, застосування яких ускладнюється, зважаючи на концентроване виділення тепла, густого диму та отруйних речовин.

ІНФОРМАЦІЯ про пожежі в кабельних тунелях в Україні за 2014-2023 роки

Показник	Всього	Середнє	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Кількість пожеж, од.	93	9	12	9	6	4	10	14	10	11	9	8
Загинуло унаслідок пожеж, люд.	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Травмовані о на пожежах, люд.	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Збиток прямий, тис. грн	3455,7	345,6	94,0	0,1	421,3	0,0	315,1	144,0	63,3	2257,9	70,0	90,0

Інші причини	Необережне поводження з вогнем	Порушення правил проведення електрогазових робіт	Порушення правил монтажу електроустановок та електромереж	Коротке замикання електромережі	Підпал	Причини пожеж	Збиток побічний, тис. грн
3	20	2	3	64	1	Всього	18485,4
0	2	0	0	6	0	Середнє	1848,5
1	0	0	1	9	1	2014	2364,5
0	2	0	0	7	0	2015	134,2
0	2	0	0	4	0	2016	1146,6
0	3	0	0	1	0	2017	171,3
0	4	1	1	4	0	2018	1687,0
1	2	0	1	10	0	2019	1265,5
0	6	0	0	4	0	2020	827,2
1	1	1	0	8	0	2021	7236,5
0	0	0	0	9	0	2022	1177,2
0	0	0	0	8	0	2023	2475,4

Проблема протипожежного захисту кабельних споруд є однією з найбільш актуальних. За даними статистики, сьогодні кожна четверта пожежа пов'язана з несправністю електроустаткування, а переважна частина цих подій (60%) відбувається саме через загоряння в кабельних лініях. Подібні інциденти, основними причинами яких вважається поганий стан ізоляції, ослаблення контактних з'єднань, різні ушкодження й несправності в роботі електроустаткування, є дуже небезпечними й призводять до значних матеріальних втрат, що насамперед пов'язано зі значною вартістю кабелів і проводів, що згоряють, а також збитків через припинення виробництва й порушення енергопостачання. Як приклад – ситуація, що трапилася на одній зі споруджуваних електростанцій в США. Тоді, всього за три з половиною години, вогнем було знищено понад 1100 силових кабелів і ланцюгів керування [2].

На англійському есмінці «Шефільд», у 1982 році, після влучання в нього аргентинської ракети ізоляція проводки горіла, як порох, а вогонь по кабелях поширився на всі приміщення корабля. Того часу загинуло 30 осіб.

На Запорізькій АЕС – у передпусковий період, в 1984 році, вигоріла траса сумарною довжиною кабелів 800 км.

У головному кабельному каналі експериментальної установки прискорювача DESY Гамбурзького університету (ФРН) сталася пожежа [2], в результаті якої було зруйновано кабельну мережу та обладнання, пошкоджено будівлю, а роботу на установці – припинено на тривалий час. Перетин головного кабельного каналу установки становив 3 x 2 м, в ньому розташовувалися, один над одним, 10 стелажів для кабелів електроживлення та управління. Прохід між стелажми та стінкою каналу становив лише 55 - 60 см. Ізоляцію кабелів було виконано з поліетилену, поліхлорвінілу та гуми. Займання в місці розташування клемної коробки кабелю постійного струму з напругою 500 В вдалося

зафіксувати завдяки яскравому спалаху та чорному диму. Цілеспрямована ліквідація пожежі в її осередку була неможлива, тому що пожежні підрозділи, оснащені захисними масками та освітлювальною апаратурою, не могли орієнтуватися в кабельному каналі, заповненому димом і парою за високої концентрації соляної кислоти (близько 0,01 %). Заповненню каналу піноутворюючими засобами або порошком перешкоджало сильне димовиділення та висока температура. В інтенсивній фазі пожежі температура підвищилася до такого рівня, що бетонні перекриття каналу розтріскалися на глибину близько 12 см. Пожежу ліквідували лише через 7 годин після того, як в усі можливі отвори в перекриттях каналу були введені наконечники пожежних рукавів з водою, а роботи з гасіння завершили лише через 22 години з моменту її виникнення.

Аналогічна пожежа, в підземному комунікаційному тунелі, паралізувала у 1988 році енергозабезпечення декількох районів м. Сіетл (США) [3]. Причиною стало коротке замикання в кабелі живлення системи метрополітену. За якусь мить струм у тисячі ампер викликав високу температуру, що призвело до загоряння ізоляції сусідніх кабелів. Через відсутність стаціонарної системи пожежогасіння та неможливість використання води та піни під час гасіння електроустановок, пожежа тривала близько двох годин. Як з'ясувалося пізніше, було зруйновано декілька кілометрів кабелю, два трансформатори (вартістю 35 тисяч доларів кожний) виведено з ладу, чимало кілометрів кабелю потребували перевірки.

Такий хід гасіння пожеж на вищезазначених прикладах яскраво ілюструє необхідність застосування секціонування кабельних тунелів (зادля зменшення об'єму гасіння) з монтажем для кожної секції стаціонарних автоматичних установок пожежогасіння, оскільки при поділі всього об'єму тунелю на секції, ефект від роботи таких систем буде

максимально ефективним. Крім того, будуть зменшені витрати вогнегасного засобу на ліквідацію загоряння чи пожежі.

Займання кабельних виробів може статися під впливом внутрішніх та зовнішніх джерел запалювання. Для кабельної продукції (КП) характерними є внутрішні джерела запалювання електричного походження. До основних з них слід віднести такі [4]: надмірне нагрівання, електричні дуги та іскри, розжарені чи палаючі частки. До утворення цих джерел запалювання можуть призвести такі аварійні режими роботи КП, як струм КЗ, струм перевантаження, перенапруга, струм витоку, збільшення перехідного опору в контактних з'єднаннях.

Зовнішніми джерелами запалювання для кабельних виробів є відкрите полум'я, яке утворюється під час займання об'єктів, розташованих поблизу них, та надмірна кількість теплоти, котра виділяється від теплогенеруючих установок та виробів, що горять. Як відомо, вплив зовнішніх джерел запалювання на електричні кабельні вироби спричиняє їх коротке замикання (КЗ), що також може прискорювати процес розвитку пожежі.

В Україні протягом 2000 - 2010 років в кабельних тунелях виникло 48 пожеж, унаслідок яких загинуло 3 людини; прямі збитки склали 211 тисяч грн; побічні – 614 тисяч грн [5].

Основними причинами пожеж були: необережне поводження з вогнем – 21 пожежа (43,8 % від загальної кількості); порушення правил пожежної безпеки при влаштуванні та експлуатації електроустановок – 17 пожеж (35,4 %); від інших причин сталося 10 пожеж (20,8 %).

Вироби, на яких або від яких сталася пожежа розподілились таким чином:

- електрокабелі та проводи – 27 пожеж (56,3 %);
- сміття – 8 пожеж (16,7 %);
- сірник або недопалок – 4 пожежі (8,3 %);
- інші вироби – 9 пожеж (18,7 %).

Проаналізуємо деякі з них, що виникли в кабельних тунелях.

В м. Кременчуку 22 лютого 2010 року о 14 год 49 хв по вул. І. Приходька, 14 виникла пожежа в кабельному тунелі ВАТ “Кременчуцький сталеливарний завод”. Протягом чотирьох із половиною годин гасіння пожежі проводили сім відділень МНС на автоцистернах із застосуванням двох стволів “Б” (компактними та розпиленими струменями води) та трьох генераторів піни (середньої кратності) та шість ланок ГДЗС. Локалізації пожежі сприяла робота автоматичної системи пожежогасіння. Прямий збиток від цієї події склав 5,1 тис. грн; побічний – 15,3 тис. грн. Причина пожежі – недоліки конструкції та виготовлення електроустановок, коротке замикання в електромережі.

В кабельному каналі шахти Краснолиманська, яка розташована в с. Родинське, по вул. Степний, 1, Донецької області першого липня 2008 року виникла пожежа. Унаслідок пожежі було знищено 140 м електрокабелів та проводів групового прокладання. Побічний збиток від пожежі становив 134,9 тис. грн. Причина пожежі: недоліки конструкції та виробництва електроустановок, коротке замикання в електромережі.

Двадцять п'ятого вересня 2008 року о 9 год 30 хв виникла пожежа в кабельному тунелі шахти ім. Фрунзе, що розташована в м. Ровеньки Луганської області. Гасіння пожежі проводили два відділення працівників МНС та МПО на автоцистернах із застосуванням ствола “Б” та двох генераторів піни. Внаслідок пожежі було пошкоджено кабелі довжиною 200 м, а прямий збиток становив 10 тис. грн, побічний – 21,4 тис. грн. Причина пожежі – недоліки конструкції та виготовлення електроустановок, коротке замикання електромережі.

В кабельному тунелі СПЦ-2 ВАТ «Міттал Стіл», розташованого в м. Кривий Ріг по вул. Орджонікідзе, 24 листопада 2006 року о 10 год 08 хв виникла пожежа.

Пожежу було виявлено завдяки спрацюванню системи пожежної сигналізації. Її гасіння ускладнювалось дією отруйних речовин, газів, продуктів згоряння. Ліквідацію пожежі провели три відділення МНС на автоцистернах із застосуванням двох стволів “Б” (водою зі змочувальником) та генератора піни (високої кратності). На пожежі працювало дві ланки ГДЗС. Побічний збиток від цієї події становив 12,1 тис. грн. Причина пожежі – недоліки конструкції та виробництва електроустановок, коротке замикання електромережі.

В м. Луганську 6 жовтня 2005 року о 19 год 20 хв по вул. Ватутіна в кабельному тунелі виникла пожежа, в результаті якої пошкоджено телефонний кабель. Прямий збиток від неї склав 8 236 грн, побічний – 10 184 грн. Причина пожежі – необережне поводження з вогнем.

У м. Стаханові Луганської області на ВАТ СЗФ 29 листопада 2005 року о 7 год 20 хв в кабельному тунелі горів кабель групового прокладання. В результаті загорання було пошкоджено вісім кабельних ліній по 50 метрів та дві - по 160 метрів. До ліквідації пожежі залучалося п'ять автоцистерн. Гасіння проводилось одним порошковим стволом та чотирма стволами «А» (компактним струменем). Прямий збиток від пожежі становив 43 978 грн, побічний – 32 319 грн. На місці пожежі протягом 1 год працювала ланка ГДЗС у складі чотирьох осіб та працівники дослідно-випробувальної лабораторії. Причина пожежі – недоліки конструкції та виробництва електроустановок, коротке замикання в електромережі.

В м. Київ 15 серпня 2005 року о 22 год 08 хв по вул. Крейсера «Аврора», 16 в кабельній коробці сталося загорання кабелю. До ліквідації пожежі залучалася автоцистерна. Гасіння проводилось порошковими стволами. Причина пожежі – порушення правил технічної експлуатації електроустановок.

П'ятого липня 2005 року о 3 год 25 хв в м. Дніпропетровськ по вул. Маяковського, 3, в кабельному тунелі, горів кабель групового прокладання. В результаті

цього було знищено кабельний тунель вузла керування доменної печі на площі 20 м. кв. Прямий збиток від пожежі становив 10 тис. грн, побічний – 12 708 грн. Причина пожежі – недоліки конструкції та виробництва електроустановок, коротке замикання в електромережі.

В селі Красносілка, Житомирської області на Озерянській ТБЗ в кабельному тунелі 14 вересня 2003 року виникла пожежа, в результаті якої було знищено силовий кабель. Прямий збиток від пожежі склав 8 201 грн, побічний збиток – 10 874 грн.

В м. Київ 6 липня 2003 року о 11 год 53 хв на Московському мосту в кабельному тунелі загорівся силовий кабель. Прямий збиток від пожежі склав 6 810 грн, побічний збиток – 33 430 грн. Причина пожежі – порушення правил монтажу електроустановок та електромереж.

Другого вересня 2003 року о 0 год 27 хв на цьому ж об'єкті в кабельному тунелі горів силовий кабель. Прямий збиток від пожежі становив 6 310 грн, побічний – 33 730 грн. Причина пожежі – недоліки конструкції та виробництва електроустановок.

В м. Донецьку 6 листопада 2001 року по вул. Орджонікідзе на території ТОВ ЕМСС ковальсько-пресового цеху №1, в кабельному тунелі, виникла пожежа. Причина пожежі – необережність при проведенні вогневих робіт.

6 грудня 2001 року в м. Донецьку по вул. Б. Комісарів, 112 в кабельному тунелі виникла пожежа. Прямий збиток від пожежі становив 80 тис. грн, побічний – 47 тис. грн. Причина пожежі – необережне поводження з вогнем. Загинула 1 людина.

В кабельному тунелі АТ ММК Ілліча ЛПЦ-1700 22 лютого 2000 року в м. Донецьк по вул. Левченко, 1 виникла пожежа-загорівся силовий кабель. До її ліквідації залучалося шість цистерн із застосуванням трьох стволів «Б» за допомогою компактного струменю. Також використовувалась вода від внутрішнього протипожежного водопроводу та

вуглекислотний вогнегасник. Прямий збиток від пожежі склав 8 тисяч гривень, побічний – 60 тис. грн. Причина пожежі – порушення правил технічної експлуатації електроустановок.

В м. Краматорську, по вул. Привокзальна в липні 2009 року виникла пожежа в системі електропостачання цементного заводу, що спричинило знеструмлення підприємства і повну зупинку технологічного процесу. За даними місцевого підрозділу МНС у кабельному тунелі сталося сильне задимлення й загоряння, пакет силових кабелів у короткий термін був знищений вогнем (знищено кабелі 6 кВ довжиною 150 м). Спрацювала апаратура захисту, обійшлося без жертв, але заводу завдано відчутної шкоди. Прямий збиток від пожежі склав 7,8 тис. грн, побічний – 15,6 тис. грн. Причина пожежі – недоліки конструкції та виробництва електроустановок, коротке замикання в електромережі.

На металургійному комбінаті ВАТ “Запоріжсталь”, розташованому в Заводському районі м. Запоріжжя по вул. Південне шосе у вересні 2006 року виникла пожежа. Загоряння сталося в підвальному приміщенні кабельного тунелю “Тандем” цеху холодного прокату № 1. Горіли кабелі на площі 1100 м². На боротьбу з вогнем залучалися два підрозділи пожежної охорони “Запоріжсталі”, один підрозділ пожежної охорони з Орджонікідзівського району міста та два підрозділи із Заводського району, зокрема газодимозахисна служба. Через задимлення пожежники МНС працювали в масках, захисних костюмах і з балонами зі стиснутим повітрям. Всього на гасіння пожежі було задіяно 14 одиниць техніки та 47 осіб. Спалах локалізували через 3 години, а о 22 год 28 хв вогонь повністю ліквідували. Прямий збиток від пожежі становив 21,9 тис. грн, побічний – 62 тис. грн. Причина пожежі – порушення правил пожежної безпеки при проведенні електрогазозварювальних робіт [6].

На жаль, при визначенні збитків державними установами, як правило, їх величина вказується меншою, і

якщо порівняти статистику пожеж в кабельних спорудах інших держав та в Україні, то збитки, у нас як правило, занижені на два порядки.

1.2. Теоретичні основи припинення горіння в закритих об'ємах

Для виникнення загоряння потрібно три умови (умовний трикутник горіння), а саме:

1. Горюча речовина (горюча рідина, горючі гази, тверді горючі матеріали тощо);
2. Окиснювач;
3. Джерело запалювання.

Усунувши одну з них, ми припиняємо горіння.

Класи пожеж та їх символи встановлює EN «Класифікація пожеж [7].

Вогнегасна ефективність речовини зумовлюється, насамперед, такими характеристиками: здатність до інгібування (сповільнення) реакцій горіння, охолоджувальна здатність (залежить від теплопровідності, теплоємності, теплоти фазового перетворення – топлення або випаровування), ізолювальна здатність, а також поверхневий натяг, змочувальна та піноутворювальна здатність (для рідин). Суттєве значення має електропровідність вогнегасної речовини, коли йдеться про безпеку осіб, які безпосередньо застосовують засоби пожежогасіння за наявності напруги електричного струму [54, 55].

Завдяки високій інгібіторній здатності сучасні вогнегасні порошки є ефективними засобами гасіння пожеж класів В і С у разі, коли достатньо припинити полуменеве горіння. Порошки на основі фосфорамонійних солей придатні також і для гасіння пожеж класу А завдяки здатності створювати на поверхні розжарених твердих матеріалів щільну ізолювальну плівку з розтоплених

фосфатів. У разі застосування порошків спеціального призначення для гасіння пожеж класу D переважає ізолювальний ефект – обмеження доступу повітря до поверхні горючої речовини. Вогнегасні порошки характеризуються низькою електропровідністю і завдяки цьому можуть застосовуватись для гасіння пожеж електрообладнання з наявністю напруги електричного струму [56-58].

Воду у вигляді компактного або розпиленого струменя застосовують для гасіння пожеж класу А, а в тонкорозпиленому стані (діаметр краплин до 100 мкм) – у разі пожеж класу В. Припинення горіння досягається, переважно, внаслідок охолодження горючих речовин і матеріалів, тобто усунення джерела запалювання. Певну роль при цьому відіграє утворення водяної пари, що діє в зоні горіння як газова вогнегасна речовина – інертний розріджувач горючих газів (парів) і повітря. В разі гасіння пожежі підкласу В2 також відбувається розбавлення горючої рідини водою, внаслідок чого зменшується концентрація її парів у зоні горіння.

Останнім часом використовують різноманітні добавки до води як вогнегасної речовини з метою поліпшення її функціональних та експлуатаційних характеристик [59, 60]. Зокрема, водні розчини піноутворювачів та інших поверхнево активних речовин, концентрація яких вимірюється десятими і навіть сотими частками відсотка (змочувальні розчини), характеризуються низькими значеннями поверхневого натягу, внаслідок чого вони легко розтікаються по поверхні, а також проходять у товщу волокнистих структур. Для підвищення в'язкості застосовуються загущувальні добавки, наприклад, полісилікат натрію, ефіри целюлози. Деякі сольові розчини (KNO_3 , K_2CO_3 тощо) проявляють інгібіювальні властивості, особливо у тонкорозпиленому (туманоподібному) стані;

концентровані водні розчини карбаміду, етиленгліколю та деяких інших речовин придатні до зберігання та застосування за низьких температур [61, 87].

Для утворення газомеханічної піни застосовують робочі розчини піноутворювачів загального та спеціального призначення. З робочих розчинів піноутворювачів загального призначення, з використанням відповідних піногенераторів, одержують піну низької, середньої та високої кратності (співвідношення об'єму піни до об'єму витраченого розчину становить відповідно: до 20, від 20 до 200, понад 200), котра придатна для гасіння пожеж класів А та В. У разі застосування піни переважає ізолювальна дія, а також наявний охолоджувальний ефект. Піну і водні речовини в будь-якому вигляді, крім тонкорозпиленого, не можна застосовувати для гасіння пожеж електрообладнання під напругою [62].

Піноутворювачі спеціального призначення застосовують для гасіння пожеж підкласів А1, А2, В1 та В2 змочувальними розчинами чи піною низької кратності, та (або) для приготування робочих розчинів у морській воді.

Нещодавно розпочалося надходження в Україну з-за кордону, а також налагоджено власне виробництво плівкоутворювальних піноутворювачів спеціального призначення переважно на основі фторованих поверхнево активних речовин. Піна низької кратності, одержана з робочих розчинів таких піноутворювачів, здатна швидко розтікатися по поверхні горючої рідини і утворювати щільну ізолювальну плівку водного розчину, яка в разі механічного пошкодження швидко самовідновлюється [63-65].

Газові вогнегасні речовини (ГВР) застосовують здебільшого для припинення полуменевого горіння. За механізмом гасіння вони поділяються на інертні розріджувачі (діоксид вуглецю, азот, інертні гази, їх суміші) та інгібітори горіння (галогеновуглеводні) [56, 125]. Гасіння інертними розріджувачами досягається переважно внаслідок

розбавлення газового середовища і зниження в ньому концентрації окисника, а гасіння інгібіторами горіння – за хімічним механізмом (зв'язування радикалів, за участю яких у полум'ї відбуваються ланцюгові окисно-відновні реакції).

Деякі ГВР, які зберігаються в технічних засобах пожежогасіння у рідкому або зрідженому стані, мають ще й охолоджувальну дію, і тому також можуть застосовуватись для гасіння по поверхні твердих матеріалів. Насамперед, це стосується діоксиду вуглецю (CO_2), який зберігають у зрідженому стані в ізотермічних посудинах або балонах за низької температури та (або) під надлишковим тиском. У корпусах вуглекислотних установок (балонів), залежно від температури навколишнього середовища (20°C), діоксид вуглецю перебуває під тиском власної пари 5,8 МПа. Під час викидання зрідженого CO_2 з технічного засобу пожежогасіння утворюється двофазний струмінь, який складається з газу та переохолоджених твердих часток («снігу»). Однак існуючі на сьогодні вуглекислотні вогнегасники не призначені для гасіння пожеж класу А.

ГВР – це вогнегасні речовини, застосування яких не призводить до забруднення або пошкодження матеріальних цінностей. Тому, незважаючи на порівняно високу вартість, їх доцільно використовувати у банківських приміщеннях, обчислювальних центрах, сховищах музеїв, бібліотек тощо. Всі ГВР придатні для гасіння електрообладнання під напругою.

Загальні технічні вимоги до вогнегасних речовин встановлюються такими нормативними документами [8-11].

Вогнегасні порошки для гасіння класу D в Україні виготовляються за окремим замовленням.

Газові вогнегасні речовини – інертні розріджувачі (діоксид вуглецю, азот, аргон та їх суміші) виробляються або можуть вироблятися на підприємствах України за технологіями розділення повітря та шляхом збирання побічного продукту процесів бродіння (CO_2) на об'єктах харчової промисловості.

Інгібітори горіння (галогенопохідні вуглеводні) в Україні не виробляються, оскільки немає відповідної сировинної бази. З часів Радянського Союзу в технічних засобах газового пожежогасіння, зокрема в хладонових вогнегасниках, залишилася значна кількість озоноруйнівних речовин (брометил, хладон 114В2, галон 1301 тощо), споживання яких, згідно з положеннями Монреальського протоколу 1987 року, підлягає поступовому скороченню і припиненню. Натомість зарубіжні фірми виробляють і пропонують на ринку України екологічно безпечні інгібітори горіння, які, однак, потребують перевірки органами санітарно-гігієнічного контролю та сертифікації. Серед цих вогнегасних речовин найбільш поширеними є гептафторпропан C_3HF_7 , пентафторетан C_2HF_5 (HFC 125, хладон 125).

Фізико-хімічні характеристики та показники вогнегасної ефективності більшості сучасних ГВР наведено в [10].

Існують також аерозолеві вогнегасні речовини. Здебільшого вони являють собою тверду композицію системи газ-тверда фаза, здатну швидко згоряти без доступу повітря з утворенням аерозолі (димі). За характером дії на полум'я такі аерозолі близькі до вогнегасних порошків та ГВР. Генератори вогнегасного аерозолі призначені для гасіння в закритому просторі об'ємним способом. Головний недолік таких речовин – висока пожежонебезпечність, зумовлена виділенням великої кількості тепла під час горіння. Для спорядження переносних і пересувних вогнегасників їх не застосовують.

1.2.1. Вогнегасні речовини та засоби їх подачі. Умови та способи припинення горіння

Ліквідація горіння – це вплив на тепловиділення і тепловіддачу. Зі зменшенням тепловиділення або тепловіддачі знижується температура і швидкість реакції. При введенні в зону горіння вогнегасних речовин температура може сягати значення, при якому горіння припиняється. Мінімальна

температура горіння, нижче якої швидкість тепловідведення перевищує швидкість тепловиділення і, відповідно, горіння припиняється, називається температурою затухання.

Як відомо, температура затухання значно вища за температуру самозаймання. Отже для припинення горіння досить знизити температуру зони реакції до показника, меншого за температуру затухання, при цьому збільшуючи інтенсивність тепловідведення або зменшуючи швидкість тепловиділення. Так, якщо змінити концентрацію кисню в повітрі, додавши негорючий газ, то швидкість виділення теплоти на одиницю площі поверхні зони реакції буде зменшуватися і температура горіння знизиться. При певній концентрації негорючого газу температура горіння стане нижчою за показник температури затухання, і горіння припиниться (рис. 1.1).

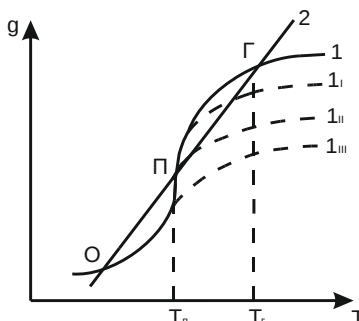


Рисунок 1.1. – Залежність тепловиділення і тепловідведення від температури:

1 – крива тепловиділення; $1_I, \dots, 1_{III}$ – криві тепловиділення при зменшенні його швидкості; 2 – пряма тепловідведення;

О – початок окислення;

П – точка, що відповідає температурі загасання; Г – точка, що відповідає температурі горіння; T_n – температура загасання; T_r – температура горіння

У зв'язку зі зменшенням концентрації кисню в повітрі знижується крива 1. Якщо при горінні тепла рівновага встановилася в точці Г (перетин прямої тепловідведення 2 і кривої тепловиділення 1, то при зменшенні швидкості

тепловиділення і зниженні кривої 1 ця точка зміститься ліворуч і температура горіння знизиться. При деякій швидкості тепловиділення пряма тепловідведення 2 в області високих температур тільки торкнеться кривої тепловиділення 1 в точці П. При подальшому зниженні швидкості виділення теплоти пряма тепловідведення розташується вище кривої швидкості тепловиділення, і процес горіння перейде в область окиснення (точка О). Отже температура горіння T_p є критичною, тобто – температурою затухання. Таким чином знизити температуру горіння і припинити горіння можна як збільшенням швидкості тепловідведення, так і зменшенням швидкості тепловиділення [12-14, 157]. Цього можна досягти такими способами: впливом на поверхню палаючих матеріалів охолоджувальними вогнегасними речовинами; створенням у зоні горіння або навколо неї негорючого газового чи парового середовища; створенням між зоною горіння і горючим матеріалом або повітрям ізолюювального шару з вогнегасних речовин [156, 158-161].

Схема припинення горіння представлена на рис. 1.2.



Рисунок 1.2. – Схема припинення горіння

Способи припинення горіння представлені на рис. 1.3.

Кожен із способів припинення горіння можна здійснювати різними прийомами, зокрема їх поєднанням. Наприклад, створення ізолювального шару на поверхні легкозаймистої рідини, яка горить, може бути досягнуто через подачу піни крізь шар горючої рідини, або за допомогою пінопідйомників, навісними струменями тощо.

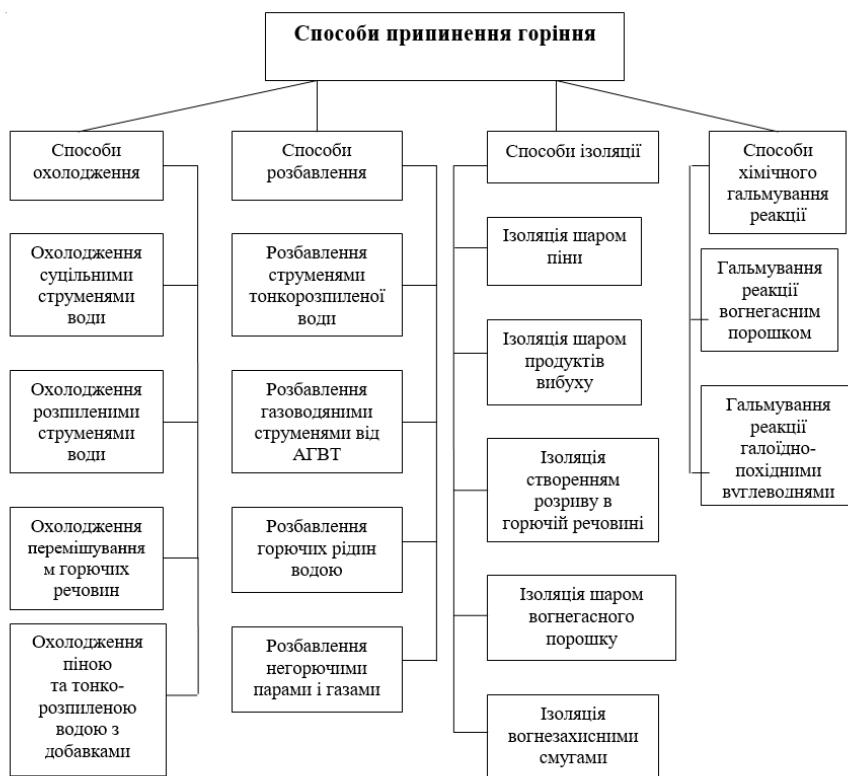


Рисунок. 1.3. – Класифікація способів припинення горіння

1.3. Аналітичні дослідження тепломасообмінних процесів в закритих об'ємах значної протяжності при виникненні пожеж

При розігріванні ділянки кабельної прокладки до високих температур горючі матеріали в конструкції кабелів піддаються піролізу. Горючі гази, котрі утворюються в процесі піролізу, згоряють з виділенням тепла, частина якого йде на розігрівання і піроліз прилеглої до джерела займання ділянки кабельної прокладки, що викликає подальше розповсюдження вогню уздовж кабелів. Загальна схема процесу горіння і його критерії наведені в [15].

Більшість пожеж в огороженні починається з виникнення горіння на відносно невеликій ділянці. Полум'я поволі поширюється по поверхні деревини, тканини, пластмаси чи чогось іншого. Конвекція піднімає продукти горіння догори, а на їх місце надходять нові порції повітря. Тепло, що випромінюється від ділянки, яка горить, прогріває поверхню навкруги і прогріває углиб матеріал, який горить. Це викликає посилений розклад горючого матеріалу і посилене горіння продуктів розкладу. У тому місці, де матеріал прогрівся до температури спалахування, він теж починає горіти.

Температура в приміщенні розподіляється не рівномірно, а з урахуванням розташування місця виникнення пожежі відносно отворів і з урахуванням пожежного навантаження [17,66, 71].

З практики відомо, що площа отвору чинить суттєвий вплив на швидкість розвитку пожежі, коли вона менша за площу пожежі у 10 і більше разів. У різних фазах пожежі коефіцієнт надлишку повітря не є постійним [12-14].

У першій фазі пожежі температура зі збільшенням площі пожежі спочатку росте. А потім, у міру витрати кисню, падає.

У другій фазі, температура деякий час лишається постійною. Після руйнування вікон, дверей вона стрімко зростає.

У роботі [16] запропоновано математичну модель, яка описує тепловий стан системи «короб-кабель» в умовах стандартної пожежі на кабельних трасах системи безпеки АЕС. Проведено ідентифікацію параметрів моделі, що дає змогу порівнювати розрахункові значення температурних полів з експериментальними залежностями температури від часу в різних точках досліджуваної системи. Запропоновано оптимальну товщину різних вогнезахисних покриттів, що відповідають необхідним вимогам вогнестійкості систем «короб-кабель».

У джерелі [17] авторами встановлено, що оптимальним місцем подачі піни в тунель є середній люк зверху, а якнайкращим – дверний отвір тунелю. Час охолодження нагрітого тунелю до безпечних температур становить 5/6 хвилини від моменту його повного заповнення. Відмічено, що величина коефіцієнта руйнування піни не є постійною для даних умов гасіння, а змінюється залежно від кратності і витрати піни.

У дослідженні динаміки гасіння закритих пожеж [18, 125, 130] наголошується, що застосування піни підвищеної кратності для ліквідації закритих пожеж в огорожах, у багатьох випадках обґрунтоване високим ефектом гасіння. Проведено дослідження моделі ліквідації пожежі на прикладі каналу постійного прямокутного перетину, котрий безперервно заповнюється піною. Дія зони пожежі на піну оцінювалася інтенсивністю її руйнування у випадках односторонньої подачі піни в зону пожежі, що розповсюджується, і двосторонньої її подачі з різною інтенсивністю.

У дисертаційній роботі [19], захищеній в 2004 році, виконано обґрунтовано інженерний розрахунок систем пожежогасіння висократною піною при її дистанційній подачі по кабельних спорудах. Встановлено універсальну

залежність, що дає змогу розраховувати витратно-напірні характеристики піногенератора для систем пожежогасіння дистанційної подачі високочатної піни по кабельних спорудах з різними конструктивно-планувальними характеристиками; запропоновано коефіцієнти механічного і теплового руйнування піни, дана оцінка її вогнегасної ефективності. Ці експериментальні дослідження розрахунками не зовсім підтверджені, а, враховуючи накопичений досвід, застосування газомеханічної піни в гірничих виробках вугільних шахт [20, 150, 167], ці дослідження не слід вважати цілком коректними.

Проведений аналіз літературних джерел [143,149, 151-155] показує, що проблемам дослідження тепломасообмінних процесів при пожежах в закритих об'ємах приділяється певна увага. Проте в них розглядається, в основному, поведінка повітряномеханічної піни при незначній довжині вентиляційних каналів і тунелів в (5 - 10 м) або в обмежених системах, наприклад, «короб-кабель». Процес рециркуляції диму і вплив такого інертного середовища на осередок горіння в кабельних тунелях досліджувався Пашковським П.С та Дмитровським С.Ю, Лозинським Р.Я. В дисертаційній роботі [63] розв'язано аналітичне завдання розподілу пожежних газів в об'ємі кабельного тунелю. При цьому доведено, що дальність і тривалість розповсюдження диму під час пожежі може перевищувати значення цих параметрів для температури. Встановлено умови повітряного розподілу при рециркуляції пожежних газів по замкненому контуру, через ізольовану ділянку кабельного тунелю з осередком пожежі і розташований поза тунелем трубопровід, завдяки різним джерелам тяги. Обґрунтовано місце установа додаткового джерела тяги – вентилятора в контурі рециркуляції. При цьому найбільш оптимальним місцем розміщення допоміжного вентилятора є ділянка

трубопроводу в безпосередній близькості від ізолювальної перемички, що встановлена з боку свіжого струменя загальнотунельної вентиляції. Утім в цій роботі не розглянуто 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.

В роботах Кудинова Ю.В., Рожкова В.С., Топчієнка Б.І. розглядалися питання використання азоту для рециркуляції продуктів згоряння на ізольованій ділянці, на якій відбувається горіння [195, 208, 209] та швидкість розвитку полум'я в гірських виробках.

Тепломасообмін продуктів згоряння і охолоджуючої води можна розглядати як комплекс взаємопов'язаних процесів: нагрівання і випаровування води; охолодження складових продуктів згоряння, що не конденсуються (азот, діоксид вуглецю); охолодження пари, що утворилася при горінні палива і випаровуванні води; конденсація пари; охолодження конденсату і нагрітої внаслідок тепломасообміну води. Вказані процеси, загалом, протікають в два етапи. На першому етапі тепломасообмін здійснюється завдяки нагріванню і випаровуванню води у високотемпературному потоці продуктів згоряння. При зниженні температури газу збільшується частка пари в парогазовій суміші у співвідношенні масових витрат води і продуктів згоряння, близькому до одиниці, і у даному випадку пара в суміші досягає насиченого стану.

При цьому інтенсивність охолодження газу розпиленою водою різко знижується (температура газоводяної суміші нижча за 150-200 °С), виникає необхідність застосування комбінованого охолодження з використанням різних хладогентів (вода, піна, криогенні рідини) в певних інтервалах температур охолодженого потоку газів.

Ряд специфічних особливостей, характерних для процесу охолодження потоку газів, зокрема обмежені габарити камери охолодження, висока швидкість і початкова температура газу, велика витрата газу і обмежені норми витрати води, потребують створення спеціальних камер охолодження зі складною динамікою газорідних потоків. Для розрахунку таких камер і режимів охолодження в них застосування стандартних методик є неможливим.

Для дослідження процесів охолодження високотемпературного газу використовують два підходи:

- аналітичний – з розробкою математичної моделі, що описує процес тепломасообміну розпиленої рідини з високотемпературним газовим потоком;
- експериментальний – з отриманням емпіричних залежностей.

Але в нашому випадку треба розглядати не процес утворення парогазової суміші струменями холодної води, а процес руху цієї суміші від місця пожежі до вогнища з урахуванням конденсації пари на стінках з наступною дією на вогнище пожежі.

Диспергована вода, наприклад, маючи велику теплоємність, забезпечує інтенсивне охолодження зони горіння з одночасною інертизацією навколишнього середовища в результаті пароутворення. Разом з тим, можливості застосування води для дистанційного гасіння розвинених пожеж, а також пожеж, пов'язаних із горінням газів, дуже обмежені. Існує ряд робіт зі зниження температури пожежних газів за межами вогнища пожежі по ходу руху вентиляційної труби. Проте необхідно розглядати динаміку диспергової води як аерозолі і її безпосередню дію на ефективність гасіння пожежі шляхом випаровування рідин різних фракцій [28].

Аналіз досліджень доводить, що існує необхідність у розробці нових високоефективних способів і засобів

пожежогасіння. Дослідження процесів генерування піни стійкої до високих температур на основі пожежних газів, встановлення закономірностей її руху до осередку пожежі та одночасного впливу на нього крапельної рідини і продуктами горіння є актуальним науково-технічним завданням, розв'язання якого сприятиме безпечному та ефективному гасінню пожеж та проведенню аварійно-рятувальних робіт на об'єктах з підвищеною небезпекою.

У роботах [21-23] автори розглянули кілька технологічних схем локалізації та гасіння пожеж повітряно-механічними та інертними пінами залежно від місця виникнення пожежі, гірничо-геологічних умов тощо. Цими схемами передбачається подача піни, в основному, по свердловинах із поверхні.

У роботах Булгакова Ю.Ф., Костенка В.К., Шецера Г.М., Кравца В.М. розглядаються гасіння ендрогенних пожеж різними способами і зокрема повітряно-механічною піною [150, 167].

Дослідженню тепломасообмінних процесів при горінні речовин і матеріалів у каналах, тунелях або гірничих виробках присвячено значну кількість наукових робіт як зарубіжних, так і вітчизняних фахівців [24-27, 29-44, 199, 203-207]. При проведенні теоретичних і експериментальних досліджень розглядалися процеси нагрівання, займання матеріалів і виробів, 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 подачі вогнегасних речовин [29, 45-51, 129]. В якості пожежного навантаження найчастіше розглядалися електричні кабелі (одиночні або в пучках), деревина (дерев'яні затяжки кріплення або багаття), метан, вугілля тощо.

При дослідженні тепломасообмінних процесів у таких об'єктах використовувалися методи математичного

моделювання. Отримані моделі розв'язувалися аналітично за допомогою відомих методів математичної фізики або чисельними методами кінцевих різниць при граничних умовах, що відповідають умовам даної задачі [30-34, 41].

Розроблено математичну модель [67-70] динаміки пінного потоку з урахуванням синерезису і руйнування двофазного середовища та зонну модель нестационарних процесів рідкої й газової фаз перед осередком і в осередку пожежі, а також нестационарних процесів теплообміну у вогнищі та навколишньому масиві під дією охолоджуючого ефекту піни і збіднених киснем продуктів горіння при їх рециркуляції. Отримані аналітичні залежності рідкої і газових фаз у вогнищі пожежі та залежність температури в навколишньому масиві і, безпосередньо, в самому каналі взаємопов'язані та відображають складні процеси теплогазообміну. Це дає змогу науково обґрунтовано прогнозувати ефективність комплексного впливу на осередок пожежі (КВОП). Утім отримані аналітичні залежності можна використовувати лише обмежено. Крім того, існує необхідність у розробці числових методів у широкій області зміни параметрів.

1.4. Способи і засоби гасіння пожеж на промислових об'єктах та інших спорудах значної протяжності

Стан протипожежного захисту промислових об'єктів підвищеної небезпеки, зазвичай, не відповідає сучасним вимогам, а підвищення енергоємності технологічних процесів сприяє зростанню ризику та рівню небезпечних наслідків від пожеж і аварій, а також матеріальним збиткам від них. Статистика говорить, що скорочення на 1 хв часу дії на людину продуктів горіння зменшує кількість жертв на пожежі приблизно на 5%. Отже від правильної організації та чіткості дій цих підрозділів залежатиме співвідношення загиблих та врятованих на пожежах [52, 53]. В приміщеннях

з малою інтенсивністю газообміну і низькотемпературним режимом горіння проходить з великою нестачею повітря. Але температура в приміщенні при такому горінні майже однакова по всьому об'ємі і може бути дуже високою через слабкий відтік продуктів горіння. Ці обставини необхідно враховувати при гасінні пожеж для забезпечення безпечної та ефективної роботи особового складу.

Для ліквідації пожеж, особливо розвинених, необхідним є створення вибухобезпечної атмосфери, припинення полуменевого горіння та охолодження технологічного устаткування. Тому не тільки вид горючого матеріалу, але й конкретна стадія його гасіння, повинні визначати вибір вогнегасного засобу. Застосування на об'єктах диспергованої води, піни середньої або низької кратності для дистанційного гасіння розвинених пожеж різних класів має обмежені можливості, а вогнегасні порошки є найбільш ефективними для ліквідації полуменевого горіння.

Для зниження температури при об'ємному гасінні пожеж, зменшення вмісту кисню в зоні пожежі, запобігання утворенню вибухонебезпечної суміші використовують інертну парогазову суміш, отриману шляхом спалювання в спеціальних установках вуглеводневого палива з подальшим охолодженням продуктів згоряння водою. Це забезпечує безпечні та ефективні умови ведення аварійно-рятувальних робіт за температурними та газовими чинниками.

Тактику і технологію при дистанційному гасінні пожежі на об'єктах підвищеної небезпеки визначають такі основні фактори:

- місце виникнення пожежі;
- тривалість горіння і характер розвитку пожежі (зосереджена у визначеному місці або швидко переміщується у міру вигорання горючих матеріалів);
- вид горючих матеріалів на об'єкті;

– наявність обставин, що ускладнюють гасіння (висока задимленість і температура на підступах до осередку пожежі, небезпека вибухів, пролив хімічно небезпечних речовин, імовірність ураження електричним струмом, руйнування конструкцій на об'єкті тощо).

Відомо, що для електротехнічних установок та кабельних приміщень найбільш широко застосовуються такі засоби пожежогасіння як вода та піноутворюючі речовини [72-78]. Однак, застосування води у чистому вигляді має суттєві недоліки тому, що при згорянні поверхневої оболонки ізоляції кабелів інтенсивно виділяються різноманітні гази [77]. Наприклад, при горінні полівинілхлориду виділяються сполуки хлору, які, вступаючи в хімічну реакцію з водою, що застосовується для гасіння, утворюють корозійноактивні кислоти. Надмірна кислотна вода, що стікає, також спричиняє додаткові матеріальні збитки, завдаючи шкоди обладнанню та приміщенням, оскільки соляна кислота руйнує залізобетонні конструкції.

Як правило, на сучасних об'єктах електроенергетики застосовують стаціонарні автоматичні установки пінного гасіння. При спрацюванні пожежних сповіщувачів, тип яких може бути різним, піна для гасіння розподіляється по системі трубопроводів, оснащених спринклерними голівками [73].

У британському журналі [74] описана система пожежогасіння для кабельних тунелів теплоелектростанції Didcot в графстві Оксфордшир. Установка пожежогасіння включає в себе прилади для запобігання розповсюдженню вогню та гасіння пожежі в кабельних тунелях протяжністю 15 км та в кабельних заглибленнях під підлогою центру управління. В тунелі встановлені лінійні пожежні сповіщувачі, які розташовані на рівні підлоги в 125 мм над кабелями. В кожній зоні тунелю (довжиною до 50 м) розташовано 8 ÷ 18 спринклерних голівок. Сама установка пожежогасіння включає в себе обладнання для подачі 3 %

розчину піноутворювача AFFF. Через кожних 50 м в тунелі встановлено вогнетривкі перегородки та двері. Кабелі, що проходять крізь них, додатково ущільнені мінеральним волокном та штукатурним гіпсом.

У роботі [76] встановлено, що високократна піна здатна ефективно заповнювати кабельні тунелі та ліквідувати осередки горіння при заповненні піною стандартного кабельного тунелю, який розбито на секції довжиною $35 \div 40$ м. При цьому, оптимальна продуктивність водоструменевого піногенератора повинна становити $75 \text{ м}^3/\text{хв}$. Піноутворювальна рідина потрапляє в генератор зі спеціальної ємності зі заздалегідь підготовленим розчином або вона може утворюватися за допомогою пінозмішувача під час пуску піногенератора в дію.

У джерелі [75] запропоновано автоматичну систему пожежогасіння для підземних тунелів з електросиловими кабельними комунікаціями, особливість якої полягає у сумісному використанні фторовмісної піни та вогнегасного порошку на основі вуглецю натрію, що подаються у пневматичний спосіб до осередку виникнення пожежі через дві відповідні мережі спринклерних голівок.

Що стосується останніх вітчизняних розробок піногенераторів високократної піни для гасіння пожеж в кабельних приміщеннях, галереях, тунелях тощо, то в журналі «Пожежна безпека» опубліковано статтю [76], в якій описано новий тип піногенераторів, оснащених турбореактивним механізмом обертання крильчатки. Зразки такого типу генераторів були представлені на спеціалізованій виставці «Пожежна та техногенна безпека України» (2005 рік).

Повітряно-механічна піна, порівняно з водою, має меншу вогнегасну здатність, при цьому, коли потрапляє до осередку горіння, швидко розкладається, а звільнене таким шляхом повітря підтримує процес горіння. Слід зауважити, що піногенеруючі установки самостійно, без додаткових

приладів, не завжди здатні розповсюдити піну по усій довжині кабельного тунелю [83].

Гасіння пожеж в кабельних тунелях за допомогою інертних газів [78, 79] могло б бути ефективним і раціональним, оскільки процес горіння без доступу кисню швидко припиняється. Однак інертні гази мають порівняно з водою і повітряно-механічною піною малу теплопоглинальну здатність. Внаслідок цього під час припинення подачі інертного газу та відновлення нормального провітрювання в осередку нагрівання кабельного тунелю нерідко виникає рецидив повторного спалаху. Застосування інертних газів у стаціонарних установках пожежогасіння суттєво обмежене через високу вартістю обслуговування спеціальних ємностей, призначених для зберігання інертних газів та питаннями надійності запірної арматури. Крім цього, деякі інертні гази, які використовувалися раніше, наприклад, ряд хладонів та фреонів, заборонені до використання сучасними міжнародними конвенціями з екологічних міркувань.

Такі ж недоліки властиві й аерозольним генераторам пожежогасіння [79], оскільки тонкодисперсні аерозолі за своїми вогнегасними властивостями і дією на осередок горіння схожі з інертними газами.

Важливість ефективного протипожежного захисту кабельних тунелів спонукає авторів різних країн до пошуку нетрадиційних способів і засобів. Наприклад, в [80] для гасіння пожеж електричних дротів і кабелів, прокладених в кабельних тунелях пропонується використовувати пластикову трубку, наповнену засобом пожежогасіння. Трубка поміщається усередині пакета кабелів, обидва її кінці підключені до джерела засобу пожежогасіння, що перебуває під тиском. Температура плавлення трубки підбирається в межах від 120 до 260⁰ С. При загорянні кабелю трубка плавиться в тому ж місці, де горить кабель, і засіб пожежогасіння подається просто до осередку пожежі. Проте

такий спосіб навряд буде ефективним для гасіння пожежі силових кабелів від струму короткого замикання в тисячі ампер, та і у разі виникнення об'ємної пожежі з інших причин (наприклад, при спалаху клемної коробки) трубка з вогнегасною речовиною не розплавиться вчасно, а витрата вогнегасної речовини через обмежено малий перетин трубки не локалізує пожежу.

Такі ж недоліки властиві й пристрою для обмеження можливості розповсюдження вогню при загорянні кабелів. Він складається з відкритого жолоба для прокладання кабелів, засипаного сипучим негорючим матеріалом. Такий захист лише на незначний час пригальмовує розвиток пожежі при пошкодженні силових кабелів, а надалі реально вже не впливає на розвиток пожежі.

Є приклади встановлення на кабелях біля протипожежних перегородок муфти з твердої вибухової речовини з кумулятивною канавкою і автоматично діючим детонатором. Вибух невеликого заряду повинен перерізати кабель та водночас збити поблизу полум'я. Такий спосіб протипожежного захисту кабельних тунелів на об'єктах електроенергетики навряд чи може знайти застосування через небезпеку самої наявності твердих вибухових речовин і можливості помилкового спрацьовування автоматично діючих детонаторів.

Останніми роками особлива увага надається пасивному вогнезахисту кабельних тунелів на основі сучасних композитних ізоляційних матеріалів, що спучуються. Наприклад, розроблені протипожежні подушки призначені для закладення і ущільнення універсальних кабельних проходок, створення вогнеперепонних поясів і розділення кабельних каналів на самостійні ділянки, захисту суміжних і прилеглих приміщень від розповсюдження вогню та диму і газів, що виділяються при горінні. Протипожежні подушки, що спучуються, є склотканевими чохлами, наповненими

порошкоподібними матеріалами з різними температурами спучування і спікання від 150⁰ С до 900⁰ С. Гарантійний термін зберігання таких подушок – 10 років.

У Німеччині у 2002 – 2006 роках на цю тему були також опубліковані роботи [81]. У [82] зазначається, що для протипожежного захисту кабелю і труб, відповідно до DIN 4102, використовуються вогнестійкі каналні системи, розраховані на захист від вогню від 30 до 120 хвилин. Зовнішня оболонка таких систем складається з листової жерсті (перший бар'єр для вогню, а також захист від механічних пошкоджень). Усередині канал складається з гіпсу, посиленого волокнами, де знаходиться зв'язана волога, яка випаровується при високій температурі і охолоджує дроти. У [83] фірма Doyna GmbH (Німеччина) для захисту трубопроводів і кабелю від дії високих температур пропонує комплекти, що є манжетою, яка складається з двох півкілець з елементами кріплення. У металевому корпусі півкілця розміщено матеріал, що спучується, із здатністю до 18-кратного збільшення об'єму при високих температурах. Також запатентовано комплекс елементів для захисту горизонтально розташованих кабельних каналів від розповсюдження полум'я при виникненні пожежі [84]. Крім того, застосовані елементи цегляної кладки, чисельні елементи з багаторівневим типом розташування, стінки корпусних елементів мають отвори для проходження кабелю і покриття з матеріалу зі здатністю спучуватися при високих температурах, а також покриття з термопластичного полімеру.

В Україні в роботі [85] надано оцінку вогнестійкості кабельних ліній в системах безпеки атомних електростанцій. Аналіз отриманих результатів показав, що кабельні лінії мають тривалість функціонування в умовах пожежі від 13 до 19 хвилин, що істотно менше нормативних 90 хвилин. Для забезпечення цього нормативного значення пропонується застосовувати вогнезахисне облицювання гіпсовими плитами завтовшки 40 мм.

Застосування автоматичних систем пожежогасіння для ліквідації пожежі на підстанціях, в кабельних тунелях та інших об'єктах енергопостачання шахт обґрунтовано в роботі [86]. При цьому, розглянуто питання про розрахунок загальної інерційності автоматичних систем пожежогасіння. Визначено час зростання температури в місці розташування теплових сповіщувачів автоматичних систем пожежогасіння до порогового значення температури спрацьовування. Крім того, проведено розрахунок загальної інерційності автоматичних систем пожежогасіння з урахуванням часу наростання температури.

Висока пожежна небезпека кабельних виробів обумовлена ще й відсутністю в чинних нормативних документах, чітких і достатньо ефективних протипожежних вимог. Наприклад, в Німеччині при прокладанні електричних кабелів, згідно з вимогами промислового стандарту DIN 4109-2, необхідно використовувати вогнезахисні заповнювачі.

Таким чином, сучасний рівень протипожежного захисту кабельних тунелів включає як традиційні способи гасіння з використанням води, піни та інертних газів, так і нетрадиційні – аж до пропозицій використовувати вибухові речовини. Причому, пасивний вогнезахист у комбінації з системами раннього виявлення пожежі може розглядатися як альтернативний варіант автоматичним системам пожежогасіння.

Різноманітність способів і технічних засобів профілактики й гасіння пожеж в кабельних тунелях як в Україні, так і за кордоном, свідчить про їх недостатню ефективність та спонукає до постійного пошуку нових рішень.

1.5 Аналіз нормативної бази, що забезпечує захист закритих об'ємів

Для основних потоків кабелів на електростанціях повинні влаштовуватися кабельні споруди (тунелі, шахти тощо). Вони мають бути ізольованими від технологічного

обладнання та такими, що виключають доступ сторонніх осіб до кабелів [98].

При розміщенні потоків кабелів на електростанціях шляхи кабельних ліній повинні вибиратись з урахуванням:

- запобігання перегріву кабелів від нагрітих поверхонь технологічного обладнання;
- запобігання пошкодженню кабелів при вибухах (загоряннях), пилу через запобіжні пристрої пилосистем;
- недопущення прокладання транзитних кабелів в технологічних тунелях гідропиловидалення, приміщеннях хімводоочистки, а також в місцях розміщення трубопроводів з хімічно агресивними рідинами;

Взаємно резервні кабельні лінії (силові, оперативного струму, засобів зв'язку, сигналізації, управління, систем пожежогасіння тощо) повинні прокладатись так, щоб при виникненні пожежі виключалася одночасна втрата взаємно резервних кабельних ліній. На ділянках кабельного господарства, де виникнення аварії створює небезпеку її значному розвитку, групи кабельних потоків слід ізолювати одну від одної. Розміщення кабелів по групах залежить від місцевих умов.

У межах одного енергоблоку дозволяється виконання кабельних споруд із межею вогнестійкості 0,5 год. При цьому технологічне обладнання, котре може служити джерелом пожежі (баки з мастилом, маслостанції тощо), повинно мати огороження з межею вогнестійкості 0,75 год, виключаючи можливість загоряння кабелів при виникненні пожежі на цьому обладнанні.

У межах одного енергоблоку електростанції дозволяється прокладання кабелів не в спеціальних кабельних спорудах, але за умови надійного захисту від механічних пошкоджень, припаданя пилом, іскор і вогню під час ремонту технологічного обладнання, забезпечення нормальних температурних умов для кабельних ліній та зручності їх обслуговування.

Кабельні поверхи і тунелі, в яких розташовані кабелі різних енергоблоків електростанцій, включаючи кабельні поверхи і тунелі під блочними щитами управління, повинні розділятися по блоках та окремо від інших приміщень кабельних поверхів, тунелів, шахт і каналів негорючими перегородками і перекриттями з межею вогнестійкості не менше 0,75 год в місцях проходу кабелів.

У місцях передбаченого проходу кабелів через перегородки і перекриття для забезпечення можливості заміни і додаткового прокладання кабелів повинна передбачатись перегородка із негорючого легкопробивного матеріалу з межею вогнестійкості не менше 0,75 год.

У кабельних спорудах значної протяжності теплових електростанцій повинні передбачатись аварійні виходи, розміщені на відстані не більше 50 м.

Кабельні господарства електростанцій повинні відмежовуватись від відхідних мережних кабельних тунелів і колекторів негорючими перегородками з межею вогнестійкості не менше 0,75 год.

Місця входу кабелів у приміщення закритих розподільних пристроїв і в приміщення щитів управління та захисту відкритих пристроїв повинні мати перегородки з межею вогнестійкості не менше 0,75 год.

Місця входу кабелів на блочні щити управління електростанцій мають бути закриті перегородками з межею вогнестійкості не менше 0,75 год.

Кабельні шахти повинні відмежовуватись від кабельних тунелів, поверхів і інших кабельних споруд негорючими перегородками (з межею вогнестійкості не менше 0,75 год) і мати перекриття зверху і знизу. Шахти значної протяжності при проходженні через перекриття, але не менше як через 20 м, повинні розділятися на відсіки негорючими перегородками з межею вогнестійкості не менше 0,75 год.

Прохідні кабельні шахти повинні мати вхідні двері та обладнуватися драбинами чи спеціальними скобами.

Кабельні поверхи, тунелі, галереї, естакади і шахти повинні відділятися від інших приміщень та сусідніх кабельних споруд негорючими перегородками і перекриттями з межею вогнестійкості не менше 0,75 год. Такими ж перегородками тунелі значної протяжності повинні розділятися на відсіки довжиною не більше 150 м – за наявності силових і контрольних кабелів і не більше 100 м – за наявності маслозаповнених кабелів. Площа кожного відсіку подвійної підлоги має бути не більше 600 м².

Двері в кабельних спорудах і перегородках з межею вогнестійкості не менше 0,75 год повинні мати межу вогнестійкості не менше 0,75 год в електроустановках, перерахованих вище і 0,6 год – інших електроустановках.

Виходи із кабельних споруд повинні передбачатись із зовні чи в приміщення з виробничими категоріями Г і Д. Кількість і розміщення виходів із кабельних споруд повинні визначатись відповідно до місцевих умов, але їх повинно бути не менше двох. При довжині кабельної споруди не більше 20 м допускається один вихід.

Двері кабельних споруд мають самозачинятися і обов'язково бути з ущільнювачами. Вихідні двері із кабельних споруд повинні мати замки, які відкриваються із кабельних споруд без ключа, а двері між відсіками мають відкриватися в напрямку найближчого виходу і обладнуватися приладами, що підтримують їх в закритому стані.

Прохідні кабельні естакади з містками обслуговування повинні мати виходи з драбинами. Відстань між входами має бути не більше 150 м. Відстань від торця естакади до входу на неї не повинна перевищувати 25 м.

Входи повинні мати двері, що не дають можливості вільного доступу особам, діяльність яких не пов'язана з обслуговуванням кабельного господарства. Двері повинні

мати замки, що самозачиняються і відкриваються без ключа з внутрішньої сторони естакади.

Відстань між входами в кабельну галерею при прокладанні в ній кабелів більше 35 кВ повинна бути не більше 150 м, а при прокладанні маслозаповнених кабелів – 120 м.

Зовнішні кабельні естакади і галереї повинні мати основні несучі будівельні конструкції (колони, балки), виготовлені із залізобетону з межею вогнестійкості не менше 0,75 год або із сталюого прокату з межею вогнестійкості не менше 0,25 год.

Несучі конструкції будинків і споруд, які не можуть небезпечно деформуватись чи знизити механічну стійкість при горінні груп кабелів, прокладених близько цих конструкцій на зовнішніх кабельних естакадах і галереях, повинні мати захист, який забезпечує межу вогнестійкості захисних конструкцій не менше 0,75 год.

Підземні тунелі за межами споруди повинні мати над перекриттям шар землі товщиною не менше 0,5 м.

Важливо, що при спільному прокладанні кабелів і теплопроводів в спорудах, додатковий нагрів повітря теплопроводом не повинен перевищувати 5 °С, для чого мають бути передбачені вентиляція і теплоізоляція на трубах.

В кабельних спорудах кабелі рекомендується прокладати цілими будівельними блоками, а їхнє розміщення має відбуватися таким чином. Різні групи кабелів – робочі і резервні вище 1кВ генераторів, трансформаторів тощо, які живлять електроприймачі 1-ї категорії, рекомендується прокладати на різних горизонтальних рівнях і розділяти перегородками.

Розподільні перегородки, вказані в пунктах 1, 3 і 4, повинні бути негорючими.

При застосуванні автоматичного пожежогасіння з використанням повітряно-механічної піни чи розпиленої води, перегородки, вказані в пунктах 1, 3 і 4, не потрібні.

На зовнішні кабельні естакади і в зовнішніх частково закритих кабельних галереях встановлювати розподільні

перегородки, вказані у пунктах 1, 3 і 4, не має потреби. При цьому резервуючі силові кабельні лінії (за винятком ліній до електроприймачів особливої групи 1-ї категорії) слід прокладати з відстанню між ними не менше 600 мм. Їх рекомендується розміщати на естакадах по обидва боки прогонної несучої конструкції (балки, ферми), в галереях – по різні боки від проходу.

Маслозаповнені кабелі слід прокладати, як правило, в окремих кабельних спорудах. Їх прокладання допускається з іншими кабелями. При цьому, маслозаповнені кабелі слід розміщувати в нижній частині кабельної споруди, окремо від інших, горизонтальними перегородками з межею вогнестійкості не менше 0,75 год. Такими ж перегородками слід відділяти одну від іншої маслозаповнені кабельні лінії.

Необхідність застосування об'єму автоматичних стаціонарних засобів для виявлення і гасіння пожеж у кабельних спорудах повинні визначатись на основі відомчих документів, затверджених у встановленому порядку.

У безпосередній близькості від входу люків і вентиляційних шахт (в радіусі не більше 25 м) повинні встановлюватися пожежні крани. Для естакад і галерей пожежні гідранти мають розміщуватися з розрахунком того, аби відстань від будь-якої точки осі траси естакади і галереї до найближчого гідранта не перевищувала 100 м.

У кабельних спорудах висота, ширина проходів і відстань між конструкціями і кабелями повинні бути не менше наведених в табл. (1.1). У порівнянні з наведеними в таблиці відстанями допускається місцеве влаштування проходів до 800 мм чи зниження висоти до 105 м на довжині 1,0 м з відповідним зменшенням відстані між кабелями по вертикалі при односторонньому і двосторонньому розміщенні конструкцій.

У місцях, насичених підземними комунікаціями, допускається виконання напівпрохідних тунелів висотою, порівняно меншою ніж передбачено в табл. 1.3, але не

менше 1,5 м, за умови виконання таких вимог. Напруга кабельних ліній повинна бути не більше 10 кВ; протяжність тунелю повинна бути не більше 100 м; інші відстані мають відповідати наведеним в табл. 1.3; на кінцях тунелю повинні бути виходи і люки.

Висота кабельних колодязів повинна бути не менше 1,8 м; висота камер не нормується. Кабельні колодязі для з'єднувальних, стопорних і напівстопорних муфт повинні мати розміри, які забезпечують монтаж муфт без розриву.

У підлозі колодязя потрібно влаштувати приямок для збирання ґрунтової і стічної води, а також передбачити водозливний пристрій у відповідності з вимогами, наведеними в [98].

Кабельні колодязі повинні оснащуватися металевими драбинами.

У кабельних колодязях кабелі і з'єднувальні муфти мають прокладатися на конструкціях, лотках чи перегородках.

Таблиця 1.1

Найменші відстані для кабельних споруд

Відстань	Найменші розміри при прокладанні, мм	
	У тунелях, галереях, кабельних поверххах і на естакадах	В кабельних каналах подвійних підлогах
Висота в просвіті	1800	Не обмежується, а не більше 1200 мм
По горизонталі в просвіті між конструкціями при двосторонньому їх розміщенні (ширина проходу)	1000	300 при глибині до 0,6 м; 450 при глибині більше 0,6 до 0,9 м; 600 при глибині більше 0,9 м
По горизонталі в просвіті від конструкції до стіни при односторонньому розміщенні (ширина проходу)	900	так само

Продовження таблиці 1.1

Відстань	Найменші розміри при прокладанні, мм	
	У тунелях, галереях, кабельних поверхах і на естакадах	В кабельних каналах подвійних підлогах
По вертикалі між горизонтальними конструкціями *: для силових кабелів з напругою: до 10 кВ 20 – 35кВ 110кВ і більше для контрольних кабелів і кабелів зв'язку, а також силових перерізом 3х25 мм ² з напругою до 1 кВ	200 250 300** 100	150 200 250 100
Між опорними конструкціями (консолями) по довжині споруди	800-1000	800-1000
По вертикалі і горизонталі в просвіті між одинарними силовими кабелями із напругою до 35 кВ***	Не менше діаметра кабеля	
По горизонталі між контрольними кабелями і кабелями зв'язку ***	Не нормується	
По горизонталі в просвіті між кабелями з напругою 110 кВ і більше	100	Не менше діаметра кабеля

Примітки: * - корисна довжина консолі повинна бути не більше 500 мм на
прямих ділянках траси;

** - при розміщенні кабелів трикутником 250 мм;

*** - у тому числі для кабелів, які прикладаються в кабельних шахтах.

Обсяг полімерних матеріалів складає не більш 7 л на
один погонний метр (умова нерозповсюдження кабелів з
індексом НГ), при цьому покриття кабелів вогнезахисним
складом не потрібно.

При обсязі полімерних матеріалів більше 7 л на один погонний метр у приміщеннях, не обладнаних автоматичним пожежогасінням, кабелі покривають вогнезахисним складом:

- усю поверхню одиночних контрольних кабелів;
- верхній шар контрольних кабелів, прокладених у коробах багатшарово;
- зовнішній шар контрольних кабелів у пучках або лотках.

Кабельні споруди значної протяжності варто поділяти перегородками на відсіки довжиною не більш 50 метрів. Перегородки повинні бути протипожежними 1-го типу з дверима, з межею вогнестійкості не менш 0,75 години, виготовленими з негорючих матеріалів. У цих спорудах варто передбачати світлові покажчики виходів з електроживленням від мережі аварійного освітлення.

Автоматичні установки пожежогасіння кабельних споруд експлуатуються з урахуванням вимог розділу 16 [98].

На період перебування в кабельних спорудах персоналу (при обході, ремонтних роботах тощо) запуск установок пожежогасіння з конкретного напрямку повинен переводитись на дистанційне управління, а після виходу людей знову встановлюватись на автоматичний режим.

Ремонт автоматичних стаціонарних установок пожежогасіння кабельних споруд повинен проводитись у найкоротший строк.

Забороняється прокладання броньованих кабелів усередині приміщень і кабельних спорудах без зняття горючого шару.

Двері секційних перегородок кабельних споруд повинні samozачинятися, відчинятися в бік ближнього виходу й мати щільний притвор. При експлуатації кабельних споруд, вони знаходяться і фіксуються в закритому положенні.

Усі місця розміщення кабелів через стіни, перегородки і перекриття ущільнюються для забезпечення вогнестійкості не менше 0,75 години. Ущільнення кабельних трас

виконується із застосуванням тільки вогнестійких негорючих матеріалів, сполук. При заміні або прокладанні нових кабелів відновлення вогнестійкого ущільнення кабельних трас проводиться безпосередньо після прокладання нового кабелю і до закриття наряду на роботи, що виконуються.

Виходи кабелів із прохідних металевих кабельних коробів, а також коробів подібних їм типів повинні виконуватись із застосуванням штуцерів, металевих рукавів або труб.

У металевих та інших коробах кабельні лінії слід розділяти перегородками і ущільнювати матеріалом, що має вогнестійкість не менше 0,75 год в таких місцях:

- при вході в інші кабельні споруди;
- на горизонтальних ділянках кабельних коробів через кожні 30 м, а також при розгалуженнях у інші короби головних потоків кабелів;
- на вертикальних ділянках кабельних коробів через кожні 20 м, крім того, при проходженні через перекриття такі вогнестійкі ущільнення додатково встановлюються на кожній відмітці перекриття.

Кабельні споруди нових підприємств і підприємств, що розширюються, мають прийматися в експлуатацію без недоробок, з оформленням відповідного акта приймання. Схема водопостачання і готовність установки пожежогасіння кабельних споруд до задачі її в постійну експлуатацію повинна забезпечувати необхідний тиск води, а також ручне управління запірною арматурою для забезпечення роботи в цей період.

Забороняється приймати в експлуатацію кабельні споруди енергопідприємств без ущільнення проходу кабельних ліній через будівельні конструкції, без протипожежних перегородок, дверей, що самозачиняються дренажних пристроїв в робочому стані, а також без автоматичних установок пожежогасіння й інших протипожежних заходів, передбачених проектом за діючими нормами й правилами.

Пил від твердого палива, що осів на кабельних трасах і в коробах (особливо, котельних і трактах паливopoдaчі), слід прибирати за затвердженим графіком, але не рідше одного разу на квартал, залежно від здатності пилу до самозапалювання.

У приміщеннях, де встановлено пристрої підживлення маслoнаповнених кабелів, забороняється зберігати горючі та інші матеріали, котрі не стосуються даної установки. Не допускається виконання пучків кабелів діаметром понад 100 мм. При проходженні пучків кабелів через перегородки, стіни й перекриття для ущільнення їх треба розкласти, як правило, в один шар, відокремлюючи один ряд і від іншого негорючими матеріалами товщиною не менше 20 мм.

У «Правилах пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України [98] визначені об'єкти.

Таблиця 1.2

Найменування будівель, приміщень і споруд	Категорії	(АПГ)	(АПС)
Кабельні споруди (кабельні тунелі, закриті галереї, поверхи, прохідні кабельні шахти) теплових електростанцій незалежно від потужності гідроелектростанцій потужністю 100 МВт і вище, підстанцій напругою 500 кВ і вище, а також закритих підстанцій глибокого введення напругою 110 кВ і вище	В	+	+
Кабельні споруди електростанцій, підстанцій (кабельні тунелі, закриті галереї, поверхи, прохідні кабельні шахти), в яких передбачений повний захист кабелів вогнезахисним покриттям	В	-	+

Автоматичні установки пожежогасіння кабельних споруд експлуатуються з урахуванням вимог розділу 16 [98].

Біля щитів управління установками пожежогасіння повинні розташовуватися таблички із зазначенням приміщень, котрі підлягають захисту або технологічного устаткування.

В установках водяного і пінного пожежогасіння на вузлах управління також слід надавати схеми обв'язки, на табличках – вказувати типи та кількість зрошувачів у секції, а засувки і крани – нумерувати, відповідно до схеми обв'язки. Такі ж схеми повинні розроблятися для насосних АУП.

Таблиця 1.3

Споруди різного призначення

Вид споруди	Нормативний показник та перелік приміщень, що підлягають обладнанню АУПГ та АУПС	
	АУПГ	АУПС
1. Кабельні підвали	В яких прокладено більше 12 кабелів	В яких прокладено від 5 до 12 кабелів
2. Кабельні підвали та тунелі енергетичних об'єктів (АЕС, ТЕЦ, ГЕС, ГРЕС, ТЕС тощо)	Незалежно від об'єму та кількості кабелів	-
3. Внутрішньоцехові кабельні та комбіновані тунелі	В яких прокладено більше 12 кабелів	В яких прокладено від 5 до 12 кабелів
4. Міжцехові кабельні та комбіновані тунелі, що розміщені поза будинками	В яких прокладено більше 12 кабелів	В яких прокладено від 5 до 12 кабелів

Таблиця 1.4

Приміщення, розташовані в будинках та спорудах різного
призначення

Вид приміщення	Нормативний показник та перелік приміщень, що підлягають обладнанню АУПГ та АУПС	
	АУПГ	АУПС
Приміщення, де у просторі над підвісною стелею відкрито прокладено проводи або кабелі з ізоляцією із горючих матеріалів (з урахуванням пункту 1.22 розділу 1 Переліку)	Незалежно від площі, при кількості проводів або кабелів більше 12 (з урахуванням пункту 1.21 розділу 1 Переліку)	За кількістю проводів або кабелів від 5 до 12

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ПОЖЕЖ У КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ

2.1. Піроліз горючих матеріалів, їх фазовий перехід до газоподібного стану

Як відомо, горіння з появою полум'я починається від запалювання, що представляє собою процес, при якому відбувається швидка екзотермічна реакція, що викликає зміни в матеріалі, який горить. Це призводить до різкого, порівняно з температурою навколишнього середовища, підвищення температури в ньому. Розрізняють два характерних види виникнення процесу горіння: 1) вимушене запалювання, спричинене яким-небудь джерелом (електрична іскра або стороннє полум'я); 2) самозаймання, під час якого зсередини відбувається нагрів твердої речовини як результат хімічних реакцій.

Виникнення більшості пожеж пов'язане з горінням твердих матеріалів, хоча в багатьох випадках горять рідкі та газоподібні речовини. Проте термін «горюча речовина» використовується в широкому розумінні для позначення всього того, що горить, незалежно від його агрегатного стану.

Різноманіття горючих речовин – велике, серед якого як найпростіші газоподібні вуглеводні, так і тверді речовини зі значною відносною масою і складною хімічною структурою. Деякі горючі речовини мають природне походження, такі як дерево, що містить целюлозу, інші – штучне, наприклад, поліуретан і поліетилен. Усі вони, перейшовши до газоподібного стану, реагуючи з киснем у повітрі, утворюють продукти горіння й виділяють тепло в процесі окислення. Утворення полум'я пов'язане з газоподібним станом речовини. Отже горінню твердих речовин передують процес

їхнього хімічного розкладання, піролізу. Оскільки цей процес потребує значно більшої витрати енергії, ніж просте випаровування, то температура твердих матеріалів, що горять, за даними [90], повинна становити не менше 400 °С.

Склад летких речовин, що вступають у хімічну реакцію з киснем, дуже різноманітний. Під час термічного розкладання деяка, а то й значна частина речовини, нагріваючись, утворює обуглену масу і тим самим заважає надходженню до полум'я утвореного горючого газу.

Тому всі процеси теплогазообміну під час пожеж необхідно починати розглядати з перебігу піролізу твердої горючої речовини. Отже у [90] вважається, що зміна маси твердої речовини при піролізі пропорційна самій масі:

$$\frac{dm}{d\tau} = -km, \quad (2.1)$$

де m – щільність твердої речовини, кг/м³;

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

τ – час, с.

Константу швидкості реакції, залежно від температури, описують співвідношенням Арреніуса [90]:

$$k = A \exp(-E_A / RT). \quad (2.2)$$

Тут A – передекспоненціальний множник, 1/с;

E_A – енергія активації, Дж/моль;

R – газова постійна, рівна 8,31 Дж/(К·моль);

T – температура, К.

Підставляючи вираз для константи швидкості реакції в рівняння (2.1), отримаємо:

$$\frac{dm}{d\tau} = -A m \exp(-E_A / RT). \quad (2.3)$$

Такий підхід дає можливість виразити залежність процесу піролізу від температури. Так, вважаючи, зазначену раніше,

температуру, рівною $T = T_n = 400 + 273 = 673$ К та інтегруючи рівняння (2.2) при постійній температурі, отримаємо:

$$m = m_0[-A \exp(-E_A / RT_n) \tau], \quad (2.4)$$

де m_0 – початкова маса горючого матеріалу, кг/м^3 .

Передекспоненціальний множник є заздалегідь невідомою величиною, але його можна визначити, знаючи період напіврозпаду твердої речовини. На рис. 2.1 побудована крива зміни маси твердої речовини від початку піролізу, знайдена при константі швидкості реакції $k = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

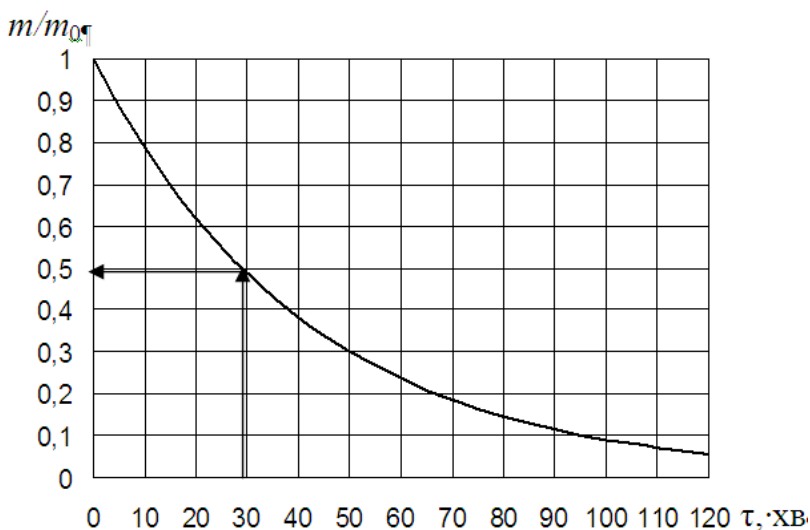


Рисунок 2.1. – Крива зміни відносної маси твердої речовини при піролізі

Як видно з рис. 2.1, період напіврозпаду при заданій швидкості реакції $k = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/с становить 30 хв, як і вказано в роботах [91, 92].

На рис. 2.2 наведена залежність піролізу твердої речовини від температури при фіксованій тривалості напіврозпаду, що дорівнює 30 хв.

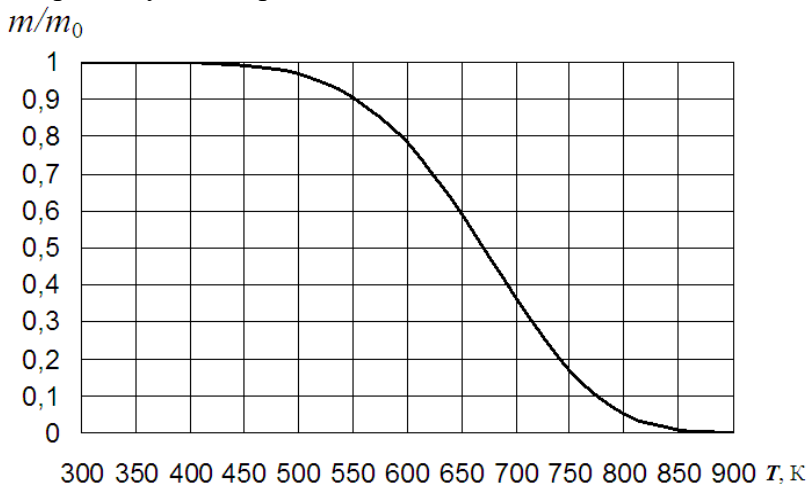


Рисунок 2.2. – Залежність маси твердої речовини від температури при фіксованій тривалості напіврозпаду при піролізі

З аналізу отриманої залежності (рис. 2.2) стає зрозумілим, що при температурі до 200 °С піроліз практично не відбувається, а при температурі 600 °С, через 30 хв, вся тверда речовина розкладається і переходить до газоподібного стану.

Розрізняють два режими горіння: горюча речовина утворює однорідну суміш з повітрям, і горюче попередньо розділене з повітрям. Другий режим якраз і відповідає режиму горіння твердого палива. У цьому випадку швидкість горіння дорівнює швидкості надходження летких речовин, що утворюються при піролізі, і безпосередньо пов'язана з інтенсивністю теплообміну між полум'ям і горючим, як видно з рис. 2.3.

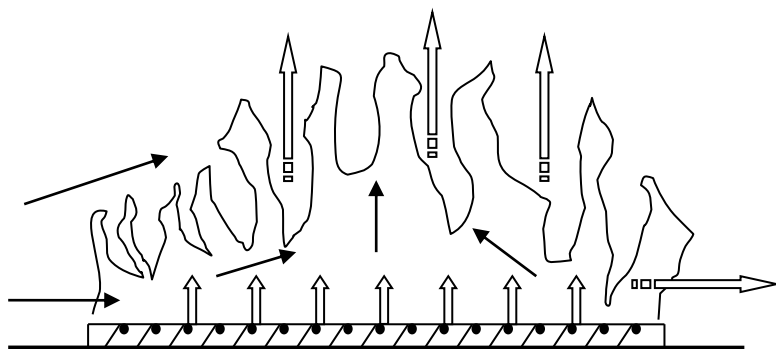


Рисунок 2.3. – Схема процесу перемішування повітря з леткими речовинами біля поверхні твердого палива (тонкими стрілками позначені потоки повітря, потовщеними стрілками – потоки летких речовин з поверхні з подальшим їх перемішуванням з повітрям і утворенням продуктів горіння)

Масова витрата продуктів піролізу, що надходить до потоку повітря, аналогічно з (2.1) пов'язана зі швидкістю його зміни:

$$\frac{dI}{d\tau} = -kI \quad (2.5)$$

де I – витрата продуктів піролізу, кг/с.

Розв'язком рівняння (2.5) за початкової умові $I(0)=I_0$ є експонентна залежність виду:

$$I = I_0 \exp(-k\tau), \quad (2.6)$$

де $I_0 = v_0 F$ – початкові витрати продуктів піролізу, кг/с;

v_0 – початкова масова швидкість надходження і вигорання продуктів піролізу в потоці повітря, кг/(м²·с);

$F = bl$ – площа термічного розкладання і горіння, м²;

l – довжина зони термічного розкладання і горіння, м;

b – ширина поверхні термічного розкладання, м.

Надходячи до потоку повітря, продукти піролізу вигоряють і виділяють тепло в одиниці об'єму $V = Sl$ залежно від концентрації кисню з інтенсивністю [90]:

$$q = \chi \frac{IH_c}{V} \frac{C}{C_0} = \chi \nu_0 H_c \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp(-k\tau), \quad (2.7)$$

де q – інтенсивність тепловиділення при горінні, кВт/м³;

χ – коефіцієнт неповноти згоряння горючого матеріалу;

H_c – теплота згоряння летких речовин, кДж/кг;

C – наявна концентрація кисню в повітрі, об. частки;

C_0 – концентрація кисню у потоці повітря, яке надходить (приймається рівною 0,21);

S – площа поперечного перерізу потоку повітря, м².

Якщо врахувати ще й швидкість переміщення пожежі, то формулу (2.7) можна представити у вигляді:

$$q = \chi \nu_0 H_c \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp[-k(w\tau - x)/u]. \quad (2.8)$$

де w – швидкість переміщення осередку пожежі, м/с;

x – наявна відстань від місця виникнення пожежі, м;

u – швидкість руху повітря, м/с.

Час є пов'язаним з відстанню і швидкістю руху повітря залежністю $\tau = x/u$. Добуток $w\tau$ швидкості переміщення осередку горіння на час τ , по суті, змінною довжиною зони горіння, що збільшуватиметься, допоки не досягне кінця укладання горючих матеріалів, рівного пожежному навантаженню $x = l$.

Таким чином, запропонована формула (2.8), на відміну від відомих емпіричних залежностей, враховує як швидкість розкладання продуктів піролізу горючих матеріалів, так і їх

згоряння з урахуванням переміщення пожежі ділянкою каналу при $x \leq wt$.

На рис. 2.4 представлені криві, що показують зміну по довжині каналу продуктів піролізу в потоці повітря в різний безрозмірний час $\bar{\tau} = wt/l$ з моменту виникнення пожежі при критерії швидкості піролізу $K = kl/u = 4$.

Аналіз отриманих результатів моделювання показує як розподіляються по довжині каналу в потоці повітря газоподібні продукти піролізу. Вони мають максимум на передньому фронті полум'я, де фіксується висока температура, що повільно знижуються залежно від розкладання горючих матеріалів. При цьому довжина зони піролізу повинна збігатися з довжиною пожежного навантаження горючого матеріалу і не виходити за його межі.

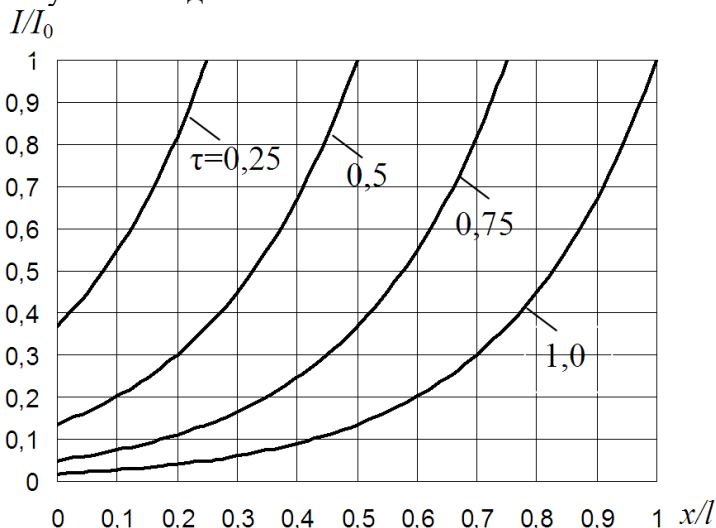


Рисунок 2.4. – Криві зміни по довжині каналу продуктів піролізу в потоці повітря в різний час з моменту виникнення пожежі

Отримана залежність (2.8) дає змогу простежити процес піролізу не тільки по довжині каналу, а й у часі в різних перерізах каналу.

Із аналізу результатів моделювання випливає, що піроліз у різних перерізах каналу починається тим пізніше, чим більше віддалений розглянутий переріз від місця виникнення пожежі. У той же час, поступово, режим горіння буде переходити в режим тління у міру зменшення надходження продуктів піролізу до потоку повітря. Таким чином, результати моделювання процесів піролізу та їх розподілу в потоці повітря, в часі і просторі, не суперечать фізичним уявленням, отже отримана залежність (2.8) може бути використана як функція джерела тепла.

2.2. Розробка математичної моделі розвитку пожеж на об'єктах значної протяжності

Запропоновані раніше математичні моделі пожеж та динаміки температур на різних об'єктах були засновані або на інтегральних, тобто середньооб'ємних параметрах [97], або на статичних методах теплових балансів [90], або не враховували жорсткого пов'язування температури з киснем [99]. При цьому теплове джерело задавалося у вигляді емпіричної залежності його від часу без переміщення в просторі [99]. У результаті, отримані теоретичні дані зводилися до емпіризму.

Разом з тим, експериментальні дані, особливо щодо розвитку великомасштабних пожеж [90, 97] свідчать про те, що існує жорсткий зв'язок між вмістом кисню і температурою в потоці повітря. Теплове джерело, по суті, є функцією від цих параметрів, що відображає як процеси піролізу твердих горючих матеріалів, так і процеси горіння з переміщенням осередку пожежі залежно від пожежного навантаження.

Функція інтенсивності тепловиділення (2.8) повинна включатися до рівняння конвективно-дифузійного

перенесення тепла в умовно циліндричному каналі, яке має вигляд [94, 95]:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + q, \quad (2.9)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

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

λ_1 – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м·К);

T – температура, К;

x – поздовжня, уздовж каналу, координата, м;

u – поздовжня швидкість повітря, м/с;

r – поперечна координата від центра симетрії перерізу каналу, м.

На рис. 2.5 наведена схема прив'язки системи координат до натурального об'єкта під час пожежі. Стрілками вказані напрямки руху потоків повітря з можливим зустрічним рухом продуктів згоряння.

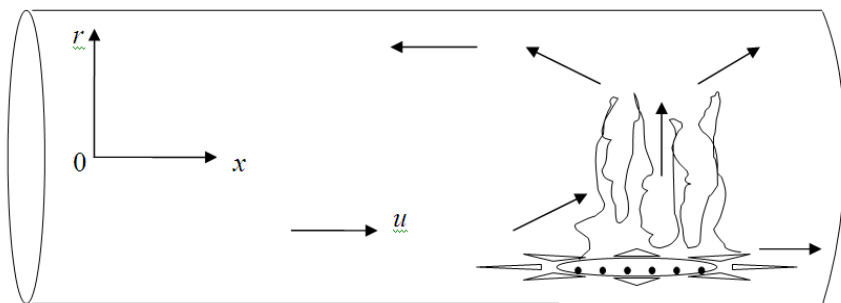


Рисунок 2.5. – Схема прив'язки системи координат до натурального об'єкта

Перетворимо рівняння (2.9) до вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + q / (\rho c_p), \quad (2.10)$$

де $a_1 = \lambda_1 / (\rho c_p)$ – коефіцієнт температуропровідності повітря, м²/с.

Оскільки канал знаходиться у твердому ґрунті, то дана задача теплообміну є спряженою. Тому до рівняння (2.10) необхідно додати рівняння теплопровідності ґрунту, аналогічне рівнянню (2.10), але без конвективного переносу і без врахування джерел тепла [95]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right), \quad (2.11)$$

де θ – температура ґрунту, К;

a_2 – коефіцієнт температуропровідності ґрунту, м²/с.

Для спрощення завдання будемо розглядати середню величину температури повітря по поперечному перерізу каналу [94, 95]. З цією метою інтегруємо рівняння (2.10) по поперечному перерізу каналу, вважаючи:

$$\tilde{T}(x, \tau) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R T(2\pi) dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R T r dr, \quad (2.12)$$

де R – радіус каналу, м.

Дещо перетворимо рівняння (2.10):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + q / (\rho c_p). \quad (2.13)$$

Розглянемо вид інтеграла

$$\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr = \frac{2}{R} \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial r}. \quad (2.14)$$

Після інтегрування рівняння (2.13) по площі поперечного перерізу каналу з урахуванням формули (2.14) отримаємо:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \left[\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial r} \right] + q / (\rho c_p). \quad (2.15)$$

На контакті вентиляційного потоку зі стінками каналу задаються переважно граничні умови четвертого роду [94]. Вони вказують на те, що температура та теплові потоки на виході з потоку повітря і на вході в ґрунт, повинні бути однакові:

$$1) \tilde{T}(x, R, \tau) = \theta(x, R, \tau); \quad 2) \lambda_1 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (2.16)$$

де λ_1 і λ_2 – коефіцієнти теплопровідності відповідно повітря і ґрунту, Вт/(м·К).

Згідно [94] можна прийняти, що при $r = R$ градієнт температури на стінці каналу пропорційний різниці температур:

$$\lambda_1 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 (\theta - T_{cm}), \quad (2.17)$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі потоку повітря стінкам каналу, Вт/(м²·К);

T_{cm} – температура стінки, К.

Оскільки коефіцієнт температуропроводності рівний $a_1 = \lambda_1 / \rho c_p$, то з урахуванням виразу (2.17) приведемо рівняння (2.15) до вигляду:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{2\alpha}{\rho c_p R} (\theta - T_{cm}) + q / (\rho c_p). \quad (2.18)$$

Оцінімо величини малості членів сум у рівнянні (2.11). Оскільки $r > R$, то в правій частині рівняння другий і третій доданки мають такий порядок малості:

$$\frac{1}{(R + \Delta r)\Delta r}, \quad \frac{1}{(\Delta r)^2}. \quad (2.19)$$

Якщо у третього доданка рівняння (2.11) прийняти порядок одиниці, то замість (2.19) отримаємо $\frac{\Delta r}{(R + \Delta r)}, 1$.

Звідси зрозуміло, що другий доданок має порядок малості набагато менший, ніж третій, і тому замість (2.11) отримаємо:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right). \quad (2.20)$$

Оскільки прогрів стінок каналу, як показали натурні експерименти, відбувається на незначну глибину (десь до 5 см [96]), то і поздовжній прогрів ґрунту вздовж осі x завдяки температуропровідності, також буде на незначну довжину, бо приріст углиб по r є значно меншим від поздовжнього приросту по x : $\Delta r / \Delta x \ll 1$. У результаті рівняння (2.20) ще більше спрощується і nebude вигляду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2}. \quad (2.21)$$

Представимо рівняння (2.21) в кінцевих різницях по радіусу і отримаємо:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_2}{\Delta r^2} (\theta_1 - 2\theta + T_{cm}) \quad (2.22)$$

Приймемо в глибині ґрунту температуру, що дорівнює температурі при нормальних умовах: $\theta_1 = T_0$. Крім того, на контакті стінки з потоком повітря, приймемо граничну умову у вигляді [94]:

$$\alpha_1(\tilde{T} - T_{cm}) = \alpha_2(T_{cm} - \theta), \quad (2.23)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі стінок каналу потоку повітря, $Вт/(м^2 \cdot К)$.

Розв'яжемо рівняння (2.23) відносно температури на стінці каналу:

$$T_{cm} = \frac{\alpha_1 \tilde{T} + \alpha_2 \theta}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (2.24)$$

Приймаючи коефіцієнти тепловіддачі однаковими ($\alpha_1 = \alpha_2$), замість (2.24) отримаємо $T_{cm} = (\tilde{T} + \theta)/2$.

З урахуванням вищевикладеного рівняння (2.22) набуде вигляду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\alpha_2}{2\Delta r^2}(\tilde{T} - \theta). \quad (2.25)$$

Тоді спроститься і рівняння (2.18), в результаті чого отримаємо:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{\alpha}{\rho c_p R}(\theta - \tilde{T}) + q/(\rho c_p). \quad (2.26)$$

Функція теплового джерела (2.8) повинна входити до рівняння переносу (2.26) тепла потоком повітря в каналі, однак, в (2.8) невідомою є функція концентрації кисню. Тому систему рівнянь (2.8), (2.25) і (2.26) необхідно доповнити

рівнянням переносу маси кисню з урахуванням втрат його при хімічних реакціях [95]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - q_k / \rho_k, \quad (2.27)$$

де D – коефіцієнт дифузії кисню в потоці повітря, $\text{м}^2/\text{с}$;
 q_k – інтенсивність витрачання кисню на хімічні реакції, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$;

ρ_k – густина кисню, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Інтенсивність витрат кисню тісно пов'язана з функцією теплового джерела і може бути представлена у вигляді:

$$q_k = qC_0 / H_c, \quad (2.28)$$

де C_0 – концентрація кисню в потоці повітря, яке надходить, об. частки.

Підставляючи вираз (2.28) в рівняння (2.27), отримаємо:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - qC_0 / (H_c \rho_k). \quad (2.29)$$

Таким чином, отримана замкнена система рівнянь (2.25), (2.26), (2.29) і (2.8), що дає змогу чисельними методами розв'язувати задачі виникнення і розповсюдження тепла в потоці повітря під час пожеж з урахуванням динаміки концентрацій кисню за відповідних початкових і граничних умов.

2.3. Моделювання тепломасообмінних процесів під час пожеж в каналах значної протяжності

Об'єднаємо рівняння (2.25), (2.26), (2.29) і (2.8) в єдину систему:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - q C_0 / (H_c \rho_k); \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (\theta - T) + q / (\rho c_p); \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{a_2}{2 \Delta r^2} (T - \theta); \\ q &= \frac{\chi \nu_0 b H_c}{S C_0} C e^{-k(wt-x)/u}.\end{aligned}\tag{2.30}$$

Варто зауважити, що у другому і третьому рівняннях системи (2.30) випущено індекс усереднення по поперечному перерізі каналу. Крім того, для узагальнення форм поперечних перерізів каналів прийнято відношення $1/R = \frac{2\pi R}{2\pi R^2} = \frac{\Pi}{2S}$ як відношення периметра поперечного перерізу каналу Π до його площі перерізу S .

Крайовими умовами для системи рівнянь (2.30) будуть початкові і граничні умови. Так до виникнення пожежі температура і концентрація кисню відповідають нормальним умовам. Тому можна записати:

$$1) C(x, 0) = C_0; \quad 2) T(x, 0) = T_0; \quad 3) \theta(x, 0) = T_0.\tag{2.31}$$

В якості граничних умов приймемо перед осередком пожежі і за ним на досить великих відстанях такі ж умови, що й до її виникнення:

$$\begin{aligned}1) C(0, \tau) = C(\infty, \tau) = C_0; \quad 2) T(0, \tau) = T(\infty, \tau) = T_0; \\ 3) \theta(0, \tau) = \theta(\infty, \tau) = T_0.\end{aligned}\tag{2.32}$$

Припустимо, що піроліз горючого матеріалу починається в результаті займання на деякій відстані від входу до каналу $x=x_1$. Теплове джерело в цьому випадку набуде, згідно з четвертим рівнянням системи (2.30), вигляду:

$$q(0, \tau) = \frac{\chi \nu_0 b H_c}{S} e^{-k w \tau / u}. \quad (2.33)$$

У цьому випадку прийнято, що кисню для горіння в місці виникнення пожежі цілком достатньо. Подальший відлік в четвертому рівнянні системи (2.30) слід вести для $x_1 < x < x_2$, тобто там, де розташований горючий матеріал.

Для зручності моделювання введемо безрозмірні параметри концентрації кисню і температур:

$$1). \bar{C} = C / C_0; \quad 2) \bar{T} = (T - T_0) / T_0; \quad 3) \bar{\theta} = (\theta - T_0) / T_0 \quad (2.34)$$

Характерними параметрами для часу і відстані можуть вважатися кратність обміну повітря на певній довжині, яку приймемо рівною максимальній довжині зони горіння $l = x_2 - x_1$ (рис 2.6).

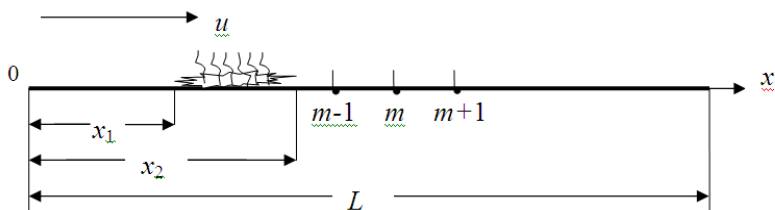


Рисунок 2.6. – Схема ділянки із зазначенням зони горіння

Тоді безрозмірна відстань і час будуть дорівнювати:

$$1). \bar{x} = x / l; \quad 2) \bar{\tau} = u \tau / l \quad (2.35)$$

У цьому випадку система рівнянь (2.30) набуде вигляду:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{\tau}} + \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} &= \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial \bar{x}^2} - \bar{q}AB\bar{C}; \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{\tau}} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= \frac{1}{Pe_1} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{x}^2} + St(\bar{\theta} - \bar{T}) + \bar{q}B\bar{C}; \\ \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial \bar{\tau}} &= \frac{1}{Pe_2} (T - \theta); \\ \bar{q} &= e^{-K(\bar{w}\bar{\tau} - \bar{x})}.\end{aligned}\tag{2.36}$$

У систему рівнянь (2.36) введені такі критерії подібності:

$Pe = ul / D$ – дифузійне число Пекле;

$Pe_1 = ul/a_1$ – температурне число Пекле в потоці повітря;

$Pe_2 = ul/a_2$ – температурне число Пекле в

навколишньому масиві;

$St = \frac{\alpha l l}{2 \rho c_p Q}$ – критерій Стантона теплообміну потоку

повітря з навколишнім масивом;

$K = \frac{kl}{u}$ – критерій швидкості піролізу;

$B = \frac{\chi v_0 F H_c}{\rho c_p T_0 Q}$ – критерій теплової енергії пожежі;

$A = \frac{\rho c_p T_0 C_0}{\rho_k H_c}$ – критерій теплоємності повітря.

У даному випадку добуток ширини зони горіння на її довжину представлено як площу горючої поверхні: $F = bl$, а витрата повітря – як добуток швидкості на площу перерізу каналу: $Q = uS$.

Узагальнюючи крайові умови (2.31) і (2.32), представимо їх у вигляді:

$$\begin{aligned}\bar{C}(\bar{x}, 0) &= \bar{C}(0, \bar{\tau}) = \bar{C}(\infty, \bar{\tau}) = 1; \\ \bar{T}(\bar{x}, 0) &= \bar{T}(0, \bar{\tau}) = \bar{T}(\infty, \bar{\tau}) = 0; \\ \bar{\theta}(\bar{x}, 0) &= \bar{\theta}(0, \bar{\tau}) = \bar{\theta}(\infty, \bar{\tau}) = 0; \\ \bar{q}(\bar{x}_1, 0) &= B; \quad \bar{q}(\bar{x} \neq \bar{x}_1, 0) = 0.\end{aligned}\tag{2.37}$$

Остання крайова умова вказує на те, що в результаті займання в точці $\bar{x}_1$ виникає теплове джерело, яке з часом буде переміщуватися і згасати відповідно до залежності четвертого рівняння системи (2.36).

Будемо шукати розв'язок поставленої задачі чисельним методом. З цією метою представимо перші три рівняння системи (2.36) в кінцевих різницях:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \bar{\tau}} + \frac{\Delta \bar{C}}{\Delta \bar{x}} &= \frac{1}{Pe_a} \frac{\Delta^2 \bar{C}}{\Delta \bar{x}^2} - \bar{q} \bar{A} \bar{B} \bar{C}; \\ \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{\tau}} + \frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \bar{x}} &= \frac{1}{Pe_1} \frac{\Delta^2 \bar{T}}{\Delta \bar{x}^2} + St(\bar{\theta} - \bar{T}) + \bar{q} \bar{B} \bar{C}; \\ \frac{\Delta \bar{\theta}}{\Delta \bar{\tau}} &= \frac{1}{Pe_2} (T - \bar{\theta}).\end{aligned}\tag{2.38}$$

Використовуючи наявну схему кінцевих різниць з різницями протитоку повітря, представимо перші і другі похідні будь-якої функції f у вигляді [105]:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta f}{\Delta \bar{\tau}} &= (f_m^{n+1} - f_m^n) / \Delta \bar{\tau}; \\ \frac{\Delta f}{\Delta \bar{x}} &= (f_m^n - f_{m-1}^n) / \Delta \bar{x}; \\ \frac{\Delta^2 f}{\Delta \bar{x}^2} &= (f_{m-1}^n - 2f_m^n + f_{m+1}^n) / \Delta \bar{x}^2,\end{aligned}\tag{2.39}$$

де m – номер центрального вузла по довжині каналу (рис.2.6);
 n – номер поточного часу.

Відношення приростів часу до приросту довжини дорівнює схемному числу Куранта:

$$Cu = \frac{\Delta \bar{t}}{\Delta \bar{x}} = \frac{u \Delta t}{\Delta x}. \quad (2.40)$$

Добуток числа Стантона на безрозмірний час дорівнюватиме схемному числу Стантона:

$$St \Delta \bar{\tau} = \frac{\alpha \Pi l}{2 \rho c_p Q} \frac{u \Delta \tau}{l} = \frac{\alpha \Pi \Delta \tau}{2 \rho c_p S} = St_c. \quad (2.41)$$

Тоді з урахуванням (2.39) – (2.41) система рівнянь (2.38) може бути розв'язана відносно шуканих функцій концентрації і температури на новому часовому шарі:

$$\begin{aligned} \bar{C}_m^{n+1} &= (Cu + \bar{D})\bar{C}_{m-1}^n + (1 - Cu - 2\bar{D})\bar{C}_m^n + \bar{D}\bar{C}_{m+1}^n - AB\bar{q}_m^n \bar{C}_m^n; \\ \bar{T}_m^{n+1} &= (Cu + \bar{a}_1)\bar{T}_{m-1}^n + (1 - Cu - 2\bar{a}_1 - St_c)\bar{T}_m^n + \bar{a}_1\bar{T}_{m+1}^n + St_c\bar{\theta}_m^n + B\bar{q}_m^n \bar{C}_m^n; \\ \bar{\theta}_m^{n+1} &= \bar{a}_2(\bar{T}_m^n - \bar{\theta}_m^n). \end{aligned} \quad (2.42)$$

Тут прийняті за безрозмірні числа дифузії і температуропроводності такі співвідношення:

$$\bar{D} = \frac{\Delta \bar{\tau}}{Pe} = \frac{D \Delta \tau}{\Delta x^2}; \quad \bar{a}_1 = \frac{\Delta \bar{\tau}}{Pe_1} = \frac{a_1 \Delta \tau}{\Delta x^2}; \quad \bar{a}_2 = \frac{a_2 \Delta \tau}{2 \Delta r^2}. \quad (2.43)$$

Аналіз отриманої системи рівнянь (2.42) показує, що умовою сталого рахунку є вимога:

$$Cu + 2\bar{a}_1 + St_c < 1. \quad (2.44)$$

При турбулентному режимі руху можна прийняти коефіцієнти дифузії і температуропроводності рівними один одному: $\bar{a}_1 = \bar{D}$ [98].

Функція джерела тепла повинна мати вигляд:

$$\bar{q}_m^n = e^{-K(\bar{w} \bar{\tau}_n - \bar{x}_m)}. \quad (2.45)$$

У цьому випадку джерело повинно вмикатися при $x=x_1$, а вимикатися при $x=x_2$, що відповідає точкам на схемі рис. 2.6.

Для пробного моделювання обрано такі параметри: схемне число Куранта $Cu=0,5$; безрозмірні коефіцієнти дифузії і теплопровідності $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0,1$; схемне число Стантона $St_c = 0,1$; критерій швидкості піролізу $K = 0,1$; відносна швидкість переміщення пожежі $\bar{w} = w/u = 0,1$; критерій теплової енергії пожежі $B = 2$; критерій теплоємності повітря $A = 0,1$. При цьому допускалося, що на час розвитку пожежі стінки каналу не встигають прогрітися, тому можна прийняти $\theta = T_0$, в результаті чого третє рівняння системи (2.42) не розглядається.

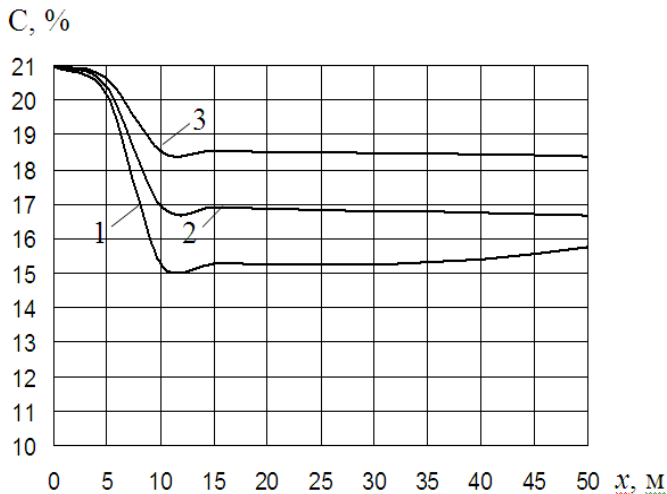


Рисунок 2.7. – Розподіл концентрацій кисню вздовж каналу при зосередженому джерелі горіння в різний час з моменту займання (1 – 2 хв; 2 – 10 хв; 3 – 20 хв)

Аналіз даних моделювання показує, що при зосередженому джерелі горіння в місці його розташування концентрація кисню різко знижується до 15%, а за джерелом – майже не змінюється. З часом концентрація кисню збільшується, що свідчить про зменшення інтенсивності горіння.

На рис. 2.8 показано, як концентрація кисню змінюється з часом: спочатку різко падає, а потім повільно наближається до свого початкового рівня.

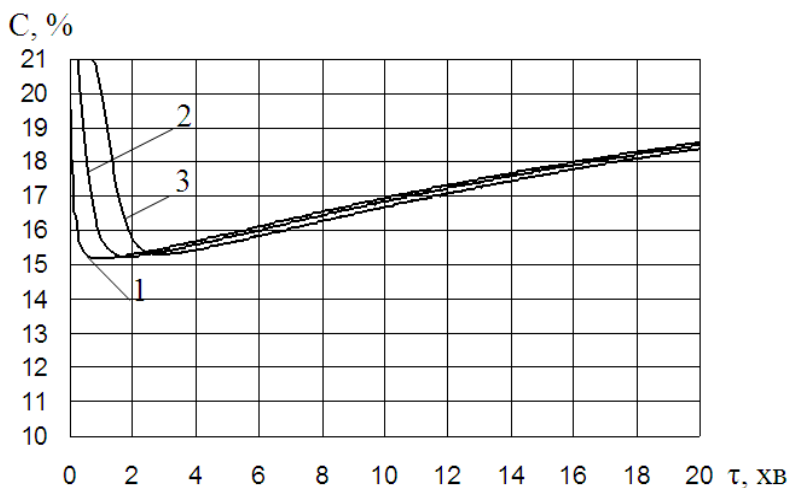


Рисунок 2.8. – Зміна в часі концентрації кисню на різних відстанях від входу до каналу при зосередженому джерелі горіння (1 – 10 м, 2 – 25 м, 3 – 50 м)

На рис. 2.9 представлені результати моделювання розподілу температури вздовж каналу при зосередженому джерелі горіння в різний час з моменту займання.

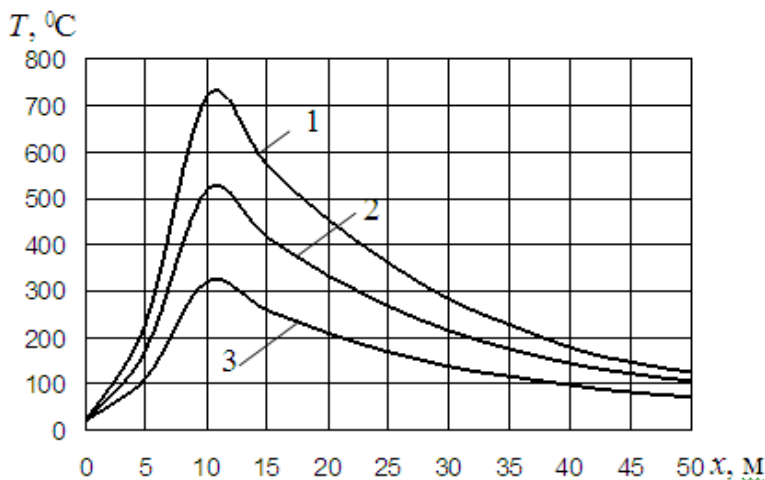


Рисунок 2.9. – Результати моделювання розподілу температури вздовж каналу при зосередженому джерелі горіння в різний час з моменту загоряння: (1 – 2 хв; 2 – 10 хв; 3 – 20 хв)

Результати моделювання чисельним методом показали, що температура продуктів згоряння по довжині каналу в різний час з моменту виникнення пожежі різко зростає від входу до каналу, а за осередком пожежі, повільно знижується. При цьому високі температури 100 – 200°C спостерігаються, згідно з рис. 2.9, навіть у 5 м від осередку пожежі, що не суперечить експериментальним даним. Це пояснюється кондуктивною передачею тепла спільно з променевим теплообміном проти потоку повітря. Як показують дані моделювання (рис. 2.10) в місці виникнення джерела горіння температура різко зростає, а потім повільно знижується. Те саме спостерігається і за осередком пожежі, але з деяким запізненням і дедалі меншим максимумом температури.

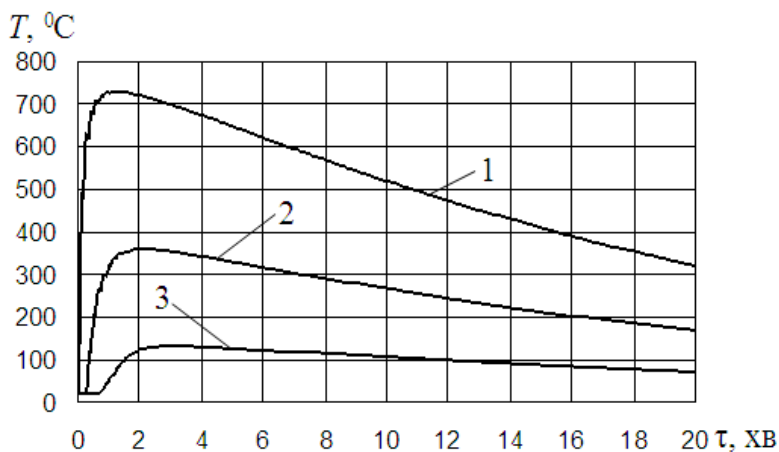


Рисунок 2.10. – Зміна в часі температури пожежних газів на різних відстанях від входу в канал при зосередженому джерелі горіння (1 – 10 м, 2 – 25 м, 3 – 50 м)

Ще одна серія чисельних експериментів в математичній моделі проведена при розосередженому джерелі горіння з повільною швидкістю переміщення осередку пожежі $w = 0,05$ м/с. Моделювання проводилося за такими ж вихідними параметрами, за винятком критерію теплової енергії пожежі, який в цьому випадку був прийнятий трохи меншим і дорівнював $B = 1,5$.

На рис. 2.11 показано розподіл концентрацій кисню вздовж каналу при розосередженому джерелі горіння з максимальною його довжиною 10 м.

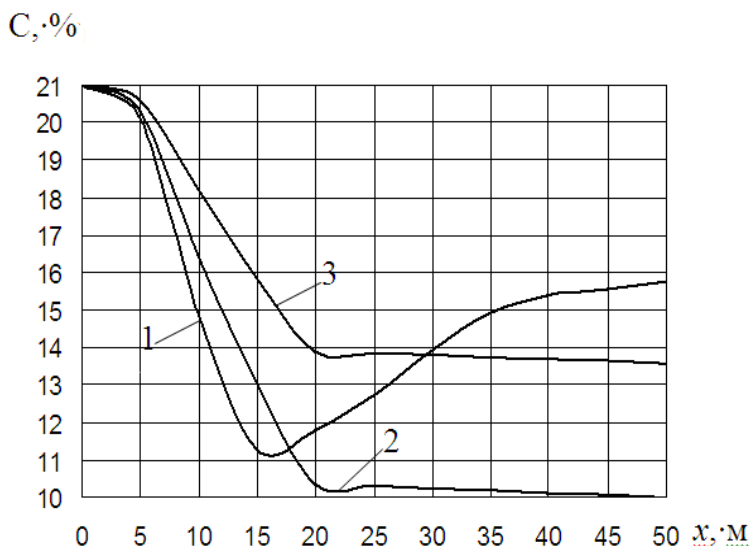


Рисунок 2.11. – Розподіл концентрацій кисню вздовж каналу при розосередженому джерелі горіння на довжині 10 м в різний час з моменту займання (1 – 2 хв, 2 – 10 хв, 3 – 20 хв)

Як видно (рис. 2.11), збільшення довжини осередку пожежі призводить до зниження кисню до 10 – 11%, після чого, на 10-й хвилині, концентрація кисню за осередком падає майже до нуля і лише на 20-й хвилині збільшується до 14%.

У той же час температура, на відміну від концентрації кисню, навпаки, різко збільшується (рис. 2.12), маючи в кінці осередку максимум, за яким спостерігається повільне зниження температури завдяки теплообміну зі стінками каналу.

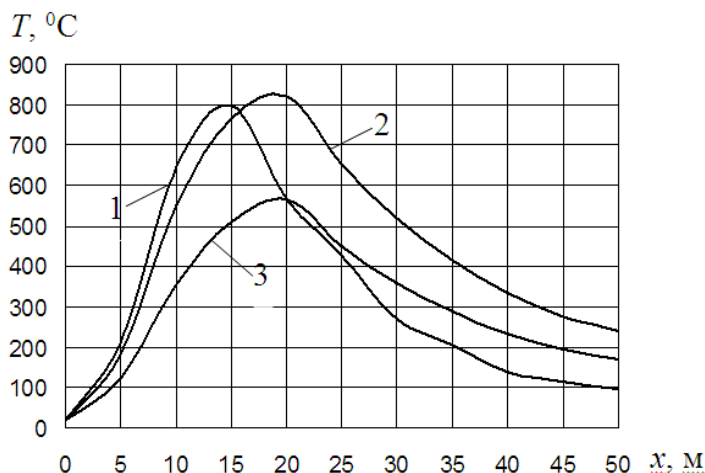


Рисунок 2.12. – Розподіл температури вздовж каналу при розосередженому джерелі горіння на довжині 10 м в різний час з моменту займання
(1 – 2 хв, 2 – 10 хв, 3 – 20 хв)

Порівнюючи рис. 2.9 з рис. 2.12, можна дійти висновку: чим ширша зона горіння, тим більшими є похилі криві температури і ширшою ділянкою каналу з високими температурами.

Таким чином, отримані результати моделювання пожеж чисельним методом правильно відображають процеси, які при цьому відбуваються, з урахуванням взаємозв'язку температури з концентрацією кисню і з переміщенням фронту горіння при піролізі горючих матеріалів, що повністю відповідає якісній картині процесів горіння під час експериментальних досліджень.

2.4. Квастаціонарні процеси тепломасопереносу в каналах значної протяжності під час пожежі

Незважаючи на те, що математичне моделювання чисельними методами має чимало переваг, порівняно з

аналітичними методами, в деяких випадках останні дають змогу одержати аналітичні залежності параметрів один від одного в наочному вигляді. До того ж, зважаючи на процеси, котрі швидко розвиваються спочатку і надалі поступово сповільнюються, можемо розглядати квазістаціонарний режим пожеж, як розвинутих, так і затухаючих, з якими в реальних умовах доводиться мати справу під час їх гасіння різними способами і засобами.

Тому будемо вважати, що систему рівнянь (2.30) для квазістаціонарних умов при холодній стінці ($\theta = T_0$), можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial C}{\partial x} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - q C_0 / (H_c \rho_k); \\ u \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (T_0 - T) + q / (\rho c_p); \\ q &= \frac{\chi \nu_0 b H_c}{S C_0} C e^{-k(w\tau - x)/u}. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Знехтуємо кондуктивним ($a_1 \approx 0$) і дифузійним ($D \approx 0$) переносами порівняно з конвективним переносом ($u \neq 0$) потоком повітря і дійдемо до системи диференціальних рівнянь виду:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial C}{\partial x} &= -q C_0 / (H_c \rho_k); \\ u \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\alpha \Pi}{2 \rho c_p S} (T_0 - T) + q / (\rho c_p) \end{aligned} \quad (2.47)$$

з функцією інтенсивності тепловиділення під час пожежі, як і раніше рівною:

$$\begin{aligned} q &= \frac{\chi \nu_0 b H_c}{S C_0} C e^{-k(w\tau - x)/u}, \\ q &= \frac{\chi \nu_0 b H_c}{S C_0} C e^{-k(w\tau - x)/u}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Підставляючи формулу (2.48) у перше і друге рівняння системи (2.47) і спрощуючи їх, отримаємо в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} &= -ABe^{-K(\bar{w}\bar{\tau} - \bar{x})}\bar{C}; \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= -St\bar{T} + Be^{-K(\bar{w}\bar{\tau} - \bar{x})}\bar{C}.\end{aligned}\quad (2.49)$$

У цьому випадку використовуються ті ж критерії подібності, що і в системі рівнянь (2.36). Щоразу фіксуючи час переміщення осередку пожежі, можна отримати аналітичні розв'язки системи рівнянь (2.49), приймаючи такі граничні умови:

$$\bar{C}(0, \bar{\tau}) = \bar{C}(\infty, \bar{\tau}) = 1; \quad \bar{T}(0, \bar{\tau}) = \bar{T}(\infty, \bar{\tau}) = 0. \quad (2.50)$$

Тут відлік ведеться з місця виникнення пожежі.

Розділимо змінні в першому рівнянні системи (2.49) і отримаємо при фіксованому часі $\bar{\tau} = \bar{\tau}_i$:

$$\frac{d\bar{C}}{\bar{C}} = -ABe^{-K(\bar{w}\bar{\tau}_i - \bar{x})}d\bar{x}. \quad (2.51)$$

Інтегруючи, отримаємо:

$$\ln \bar{C} = -AB\left[\frac{1}{K}e^{-K(\bar{w}\bar{\tau}_i - \bar{x})} + E\right], \quad (2.52)$$

де E – константа інтегрування.

Константу інтегрування визначимо, вважаючи, що в початковий час при $\bar{\tau}_i = 0$ виконується перша гранична умова

(2.50), і логарифм концентрації кисню повинен дорівнювати нулю. Тоді константа інтегрування виглядатиме таким чином:

$$E = \frac{AB}{K} e^{-K\bar{w}\bar{\tau}_i}. \quad (2.53)$$

У цьому випадку розв'язання першого рівняння системи (2.49) набуде вигляду:

$$\bar{C} = \exp\left[-\frac{AB}{K} e^{-K\bar{w}\bar{\tau}_i} (e^{K\bar{x}} - 1)\right]. \quad (2.54)$$

Очевидно, розв'язок задовольняє першій граничній умові. При цьому постійно повинна дотримуватися умова $\bar{w}\bar{\tau}_i \geq \bar{x}$. Так як $\bar{w}\bar{\tau}_i = \bar{x}_i$ означає стан переднього фронту полум'я, то для зручності формулу (2.54) можна подати у вигляді:

$$\bar{C} = \exp\left[-\frac{AB}{K} e^{-K\bar{x}_i} (e^{K\bar{x}} - 1)\right]. \quad (2.55)$$

Оскільки функція концентрації кисню відома (2.55), то друге рівняння системи (2.49) представляє собою лінійне неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку, розв'язання якого можна представити у вигляді [157, 161]

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) = e^{-St\bar{x}} \int_0^{\bar{x}} B e^{-K(\bar{w}\bar{\tau} - \xi) + St\xi} \bar{C}(\xi, \bar{\tau}) d\xi, \quad (2.56)$$

де ξ – змінна інтегрування.

Очевидно, при $\bar{x} = 0$ рішення дорівнює нулю, що відповідає другій граничній умові (2.50). Виносячи за знак

інтеграла константи по відношенню до змінної ξ , замість (2.56) отримаємо:

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) = B e^{-(K\bar{w}\bar{\tau} + St\bar{x})} \int_0^{\bar{x}} e^{(K+St)\xi} \bar{C}(\xi, \bar{\tau}) d\xi. \quad (2.57)$$

Інтеграл, який входить до формули (2.57), може обчислюватися чисельними методами, наприклад, методом трапецій або параболи [107].

Під час пожеж, які швидко розвиваються, для спрощення отриманих рішень з певним припущенням можна прийняти, що інтенсивність піролізу і надходження продуктів горіння змінюється тільки в часі і є однаковою на всій довжині зони горіння. У цьому випадку третє рівняння системи (2.48), згідно з (2.7), для кожного фіксованого часу набуде вигляду:

$$q = \chi \nu_0 H_c \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp(-k\tau_i). \quad (2.58)$$

Тоді, як і раніше, підставляючи формулу (2.58) до першого і другого рівняння системи (2.49) і спрощуючи їх, отримаємо в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} &= -A B e^{-K\bar{\tau}_i} \bar{C}; \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= -St\bar{T} + B e^{-K\bar{\tau}_i} \bar{C}. \end{aligned} \quad (2.59)$$

У цьому випадку одержуємо систему рівнянь з постійними коефіцієнтами. Розв'язання першого рівняння системи (2.59) з урахуванням першої умови (2.50) для

кожного фіксованого часу набуде на відміну від (2.55) вигляду:

$$\bar{C} = \exp(-ABe^{-K\bar{\tau}_i} \bar{x}). \quad (2.60)$$

Підставляючи отриманий розв'язок (2.60) в друге рівняння системи (2.59), отримаємо:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} = -St\bar{T} + Be^{-K\bar{\tau}_i} \exp(-ABe^{-K\bar{\tau}_i} \bar{x}). \quad (2.61)$$

Будемо спочатку шукати частковий розв'язок рівняння (2.61) у вигляді:

$$\bar{T}_q = E_1 \exp(-ABe^{-K\bar{\tau}_i} \bar{x}) \quad (2.62)$$

де E_1 – невідома поки константа.

Підставляючи припущений розв'язок в рівняння (2.61), отримаємо рівність:

$$-E_1 A B e^{-K\bar{\tau}_i} = -StE_1 + B e^{-K\bar{\tau}_i}, \quad (2.63)$$

звідки знаходимо шукану константу E_1 , при якій формула (2.62) дійсно є частковим розв'язком рівняння (2.61):

$$E_1 = \frac{B}{Ste^{K\bar{\tau}_i} - AB}. \quad (2.64)$$

У цьому випадку загальний розв'язок рівняння (2.61) можна представити у вигляді [107]:

$$\bar{T} = E_1 \exp(-ABe^{-K\bar{\tau}_i} \bar{x}) + E_2 \exp(-St\bar{x}). \quad (2.65)$$

Друга константа згідно з другою граничною умовою (2.50) дорівнює $E_2 = -E_1$. У результаті розв'язання (2.65), згідно з (2.64), набуде вигляду:

$$\bar{T} = \frac{B}{Ste^{K\bar{\tau}_i} - AB} [\exp(-ABe^{-K\bar{\tau}_i} \bar{x}) - \exp(-St\bar{x})]. \quad (2.66)$$

На рис. 2.13 представлені результати моделювання розподілу відносної концентрації кисню вздовж каналу за формулою (2.55) з урахуванням зміни інтенсивності горіння при збільшенні довжини зони горіння і за формулою (2.60) при постійній інтенсивності по довжині.

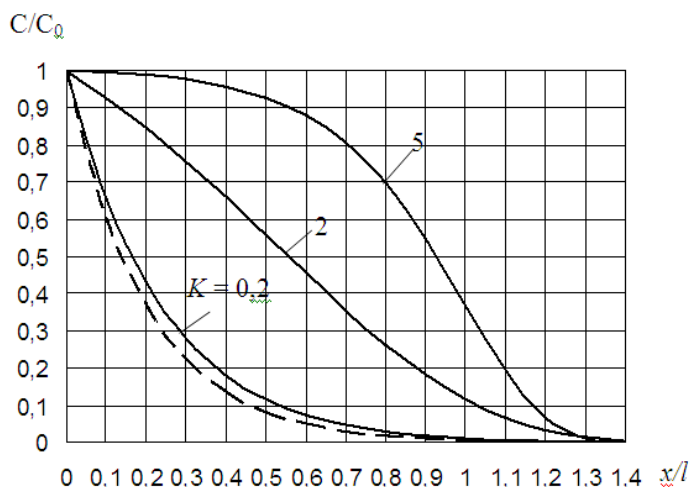


Рисунок 2.13. – Розподіл вздовж каналу відносної концентрації кисню при різному критерії швидкості піролізу і згоряння горючих матеріалів

Тут штриховою лінією представлені результати розрахунку за формулою (2.60) з постійною по довжині каналу інтенсивністю горіння.

Моделювання проводилося за таких критеріїв подібності: $A = 1$; $B = 5$ і змінного параметру K .

Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням довжини зони горіння виникає зона догорання і тління горючих матеріалів, яка збільшуватиметься з віддаленням від місця виникнення пожежі. Про це свідчить виникнення високих концентрацій кисню, що фіксуються далеко від попереднього фронту горіння. Разом із тим, за порівняно незначних зон горіння (штрихова лінія рис. 2.13), концентрація кисню різко падає з самого початку від місця виникнення пожежі. Очевидно, в цьому випадку суцільна і штрихова лінії майже збігаються, що дає змогу використовувати більш просту формулу (2.60).

На рис. 2.14 представлені результати моделювання розподілу відносної концентрації температури пожежних газів вздовж каналу при численному розв'язку рівняння (2.57) з урахуванням зміни інтенсивності горіння у разі збільшення довжини зони горіння, а також дані розрахунку за формулою (2.66) при постійній інтенсивності по довжині.

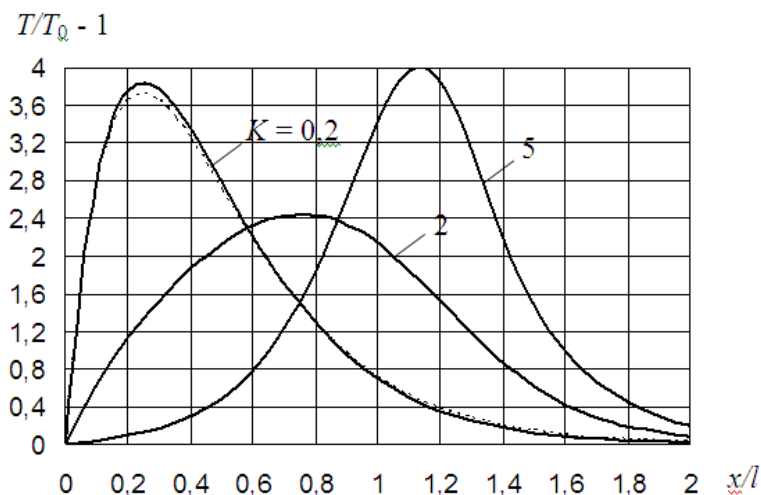


Рисунок 2.14. – Розподіл вздовж каналу відносної температури пожежних газів при різному критерії швидкості піролізу і згорянні горючих матеріалів

Тут штриховою лінією представлені результати розрахунку за формулою (2.66) при постійній по довжині каналу інтенсивності горіння.

Моделювання проводилося за таких критеріїв подібності: $A = 0,1$; $B = 50$; $St = 4$ і змінного параметра K . Інтеграл у формулі (2.57) розраховувався методом парабол.

Порівняння результатів розрахунку за формулами (2.57) і (2.66) показує, що вони добре узгоджуються між собою на невеликих довжинах зон горіння ($K = 0,2$ на рис. 2.14). Зі збільшенням довжини зони горіння, та параметру $K = kl/u$, як показують результати моделювання, зменшується нахил кривих температури. Це свідчить про вигорання матеріалу і утворення зони тління (рис.2.14, крива при $K = 5$).

Як доводять результати моделювання, отримані дані достовірно відображають реальну картину великомасштабних пожеж [97], однак, для пошуку деяких емпіричних констант, що входять до отриманих розв'язків, необхідні додаткові експериментальні дослідження.

2.5. Перевірка адекватності математичної моделі пожежі натурному об'єкту

Для встановлення адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту і пошуку емпіричних констант використані дані експериментальних досліджень великомасштабних пожеж, проведених НДІГС в прямолінійному каналі (траншея довжиною горизонтальної частини 181 м, глибиною 2 м і шириною 2 м). Траншея була накрита залізобетонними плитами, а її стінки обкладені цеглою. Експериментальна ділянка має три похилі виходи на поверхню, один з яких, боковий, для входу та виходу людей, зачиняється під час проведення експериментів, а два інших призначені для провітрювання горизонтальної частини вентилятором місцевого провітрювання в регульованому режимі (рис. 2.15).

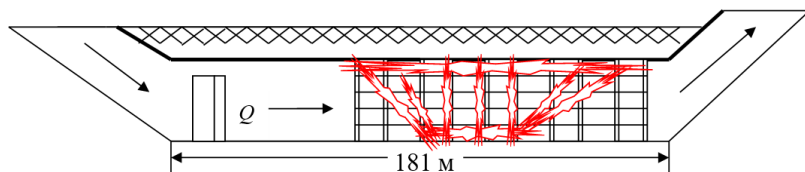


Рисунок 2.15. – Схема експериментальної ділянки

Експериментальну ділянку по всій довжині обладнано 8 колодязями, з'єднаними з поверхнею і горизонтальним каналом керамічними трубами для вимірювання на 23-х станціях температури і відбору проб пожежних газів, аналіз яких здійснювався в хімічній лабораторії. Під час проведення досліджень реєструвалася швидкість переміщення осередку пожежі в залежності від швидкості повітря, вимірювалася термопарами температура в трьох точках по висоті каналу і в 23-х точках – по його довжині.

Всього проведено 10 експериментів. Перед кожним із них встановлювалися дерев'яні рами (боки та покрівля) діаметром 14 – 16 см, які потім перекидалися обопами (дошками) товщиною 2 – 3 см.

Пожежа ініціювалася підпалюванням багаття на вході до відповідної ділянки. Багаття попередньо обливалося гасом або трансформаторною оливою. Довжина кріплення змінювалася від 30 м до 165 м при початковій швидкості повітря в широкому діапазоні 0,6 – 5,2 м/с.

Полум'я швидко охоплює дерев'яні конструкції і поширюється як за струменем повітря, так і назустріч йому, головним чином, під покрівлею ділянки. У результаті проведених експериментів отримано табличні та графічні дані щодо зміни температури в нижній, середній і верхній частинах каналу по його довжині, а також в різний час – від початку дослідів до понад чотиригодинного спостереження в залежності від довжини пожежного навантаження.

Унікальність і масштабність виконаних експериментальних досліджень важко переоцінити, а відтворити їх в теперішній час навряд чи можливо. Проте досі відсутні адекватні математичні моделі розвитку подібних пожеж, за винятком емпіричних формул щодо швидкості переміщення фронту горіння, довжини зони горіння та максимальної температури в залежності від швидкості руху повітря. Крім того, наведеної теоретичної залежності у вигляді експоненти кривої зменшення температури за осередком пожежі в стаціонарному режимі явно недостатньо для опису динаміки розвитку пожежі з урахуванням взаємозв'язку температури і концентрації кисню.

Для встановлення достовірності розробленої математичної моделі розвитку пожежі отримана формула (2.55) для концентрації кисню, яка приведена до розмірного виду:

$$C = C_0 \exp\left[-\frac{G_0}{k} e^{-kx_i/u} (e^{kx/u} - 1)\right]. \quad (2.67)$$

Тут параметр G_0 (1/с) для спрощення позначений замість зв'язки параметрів

$$G_0 = ABk / K = \frac{\rho_p T_0 C_0}{\rho_k H_c} \frac{\chi \nu_0 F H_c}{\rho_p T_0 Q} \frac{u}{l} = \frac{\chi \nu_0 b C_0}{\rho_k S}. \quad (2.68)$$

Очевидно, даний параметр не пов'язаний ні з довжиною зони горіння l , ні зі швидкістю руху повітря u , а відображає швидкість вигорання матеріалу з врахуванням пожежного навантаження в одиниці об'єму каналу.

На рис. 2.16 представлені результати порівняння розрахункових і експериментальних даних вмісту кисню в пожежних газах по довжині штольні в різний з моменту виникнення пожежі час.

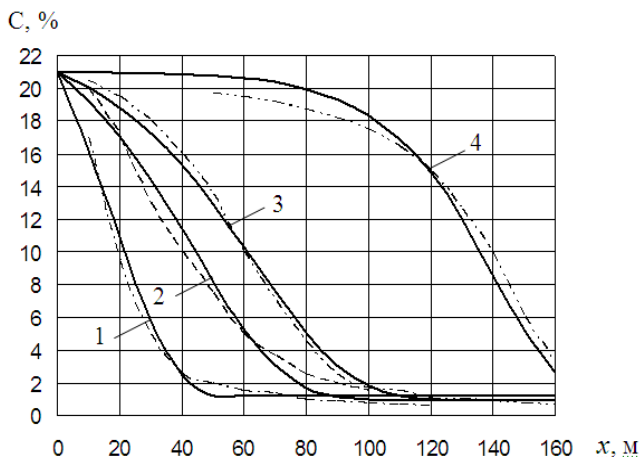


Рисунок 2.16. – Результати порівняння розрахункового вмісту кисню в пожежних газах з експериментальними даними по довжині каналу (1 – через 1 годину з моменту виникнення пожежі, 2 – через 2 години, 3 – через 2,5 години, 4 – 3,5 години)

Як видно, розрахункові криві повністю відображають закономірності процесів, що відбуваються при вигоранні кисню під час пожежі. Під час обробки розрахункових даних приймалося, що швидкість руху осередку пожежі або фронту полум'я може бути визначена за відомою, але перетвореною формулою:

$$v_{\Pi} = \frac{90,1u}{1 + 0,81u}, \quad (2.69)$$

де v_{Π} – середня швидкість переміщення осередку пожежі, м/год.

Так в даному експерименті при швидкості струменя повітря $u = 1$ м/с швидкість переміщення пожежі, згідно з (2.69), дорівнює $v_{\Pi} = 50$ м/год. Це відповідає довжині зони горіння і догорання $x_i = 50, 100, 125$ і 175 м.

Подальша обробка експериментальних даних показала: параметр швидкості горіння можна прийняти рівним

$G_0 = 0,25$ 1/с; константа швидкості піролізу знаходиться в межах $k = 0,035 - 0,05$ 1/с при середньому значенні $k = 0,045$ 1/с. У даному випадку розрахункові криві задовільно узгоджуються з експериментальними даними (рис. 2.16), що підтверджує адекватність математичної моделі натурному об'єкту.

Знаючи значення параметра $G_0 = 0,25$ 1/с, згідно (2.67), можна експериментально визначити швидкість вигорання дерева. Так при розрахунках прийнято: коефіцієнт неповноти згорання $\chi = 0,9$ [90]; густина кисню $\rho_k = 1,32$ кг/м³; початкова концентрація кисню $C_0 = 0,21$; площа поперечного перерізу каналу $S = 4$ м²; ширина палаючої поверхні (покрівлі та бічні стінки) $b = 6$ м. Підставляючи ці параметри до формули (2.67), знайдемо початкову швидкість вигорання горючого матеріалу $v_0 = 1,16$ кг/(с·м²).

Отримана формула (2.55) для температури також приведена до розмірного виду:

$$T(x, x_0) = T_0 + T_0 B e^{-(kx_0/u + Stx/l)} \int_0^x e^{(k/u + St/l)\xi} (C - C_1) d\xi, \quad (2.70)$$

де C_1 – концентрація кисню за часткового його вступання в хімічну реакцію (приймається за даними експериментів приблизно рівною одному відсотку).

На рис. 2.18 представлені результати порівняння розрахункових і експериментальних даних температури пожежних газів по довжині каналу в різний з моменту виникнення горіння час при максимальній довжині завантаження горючого матеріалу 165 м. Інтеграл, що входить до формули (2.70), визначався за формулою трапецій [107].

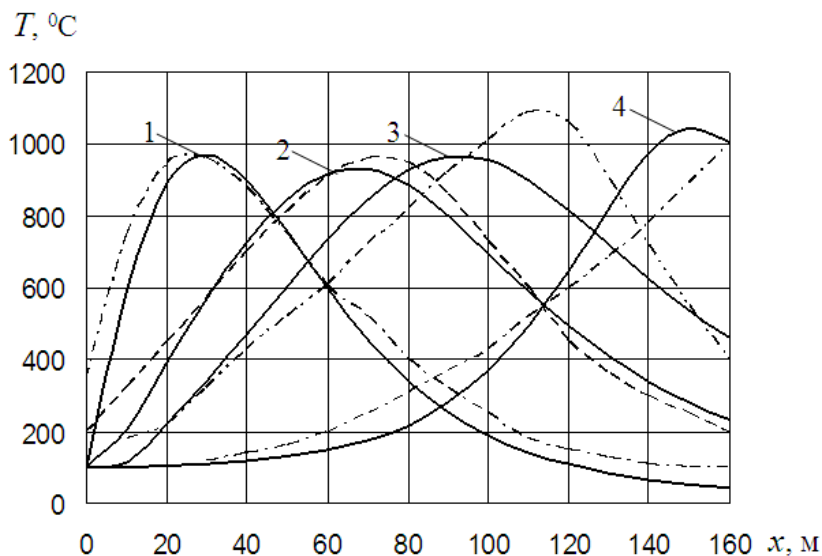


Рисунок 2.17. — Результати порівняння розрахункових кривих температури пожежних газів з експериментальними даними її розподілу по довжині каналу з пожежним навантаженням 165 м (1 – через 1 годину з моменту виникнення пожежі, 2 – через 2 години, 3 – через 2,5 години, 4 – 3,5 години)

Як видно (рис. 2.17), розрахункові криві температури задовільно узгоджуються з експериментальними даними. Деяка невідповідність розрахункових даних за тривалий період з моменту виникнення пожежі більше 3-х годин пояснюється зворотною тепловіддачею стінок потоку повітря, що не враховано в моделі квазістаціонарного режиму теплообміну. Проте це майже не позначилося на поведінці кривих температури.

Оскільки на вході до пожежної ділянки температура перебувала в межах від 100 до 200 °С, то для розрахунків прийнято $T_0 = 100$ °С (373 К). Під час обробки експериментальних даних встановлено, що критерій теплової енергії пожежі $B=13\text{--}16$, а число Стантона на одиницю

довжини зони горіння, що характеризує теплообмін зі стінками каналу, знаходиться в межах $St/l=0,02-0,03$ 1/м.

Покажемо, що під час середніх і незначних пожеж із довжиною зони горіння до 50 м для розрахунків розподілу температури можна використовувати формулу (2.66), яку представимо згідно з (2.68) у розмірному вигляді:

$$T = T_0 + \frac{BT_0}{Ste^{k\tau_i} - G_0 l / u} [\exp(-G_0 e^{-k\tau_i} x / u) - \exp(-Stx / l)]. \quad (2.71)$$

Формула (2.71) перетворена до більш зручного для розрахунку виду

$$T = T_0 + \frac{Ee^{-k\tau}}{\lambda - \mu e^{-k\tau}} [\exp(-\mu x e^{-k\tau}) - \exp(-\lambda x)]. \quad (2.72)$$

Параметри, що введені до формули означають:

$$E = \frac{\chi \nu_0 b H_c}{\rho_c p Q} \text{ – параметр теплової енергії пожежі, К/м;}$$

$$\mu = G_0 / u = \frac{\chi \nu_0 b C_0}{\rho_k Q} \text{ – інтенсивність вигорання}$$

матеріалу, 1/м;

$$\lambda = St / l = \frac{\alpha \Pi}{2 \rho_c p Q} \text{ – інтенсивність теплообміну з}$$

навколишнім масивом, 1/м.

На рис. 2.18 представлені результати порівняння розрахункових і експериментальних даних температури пожежних газів по довжині каналу в різний час з моменту виникнення горіння з пожежним навантаженням на довжині 30 м. Як видно, розрахункові криві температури задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

Хоча за зоною горіння й немає горючого матеріалу, проте, формула (2.72) узгоджується з експериментальними

даними на всьому розглянутому проміжку. Це пояснюється тим, що за зоною горіння йде зниження температури завдяки теплообміну з боковими стінками каналу.

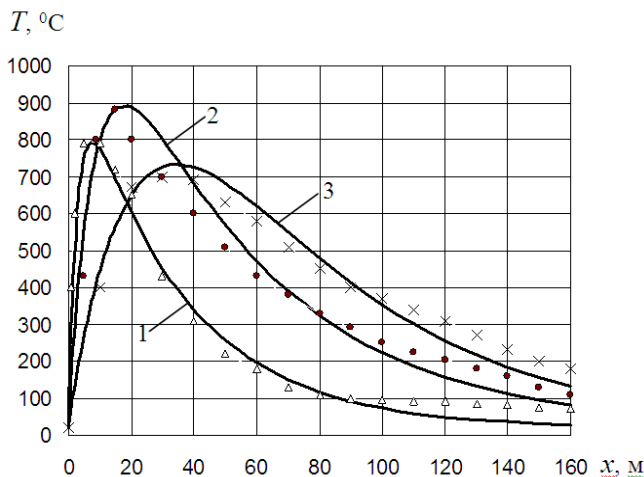


Рисунок 2.18. – Результати порівняння розрахункової температури пожежних газів з експериментальними даними по довжині каналу з пожежним навантаженням на довжині 30 м (1 – через 8 хв з моменту виникнення пожежі, 2 – через 18 хв, 3 – через 32 хв)

Більш обґрунтовано було б, аби виділялося дві зони: зона розташування горючих матеріалів і та, що розташована за нею.

Тоді замість (2.72) отримаємо дві формули:

$$T = T_0 + \frac{Ee^{-k\tau}}{\lambda - \mu e^{-k\tau}} [\exp(-\mu x e^{-k\tau}) - \exp(-\lambda x)], \quad \text{якщо } 0 \leq x \leq x_1; \quad (2.73)$$

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \exp(-\lambda x), \quad \text{якщо } x_1 \leq x \leq \infty,$$

де x_1 – відстань до переднього фронту горіння, що не перевищує довжину пожежного навантаження, м;

T_1 – температура в кінці розташування пожежного навантаження, що визначається за першою формулою при $x = x_1$, К.

Відстань до переднього фронту полум'я повинна визначатися відповідно до швидкості переміщення осередку

пожежі. Так, у другому експерименті ця швидкість дорівнювала $v_{\text{п}} = 1$ м/хв.

При узгодженні розрахункових і експериментальних даних температури пожежних газів встановлено, що параметри, які входять до формули (2.72), для другого експерименту такі: $E = 534$ К; $\mu = 0,41$ л/м; $\lambda = 0,02 - 0,03$ л/м.

Це дало можливість визначити коефіцієнт тепловіддачі пожежних газів породам $\alpha = 12 - 19$ Вт/(м²·К); швидкість вигорання дерева $v_0 = 0,032$ кг/(м²·с); константу швидкості піролізу горючих матеріалів $k = 1,2 \cdot 10^{-3}$ л/с і теплоту згоряння $H_c = 1,56 \cdot 10$ кДж/кг. При цьому використовувалися такі вихідні дані: коефіцієнт неповноти згоряння $\chi = 0,9$; густина повітря $\rho = 1,2$ кг/м³; густина кисню $\rho_k = 1,32$ кг/м³; початкова концентрація кисню $C_0 = 0,21$; швидкість повітря $u = 1$ м/с; площа поперечного перерізу каналу $S = 4$ м²; периметр поперечного перерізу каналу $\Pi = 8$ м, ширина палаючої поверхні (покрівля та бічні стінки) $b = 6$ м; довжина пожежного навантаження $l = 30$ м.

Таким чином, експериментальна перевірка результатів теорії переконливо довела, що піроліз твердих матеріалів і вступ у хімічну реакцію з киснем їх газоподібних продуктів термічного розкладання достовірно описує теплогазообмінні процеси в каналах значної протяжності під час пожеж, не вдаючись до задавання параметрів теплових джерел у вигляді функцій емпіричного характеру

Отримані результати теоретичних досліджень щодо виникнення і розвитку пожеж в каналах значної протяжності дають можливість дослідити вплив різних способів пожежогасіння на процеси горіння.

2.6. Експериментальне дослідження умов виникнення і розвитку пожеж у кабельних тунелях і порівняння їх з теоретичними даними

Пожежі в кабельних тунелях на відміну від пожеж у приміщеннях, вугільних шахтах та інших об'єктах, мають свою

специфіку. Для дослідження таких процесів, а також процесів гасіння пожеж різними засобами [201], сконструйована фізична модель, схема якої представлена на рис. 2.19.

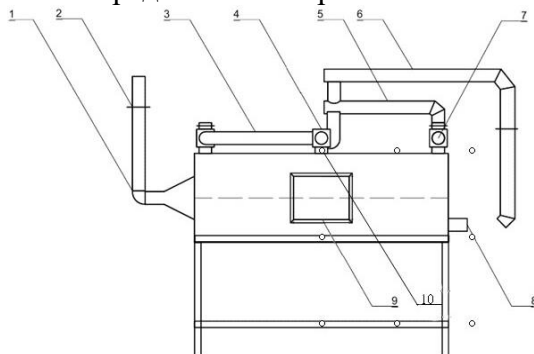


Рисунок 2.19. – Установка визначення горіння кабелю та ефективності гасіння різними вогнегасними речовинами в закритих об'єктах класу «А», «В», «Е»:

1 – трубопровід для видалення продуктів згоряння в атмосферу, 2 – шубер, 3 – холодильник, 4 – вентилятор, 5, 6 – трубопровід для проведення рециркуляції, 7 – отвір для подачі вогнегасного порошку, 8 – отвір для підсмоктування повітря, 9 – оглядове вікно, 10 – електродвигун

Схема розміщення термоперетворювачів наведена на рис. 2.20.

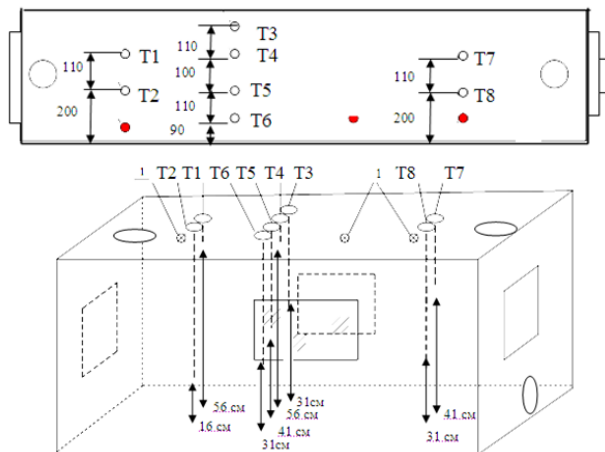


Рисунок 2.20. – Схема розміщення термоперетворювачів і отворів для відбору газових проб 1

На рисунку: Т-1 L-9 – цифра «9» означає довжину термоперетворювача в сантиметрах (замір температури від підлоги на висоті 56 см); Т-2 L-49 (замір температури на висоті 16 см); Т-3 L-34 (замір температури на висоті 31 см); Т-4 L-9 (замір температури на висоті 56 см); Т-5 L-24 (замір температури на висоті 41 см); Т-6 L-34 (замір температури на висоті 31 см); Т-7, L-24 (замір температури на висоті 41 см); Т-8, L-34 (замір температури на висоті 31 см).

Довжина камери становить 2 м, а її висота і ширина у просвіті, відповідно, 0,6 м і 0,4 м.

Таким чином, наведений діаметр камери дорівнює:

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

При реальному наведеному діаметрі кабельного тунелю 2 м геометричний масштаб моделювання становить 1:4.

Потужність витяжної вентиляції забезпечує рух повітряного потоку всередині камери від 0,024 до 0,076 м³/с із середньою швидкістю 0,1 - 0,3 м/с. Це відповідає числу Рейнольдса:

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

Таким чином, режим руху газів у камері є турбулентним як на реальному об'єкті, тобто – значно більшим за поріг ламінарного руху, що дорівнює 2000.

Кабельна продукція розміщується на лотках на висоті 20, 30 см від нижнього рівня камери. В камеру згоряння завантажують 7,25 кг кабельної продукції, з якої 5 кг це горюча ізоляція, кабелі довжиною 1 м, п'ять частин займають площу 0,3 м². Підпалюють кабельну лінію протягом 4 хв газовим пальником з робочою довжиною 30 см; висота полум'я сягає 15 см, зі сторони отворів, через які подається

повітря для підтримки горіння. За даний період часу настає стійке полуменеве горіння.

Запалювання здійснюється при швидкості потоку повітря, на вході до камери, $0,024 - 0,076 \text{ м}^3/\text{с}$. Підсмоктування повітря відбувається через отвори: перше – кругле, площею $0,00785 \text{ м}^2$, друге, прямокутної форми, – зі змінною площею від $0,078 \text{ м}^2$ до $0,0 \text{ м}^2$.

При площі верхнього отвору $0,078 \text{ м}^2$ продукти згоряння виділяються через отвір, оскільки, його верхня частина розташована значно вище від рівня нейтральної зони.

Якщо площа верхнього отвору менша за $0,028 \text{ м}^2$, то продукти згоряння практично повністю видаляються витяжною вентиляцією.

Максимальна температура в камері сягає $700 - 800^\circ\text{C}$ на 10–12 хв вільного горіння.

Під час горіння кабельного ізоляційного матеріалу утворюється значна кількість продуктів згоряння, що викликає зменшення притоку свіжого повітря до камери. На початковій стадії розвитку горіння температура швидко зростає завдяки достатній кількості кисню в камері. Зі зменшенням припливу повітря температура горіння знижується до $470-500^\circ\text{C}$ і має хвилеподібний процес горіння до початку затухання.

Із метою встановлення ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях різними засобами попередньо було проведено експерименти в лабораторних умовах без впливу на осередок пожежі будь-якого засобу.

Для проведення досліду за цих умов також було використано 5 кг горючої ізоляції з металевими провідниками. Підпалювання тривало протягом 4 хв, при роботі припливної вентиляції. На рис. 2.21–2.25 представлені результати вимірювання в часі температури пожежних газів у кабельному тунелі при різних режимах вентиляції аж до закриття отворів.

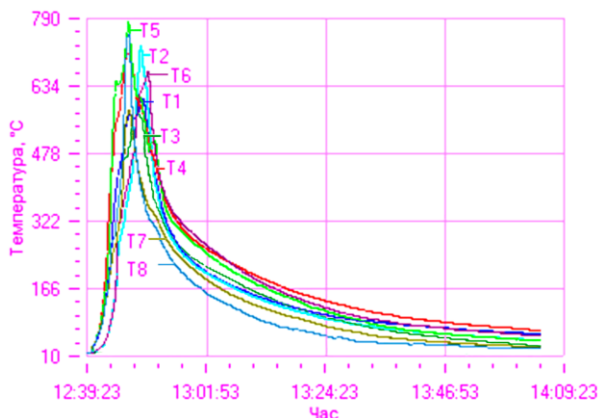


Рисунок 2.21. – Динаміка температури в кабельному тунелі при максимальному підсосі повітря

Підпалювання тривало протягом 4 хв. Максимальної температури горіння досягнуто на 12 хв, після чого відбулося затухання. Швидкість руху повітря на виході напірної порожнини вентилятора дорівнювала 4,2–4,5 м/с. Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря $F_{\text{отв}} = (0,28 \cdot 0,20) + 0,00785 = 0,0638 \text{ м}^2$.

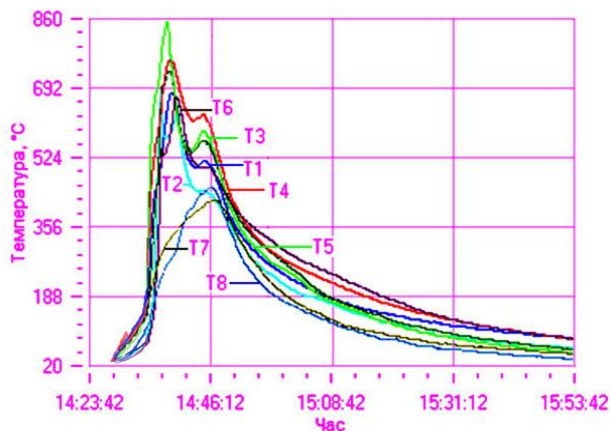


Рисунок 2.22. – Динаміка температури в кабельному тунелі при функціонуванні робочої витяжної вентиляції, відкритих отворів для підсосу повітря розміром $0,05 \text{ м}^2$

Підпалювання тривало також протягом 4 хв, за дії робочої припливної вентиляції. Температура сягла максимального показника на 12 хв, після чого відбувалося згасання з повторним спалахом і подальшим горінням. Зниження температури до 100°C сталося на 70 хв від початку горіння. Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря $F_{\text{отв}} = (0,28 \cdot 0,15) + 0,00785 \approx 0,05 \text{ м}^2$.

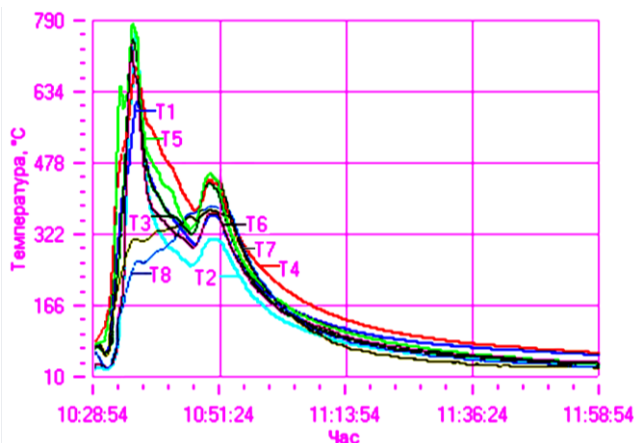


Рисунок 2.23. – Динаміка температури в кабельному тунелі за дії робочої витяжної вентиляції, відкритих отворів для підсосу повітря розміром 0,036 м²

Підпалювання проходило протягом 4 хв, при робочій припливній вентиляції, при відкритому отворі для підсосу повітря площею 0,036 м². Максимальну температуру горіння досягло на 12 хв, після чого відбувалося згасання з повторним спалахом, на 18-й хв, і подальшим горінням. Зниження температури до 100 °C сталося через 86 хв з початку дослідів. Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря $F_{\text{отв}} = (0,28 \cdot 0,10) + 0,00785 \approx 0,036 \text{ м}^2$.

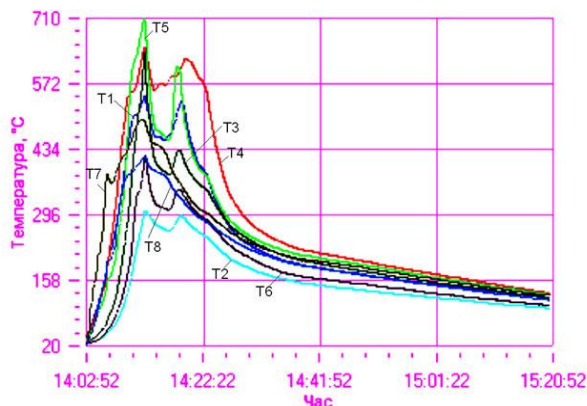


Рисунок 2.24. – Динаміка температури в кабельному тунелі за дії робочої витяжної вентиляції, відкритих отворів для підсосу повітря розміром 0,022 м²

Підпалювання тривало протягом 4 хв, за дії робочої припливної вентиляції. Температура горіння сягнула максимального показника на 12 хв, після чого відбувалося затухання з повторним спалахом і подальшим горінням. Зниження температури до 100°C протягом 50 хв після припинення горіння.

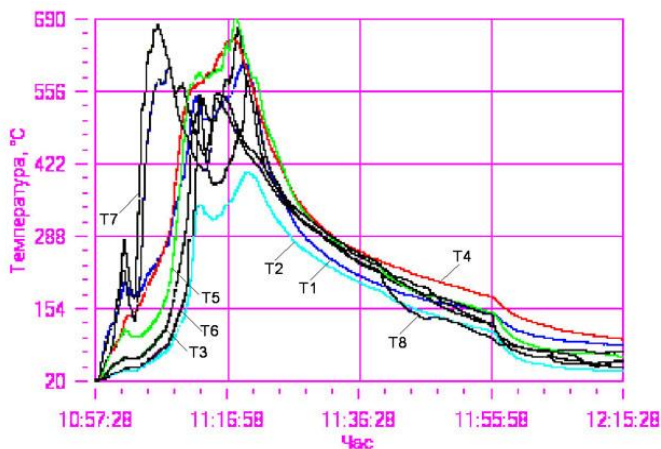


Рисунок 2.25. – Динаміка температури в кабельному тунелі при закритих отворах припливу повітря

У цьому випадку максимальної температури горіння було досягнуто також на 12 хв, після чого було припинено доступ повітря й відбулося затухання з повторним спалахом, вибухом і подальшим тлінням. Зниження температури до 100 °С тривало протягом 58 хв після припинення горіння.

Результати експериментальних даних показують, що зі зменшенням доступу повітря до осередку пожежі, особливо при зачинених отворах, продовжується процес загасання, і режим горіння переходить в режим тління. Найвищі температури, як видно з рис. 2.21 – 2.25, фіксуються термодатчиками (Т-4 і Т-5), розташованими в центрі зони горіння.

Ще один експеримент проведено з вимірюванням не тільки температури, а й концентрації різних пожежних газів. У табл. 2.1 наведені експериментальні дані температури, концентрацій кисню і метану під час виникнення, розвитку і згасання пожежі в кабельному тунелі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння.

Таблиця 2.1

Експериментальні дані щодо розвитку пожежі у
кабельному тунелі

№ з/п	Час горіння, хв	Швидкість повітря в отворах, м/с		Приплив повітря, м ³ /с		Температура (максимальна) °С	Вміст	
		Ø 0,1	□(0,28 ×0,10)	Ø	□		Кисню	Мета ну
1	0	1,80	1,75	0,01413	0,0490	19	21,33	0
2	4	1,23	0,64	0,00966	0,0179	400	5,28	1,78
3	6	0,97	0,54	0,00762	0,0151	620	5,03	1,37
4	8	1,11	0,72	0,00871	0,0202	750	6,76	1,43
5	12	1,18	0,80	0,00926	0,0224	490	16,87	0,54
6	17	1,28	1,21	0,01005	0,0339	345	19,35	0,41
7	20	1,30	1,21	0,01021	0,0339	250	21,12	0,16
8	30	1,30	1,25	0,01021	0,0350	130	20,84	0,08
9	87	1,44	1,30	0,01130	0,0364	50	20,65	0

У даному випадку відлік часу розпочато з моменту займання кабелю, не враховуючи час на запалювання, що дорівнював 4 хв.

Обробка експериментальних даних, отриманих в лабораторних умовах, показала, що під час виникнення навіть незначної пожежі, концентрація кисню спочатку різко знижується і досягає значення 5% всього через 8 – 10 хв з урахуванням тривалості розпалювання. Після цього у міру загасання пожежі концентрація кисню поступово відновлюється, що наочно представлено на рис. 2.26. За цих умов початковий режим вентиляції дорівнював $0,063 \text{ м}^3/\text{с}$, а в подальшому змінювався до $0,091 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для порівняння отриманих експериментальних даних із розрахунковими під час горіння кабельної продукції використовувалася видозмінена різницева схема (2.42) без урахування дифузійного переносу кисню ($D \approx 0$) і кондуктивного перенесення тепла ($a_1 \approx 0$) із інтенсивністю джерела тепловиділення під час пожеж на відміну від (2.45), прийнятого згідно з численними експериментальними даними рівним [96]:

$$\bar{q} = 37(\tau / \tau_m)^{3,6} \exp(-3,6\tau / \tau_m), \quad (2.74)$$

де τ_m – час виходу на максимум тепловиділення в осередку пожежі, хв.

Формула (2.74) виражає відносну інтенсивність вигорання твердого матеріалу на момент виникнення і розвитку пожежі за даними [97] при його регулюванні вентиляцією (ПРВ) або пожежним навантаженням (ПРН), тобто в усіх випадках.

Як зазначено, розрахунки виконувалися на випадок малої дифузії і кондуктивної теплопроводності (якою можна знехтувати), порівняно з конвективним переносом ($D = a_1 \approx 0$) по явній різницевій схемі (2.42).

На рис. 2.26 представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки в часі концентрації кисню в кабельному тунелі під час пожежі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння.

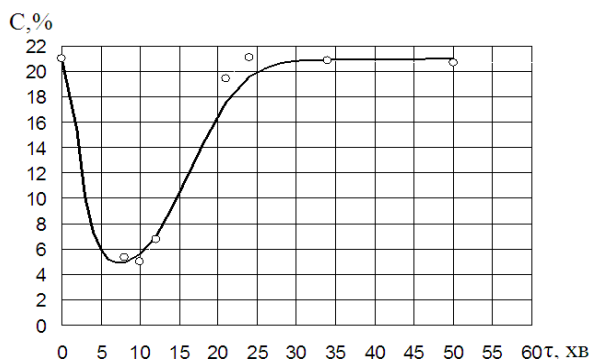
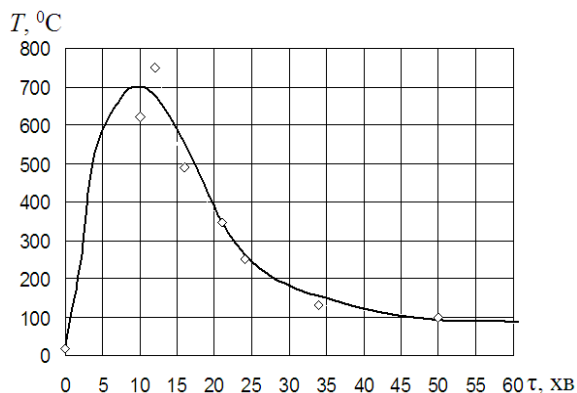


Рисунок 2.26. – Динаміка в часі концентрації кисню в кабельному тунелі під час пожежі із самозагасанням (маркери – дані експерименту, суцільна лінія – дані чисельного розрахунку на EOM)

Як видно, концентрація кисню в даному експерименті знизилась навіть до 5 %.

На рис. 2.27 представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки в часі температури в кабельному тунелі під час пожежі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння.



На **рисунку 2.27** – представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки в часі температури в кабельному тунелі при пожежі без впливу на нього будь-якого засобу пожежогасіння (маркери – дані експерименту, суцільна лінія – дані чисельного розрахунку на EOM)

Вхідні до формули (2.42) параметри при розрахунках прийняті рівними: $Cu = 0,5$; $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0$; $\bar{a}_2 = 0,0006$; $St_c = 16$; $A = 0,02$; $B = 6000$. Порівняння розрахункових і експериментальних даних (рис. 2.26 і рис. 2.27) доводить, що вони задовільно узгоджуються між собою. Стає очевидним нерозривність зв'язку температури і кисню, особливо при застосуванні рециркуляції пожежних газів.

Деяка невідповідність максимальної температури мінімальної концентрації кисню пояснюється процесами теплообміну пожежних газів з навколишнім масивом і алюмінієвими провідниками.

Таким чином, за допомогою математичного моделювання пожеж у кабельних тунелях можна не тільки вивчати процеси горіння, а й прогнозувати ефективність впливу на них різних засобів пожежогасіння.

Висновки

1. Встановлено під час розгляду процесів піролізу твердих горючих матеріалів, що виділення і надходження до потоку повітря газоподібних продуктів відбувається в широкому діапазоні температур від 450 К до 900 К. Це дозволило отримати аналітичну залежність швидкості горіння, що дорівнює швидкості надходження легких речовин до потоку повітря. Аналітична залежність враховує швидкість руху фронту полум'я, маючи максимум і мінімум в місці виникнення пожежі, що дає можливість розглядати перехід від режиму горіння до режиму тління твердих горючих матеріалів.

2. Розроблено математичну модель теплогазообмінних процесів в каналах значної протяжності, що включає в себе диференційні рівняння кінетики піролізу твердих горючих матеріалів, нестационарне перенесення кисню в потоці повітря при хімічних реакціях із газоподібними продуктами

піролізу, нестаціонарний теплообмін потоку повітря з навколишнім масивом при наявності джерела тепла, що виділяється при хімічних реакціях в залежності від концентрації кисню.

3. Розроблено чисельний метод розрахунку системи трьох диференціальних рівнянь тепломасообміну в каналі значної протяжності, представлених у кінцевих різницях протитоку повітря. Отримано табличні і графічні дані розподілу кисню і температури в потоці повітря як по довжині каналу при фіксованому часі, так і за часом при фіксованій відстані від місця виникнення пожежі. Розглянуто зосереджені і розподілені джерела піролізу, горіння і тепловиділення, з поступовим переміщенням осередку пожежі по довжині.

4. Отримано аналітичні залежності концентрації кисню і температури по довжині каналу в потоці повітря в квазістаціонарному режимі для будь-якого фіксованого часу з моменту виникнення пожежі. Результати математичного моделювання з використанням отриманих залежностей показали, що концентрація кисню при зосередженому джерелі піролізу і тепловиділення спочатку різко знижується, а потім виходить на певний рівень, що залежить від потужності джерела. Це викликає різке підвищення температури в потоці повітря до значень, що також залежать від потужності джерела піролізу і тепловиділення. Встановлено, що при розосередженому джерелі з його збільшенням по довжині концентрація кисню спочатку майже не змінюється поблизу місця виникнення пожежі, а потім починає різко зменшуватися. Це відбивається на температурі, яка повільно збільшується і лише біля переднього фронту полум'я різко зростає, що говорить про перехід горіння на режим тління у місці виникнення пожежі.

5. Встановлено адекватність розробленої математичної моделі натурним об'єктам при виникненні і розвитку пожежі

за даними експериментальних досліджень горіння твердих матеріалів (дерева) в натурних умовах, з масштабом моделювання 1:1 при довжині пожежного навантаження від 30 м до 165 м. Результати порівняння теоретичних і експериментальних даних показали, що вони задовільно узгоджуються один з одним і адекватно відображають фізику процесів, що відбуваються, вказуючи на нерозривний зв'язок температури з концентрацією кисню в потоці повітря.

6. Проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах виникнення і розвитку пожеж в кабельних тунелях з геометричним масштабом моделювання 1:4, що відповідає реальному об'єкту з наведеним діаметром 2 м і довжиною каналу до 10 м при числі Рейнольдса до 10000, що знаходиться в турбулентній області течії газів.

7. Встановлено при експериментальних дослідженнях в лабораторних умовах, що концентрація кисню в зоні горіння може знизитися до 5%, що підтверджується даними дослідження великомасштабних пожеж, а також даними математичного моделювання, вказуючи тим самим на нерозривний зв'язок процесів газообміну і теплообміну при пожежах.

РОЗДІЛ 3

ПЕРЕМІЩЕННЯ ВОГНЕГАСНИХ ПОРОШКІВ ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ В КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ ТА ВПЛИВ ЇХ ІНГІБУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ

3.1. Розробка математичної моделі переносу вогнегасних порошків до осередку пожежі

Як відомо, вогнегасні порошки, потрапляючи до осередку пожежі, переривають ланцюгову реакцію горіння на основі інгібування активних центрів полум'я. Крім того, дрібнодисперсний порошок при високій температурі розплавляється і спікається, утворюючи тверде склоподібне покриття типу плівки, що перешкоджає проникненню кисню до осередку горіння.

Як встановлено [115, 119], частки порошку, перебуваючи в потоці повітря в зваженому аерозольному стані, утворюють хмару з вмістом $70 - 150 \text{ г/м}^3$, при якому неможливе полуменеве горіння.

Засоби порошкового пожежогасіння є універсальними за своїм активним впливом на різні матеріали: навіть електрообладнання, що знаходиться під напругою, мінеральні масла, вугілля, дерево, шахтна конвеєрна стрічка тощо.

Як показує аналіз складу вогнегасного порошку [115], він складається, в основному, з трьох фракцій: великої ($100 - 200 \text{ мкм}$ до $15 - 20\%$), середньої ($10 - 50 \text{ мкм}$ – основна маса) і дрібної фракції (10 мкм і менш до $15 - 20\%$).

При струменевому закінченні з труби або сопла з великою швидкістю суміші порошку, як аерозолі, з повітрям, вона потрапляє в супутній потік повітря і поступово змішується з ним. Схема течії суміші порошку з повітрям в струмені і супутньому потоці зображена на рис. 3.1.

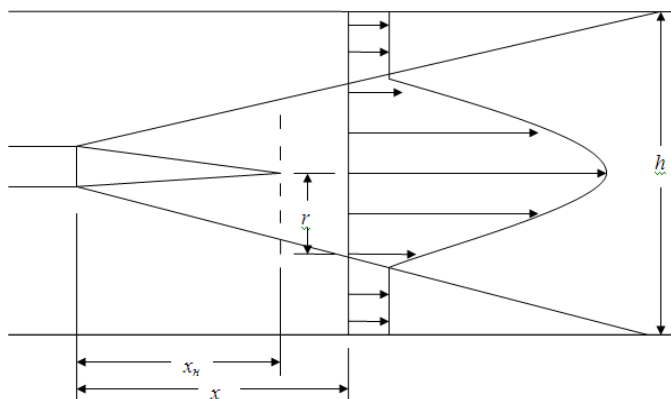


Рисунок 3.1. – Схема течії суміші порошку з повітрям в турбулентному струмені і супутньому потоці, обмеженому стінками каналу

Частина струменя, як показано на рис. 3.1, має ядро течії з постійною швидкістю від кінця труби до повного руйнування ядра (x_n) і називається початковою ділянкою. Розмивання струменя за межами початкової ділянки ($x > x_n$) призводить до її потовщення і зміни швидкості вздовж осі. Така ділянка струменя є основною.

Для опису профілів швидкості повітря і концентрації порошку в струменевому турбулентному потоці скористаємося даними, отриманими раніше і підтвердженими експериментально [100, 101]. Встановлено, що довжина початкової ділянки дорівнює приблизно десяти радіусам труби або сопла, отже, практичний інтерес представляє саме основна ділянка струменя. На основній ділянці профіль швидкості струменя можна описати залежністю виду:

$$u = u_1 + (u_m - u_0)[1 - (y/r)^{3/2}]^2, \quad (3.1)$$

де u_0 – швидкість супутнього вентиляційного потоку, м/с;

u_m – швидкість на осі струменя, м/с;
 y – відстань від точки зі швидкістю u до осі струменя
перпендикулярно потоку, м;
 r – радіус струменя в залежності від відстані до кінця
трубопроводу, м.

Встановлено [15], що для поперечних перерізів
основної ділянки струменя справедлива залежність
надлишкової температури від надлишкової швидкості:

$$\frac{T - T_1}{T_m - T_1} = \left(\frac{u - u_0}{u_m - u_0} \right)^{\text{Pr}}, \quad (3.2)$$

де T – температура на відстані r від струменя, К;
 T_1 – температура в супутньому потоці, К;
 T_m – температура на осі струменя, К;
 Pr – турбулентне число Прандтля (за даними
експериментів для осесиметричних струменів $\text{Pr} = 0,8$).

Крім того, встановлено [123], що розподіл домішок, в
даному випадку порошку, в струмені повітря, відповідає тій
же закономірності, що й розподіл температури:

$$\frac{Z - Z_1}{Z_m - Z_1} = \frac{T - T_1}{T_m - T_1}, \quad (3.3)$$

де Z – концентрація порошку на відстані r від струменя, кг/кг;
 Z_1 – концентрація порошку в супутньому потоці, кг/кг;
 Z_m – концентрація порошку на осі струменя, кг/кг.

Таким чином, для опису розподілу домішки в
турбулентному струмені прийемо:

$$\frac{Z - Z_1}{Z_m - Z_1} = \left(\frac{u - u_0}{u_m - u_0} \right)^{0,8}. \quad (3.4)$$

Радіус основної ділянки асиметричного струменя або її напівтовщина є лінійною функцією від відстані до початкової ділянки:

$$r = 2,73r_0 + \frac{u_1 - u_0}{u_1 + u_0} k(x - x_n), \quad (3.5)$$

де r_0 – радіус труби або сопла, м;

u_1 – швидкість витікання струменя з сопла, м / с;

k – емпірична константа (для основної ділянки $k = 0,22$);

x_n – довжина початкової ділянки, м;

x – відстань від кінця труби за ходом руху струменя, м.

Якщо швидкість на осі струменя на початковій ділянці постійна, то на основній ділянці вона змінюється обернено пропорційно радіусу струменя:

$$u_m = 2,73u_1 \frac{r_0}{r}. \quad (3.6)$$

Підставляючи до формули (3.6) вираз (3.5), отримаємо

$$u_m = \frac{2,73u_0}{2,73 + \frac{u_0 - u_1}{u_0 + u_1} k(x/r_0 - 10)}. \quad (3.10)$$

У цьому випадку відповідно до експериментальних даних прийнято $x_n = 10r_0$.

Між концентрацією домішок і швидкістю повітря на осі осесиметричного струменя існує залежність виду:

$$\frac{Z_m - Z_0}{Z_1 - Z_0} = \chi \frac{u_m - u_0}{u_1 - u_0}, \quad (3.11)$$

де емпірична константа χ визначається за формулою і для осесиметричного струменя виглядає таким чином:

$$\chi = 0,745 \frac{u_1 + 2,86u_0}{u_1 + 3,76u_0}. \quad (3.12)$$

Підставимо вира (3.12) у співвідношення (3.11) та отримаємо:

$$\frac{Z_m - Z_1}{Z_0 - Z_1} = 0,745 \frac{u_1 + 2,86u_0}{u_1 + 3,76u_0} \frac{u_m - u_0}{u_1 - u_0}. \quad (3.13)$$

Нехтуючи концентрацією порошку в супутньому потоці ($Z_1 = 0$), замість формули (3.13) будемо мати:

$$Z_m = 0,745Z_0 \frac{u_1 + 2,86u_0}{u_1 + 3,76u_0} \frac{u_m - u_0}{u_1 - u_0}. \quad (3.14)$$

Таким чином, загальна схема розрахунку така. Відстань до місця зіткнення струменя порошку зі стінками каналу, визначаємо за формулою (3.5) при відомих швидкості супутнього потоку і швидкості витікання струменя та її радіуса в цьому місці. Далі, за формулою (3.10) знаходимо при $k = 0,22$ і заданому радіусі труби або сопла швидкість повітря на осі струменя. Це дає можливість за формулою (3.14) визначити концентрацію порошку на осі струменя, якщо відома його початкова концентрація.

Згодом вогнегасний порошок, як аерозоль, повністю змішавшись з супутнім потоком повітря, переноситься у напрямку осередка пожежі і перебуває у завислому стані. При цьому завдяки турбулентному режиму руху повітря і хаотичній пульсації швидкості в усіх напрямках, відбувається перемішування різних фракцій між собою.

Через невеликі розміри фракцій (порівняно з масштабом пульсацій) частки залучаються до пульсаційного руху повітря і дифундують за всіма напрямками. Тому

вважається: якщо частинки пилу або порошку малі, то їхнє переміщення практично нічим не відрізняється від руху різних газів у повітрі. Тоді й для частинок є справедливим закон турбулентної дифузії, який для сталого процесу переносу в трьох вимірах описується рівнянням виду [98]:

$$\frac{\partial(uZ)}{\partial x} + \frac{\partial(vZ)}{\partial y} + \frac{\partial(wZ)}{\partial z} = D_t \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} \right), \quad (3.15)$$

де Z – концентрація порошку в потоці повітря, кг/м³;

u, v, w – поздовжня, вертикальна і поперечна складові швидкості повітря, м / с;

D_t – коефіцієнт турбулентної (вихрової) дифузії частинок порошку, м²/с;

x, y, z – поздовжня, вертикальна і поперечна координати, м.

Оскільки нас цікавить розподіл концентрації порошку по довжині і висоті каналу, розглянемо його середню величину концентрації по поперечному перерізі:

$$\tilde{Z}(x, z) = \frac{1}{b} \int_0^b Z dz, \quad (3.16)$$

де b – ширина каналу, м.

Інтегруючи рівняння (3.15) по поперечній координаті, одержимо:

$$u \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x} + v \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial y} + \frac{1}{b} (vZ) \Big|_0^b = D_t \left(\frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial y^2} + \frac{1}{b} \frac{\partial Z}{\partial z} \Big|_0^b \right). \quad (3.17)$$

При інтегруванні передбачалося, що поздовжня і вертикальна складові швидкості повітря не залежать від координати z .

Оскільки бічні стінки каналу непроникні для повітря, третій доданок в лівій частині рівняння можна прийняти рівним нулю:

$$\frac{1}{b}(\nu Z)\Big|_0^b = 0. \quad (3.18)$$

Третій доданок правої частини рівняння (3.17) являє собою градієнт концентрації порошку на бічних стінках каналу й може, як і в теорії теплопередачі [94, 95], прийматися пропорційним самій концентрації:

$$\frac{D_t}{b} \frac{\partial Z}{\partial z} \Big|_0^b = -\gamma \tilde{Z}, \quad (3.19)$$

де γ – константа швидкості осідання частинок порошку на бічних стінках каналу, 1/с.

Із урахуванням (3.18) і (3.19) рівняння (3.17) набуде вигляду:

$$u \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x} + \nu \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial y} = D_t \left(\frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial y^2} \right) - \gamma \tilde{Z}. \quad (3.20)$$

Припустимо, що складові швидкості руху часток порошку є константами. В цьому випадку рівняння (3.20) набуває вигляду

$$u_0 \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x} + \nu_0 \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial y} = D_t \left(\frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial y^2} \right) - \gamma \tilde{Z}. \quad (3.21)$$

Оцінімо величини малості інших похідних правої частини рівняння (3.21).

Аналіз розмірності величин показує: оскільки висота каналу є набагато меншою за його довжину $h \ll L$, то перший доданок правої частини рівняння (3.21) є значно меншим другого і його можна не враховувати, тому, що конвективний перенос переважає над дифузійним.

Таким чином, замість рівняння (3.21) отримаємо:

$$u_0 \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x} + v_0 \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial y} = D_t \frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial y^2} - \gamma \tilde{Z}. \quad (3.22)$$

Прийmemo, що в кінці основної ділянки зони перемішування потоків аерозолу і повітря його частинки рівномірно розподілені по всій висоті виробки. Отже граничну умову для рівняння (3.22) можна представити у вигляді:

$$\tilde{Z}(0, \phi) = \begin{cases} \tilde{N}_0, & 0 < \phi < h; \\ 0, & \phi > h. \end{cases} \quad (3.23)$$

Будемо шукати аналітичний розв'язок задачі. Для цього прийmemo:

$$\tilde{Z}(x, y) = e^{ax+by} Z(x, y), \quad (3.24)$$

де a, b – константи, які визначимо таким чином. Обчислимо похідні:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x} &= (aZ + \frac{\partial Z}{\partial x})e^{ax+by}; \quad \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial y} = (bZ + \frac{\partial Z}{\partial y})e^{ax+by}; \\ \frac{\partial^2 \tilde{Z}}{\partial y^2} &= [b^2 Z + 2b \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}]e^{ax+by}. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Підставимо обчислені похідні до рівняння (3.22) і отримаємо:

$$\nu_0(bZ + \frac{\partial Z}{\partial y}) + u_0(aZ + \frac{\partial Z}{\partial x}) = D_t(b^2Z + 2b\frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}) - \gamma Z. \quad (3.26)$$

Для зменшення кількості доданків у рівнянні (3.26) позбудемося функції Z та її похідної по y , для чого прийmemo:

$$\begin{aligned} \nu_0 b + u_0 a &= D_t b^2 - \gamma; \\ \nu_0 &= D_t 2b, \end{aligned} \quad (3.27)$$

звідки знайдемо шукані константи:

$$b = \nu_0 / 2D_t; \quad a = -\nu_0^2 / 4u_0 D_t - \gamma / u_0. \quad (3.28)$$

У результаті рівняння (3.22) набуде простого вигляду:

$$u \frac{\partial Z}{\partial x} = D_t \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}. \quad (3.29)$$

Гранична умова для рівняння (3.29), згідно з (3.23) і (3.24), набуде вигляду:

$$Z(\delta, 0) = \begin{cases} Z_0 e^{-b\delta}, & 0 < \delta < h; \\ 0, & 0 > \delta > h. \end{cases} \quad (3.30)$$

Рівняння (3.29) відноситься до типу параболічних рівнянь з початковою умовою (3.30), де параметр часу $\tau = x/u_0$, тому можна замість рівняння (3.29) записати:

$$\frac{\partial Z}{\partial \tau} = \psi^2 \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}. \quad (3.31)$$

Загальне розв'язання (3.31) на необмеженій прямій набуде вигляду [179]:

$$Z(x, y) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z(\eta, 0)}{\sqrt{D_t \tau}} \exp\left(-\frac{(y - \eta)^2}{4D_t \tau}\right) d\eta. \quad (3.32)$$

Під необмеженою прямою розуміється вся вісь y . Оскільки початковий розподіл (3.30) задано тільки по висоті виробки, а не за її межами, то рішення розв'язок рівняння (3.31) представимо таким чином:

$$Z(y, z) = \frac{Z_0}{2\sqrt{\pi}} \int_0^h \frac{1}{\sqrt{D_t \tau}} \exp\left(-\frac{(y - \eta)^2}{4D_t \tau} - b\eta\right) d\eta. \quad (3.33)$$

Перетворимо показник ступеня у експоненти, що входить під знак інтеграла в розв'язку (3.33), до наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{(y - \eta)^2}{4D_t \tau} + b\eta &= \frac{[\eta - (y - 2D_t \tau b)]^2 + y^2 - (y - 2D_t \tau b)^2}{4D_t \tau} = \\ &= \frac{[\eta - (y - 2D_t \tau b)]^2}{4D_t \tau} + by - D_t \tau b^2. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Підставимо перетворений показник ступеня у експоненти в розв'язок (3.32) і отримаємо:

$$Z(x, y) = \frac{Z_0}{2\sqrt{\pi}} \exp(D_t \tau b - by) \int_0^h \frac{1}{\sqrt{D_t \tau}} \exp\left(-\frac{[\eta - (y - 2D_t \tau b)]^2}{4D_t \tau}\right) d\eta. \quad (3.35)$$

Розглянемо нову змінну:

$$\xi = \frac{\eta - (y - 2D_t \tau b)}{2\sqrt{D_t \tau}}. \quad (3.36)$$

Після введення нової змінної в розв'язок (3.35) воно набуде вигляду:

$$Z(y, z) = \frac{Z_0}{\sqrt{\pi}} \exp(D_t \tau^2 - by) \int_{\xi_1}^{\xi_2} \exp(-\xi^2) d\xi, \quad (3.37)$$

де нижня і верхня межі інтегрування визначаються за формулою (3.36) при $\eta = 0$ і при $\eta = h$ відповідно:

$$\xi_1 = \frac{2\psi_2 \tau a - y}{2\sqrt{\psi_2 \tau}}; \quad \xi_2 = \frac{h + 2\psi_2 \tau a - y}{2\sqrt{\psi_2 \tau}}; \quad (3.38)$$

Інтеграл у розв'язку (3.37) може бути виражений через інтеграли ймовірності [179]:

$$Z(y, z) = \frac{C_0}{2} \exp(\psi_2 \tau a^2 - ay) [\operatorname{erf}(\xi_2) - \operatorname{erf}(\xi_1)]. \quad (3.39)$$

Тут символ erf означає інтеграл ймовірності.

Підставимо знайдений розв'язок (3.39) до виразу (3.34) для шуканої функції й отримаємо:

$$\tilde{Z}(x, y) = \frac{Z_0}{2} \exp(ax + D_t \tau^2) [\operatorname{erf}(\xi_2) - \operatorname{erf}(\xi_1)]. \quad (3.40)$$

Повертаючись до первинних вихідних параметрів, отримаємо, згідно з (3.38) і (3.40), розв'язання поставленої задачі в остаточному вигляді:

$$\tilde{Z}(x, y) = \frac{Z_0}{2} \exp[-\gamma x / u_0] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{h + \nu_0 x / u_0 - y}{2\sqrt{D_t x / u_0}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\nu_0 x / u_0 - y}{2\sqrt{D_t x / u_0}} \right) \right]. \quad (3.41)$$

Отриманий розв'язок (3.41) дозволяє здійснювати прогноз щодо концентрації порошку на різних відстанях від місця його подачі з урахуванням перерозподілу по висоті під дією сили тяжіння, нехтуючи при цьому ділянкою струменевого закінчення порошку із сопла.

3.2. Моделювання процесу переносу вогнегасного порошку в потоці повітря

Для зручності моделювання переносу порошку вздовж каналу введемо безрозмірні параметри:

$\bar{Z} = \tilde{Z} / Z_0$ – відносна концентрація порошку в потоці повітря;

$\bar{y} = y/h$ – відносна вертикальна координата від покрівлі до ґрунту каналу;

$\bar{x} = x/h$ – відносна відстань від місця струменевого перемішування порошку зі супутнім потоком повітря (рис. 3.1);

$Pe = u_0 h / D_t$ – число Пекле турбулентного перемішування;

$V = v_0 / u_0$ – відносна швидкість осідання порошку під дією сил тяжіння;

$G = \gamma h / u_0$ – критерій втрат порошку через зіткнення зі стінками виробки.

Використовуючи перераховані безрозмірні змінні, перетворимо формулу (3.41) до вигляду:

$$\bar{Z}(\bar{x}, \bar{y}) = 0,5 \exp(-G\bar{x}) \left[\operatorname{erf} \left(\frac{1 + V\bar{x} - \bar{y}}{2\sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{V\bar{x} - \bar{y}}{2\sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) \right]. \quad (3.42)$$

Формула (3.42) є зручною для розрахунків, оскільки дозволяє узагальнювати отримані при моделюванні результати і в діапазоні значень незалежних змінних

$1 \leq \bar{y} \leq 1$ и $0 < \bar{x} < \infty$, отримувати значення функції у вузькій границі $0 < \bar{Z} \leq 1$, використовуючи при цьому всього три критерії подібності: Pe , G і V .

Якщо враховувати ще й фракційний склад пилу, то підсумовуючи потоки різних фракцій, отримаємо формулу (3.42) у вигляді:

$$\bar{Z}(\bar{x}, \bar{y}) = 0,5 \exp(-G\bar{x}) \sum_{i=1}^m \delta_i \left[\operatorname{erf} \left(\frac{1 + \bar{V}_i \bar{x} - \bar{y}}{2\sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{\bar{V}_i \bar{x} - \bar{y}}{2\sqrt{\bar{x}/Pe}} \right) \right], \quad (3.43)$$

де m – кількість фракцій;

i – номер фракції;

δ_i – частка i -тої фракції, сума яких повинна дорівнювати одиниці.

Очевидно, чим важча фракція, тим швидше відбувається осідання частинок. Як зазначалося раніше, можна розглядати тільки три фракції і при цьому брати $m = 3$.

Для розрахунку інтеграла ймовірності з великою точністю пропонується формула:

$$\operatorname{erf}(\xi) = 1 - [(\lambda(348 + \lambda(-96 + 748\lambda)))e^{-\xi^2}] / 1000, \quad (3.44)$$

де $\lambda = 1/(1 + 0,04705|\xi|)$ – параметр, що входить до формули (3.44).

При розрахунках, якщо змінна ξ від'ємна, необхідно приймати $\operatorname{erf}(-\xi) = -\operatorname{erf}(\xi)$.

На 3.2 представлені результати моделювання розподілу концентрації порошку по його висоті від покрівлі до ґрунту

каналу при наступних подібних критеріях, прийнятих рівними: $Pe = 100$; $G = 0,01$; $V = 0,02$.

Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що поблизу місця подачі порошку крива його розподілу по висоті каналу – опукла і майже симетрична відносно центра, як при струменевому закінченні. Проте, якщо взяти висоту каналу $h = 2$ м, то на відстані 20 м від місця подачі порошку буде дуже помітним зміщення кривої до ґрунту каналу з максимумом 0,67 від початкових витрат, а на відстані 60 м залишиться всього 35% порошку.

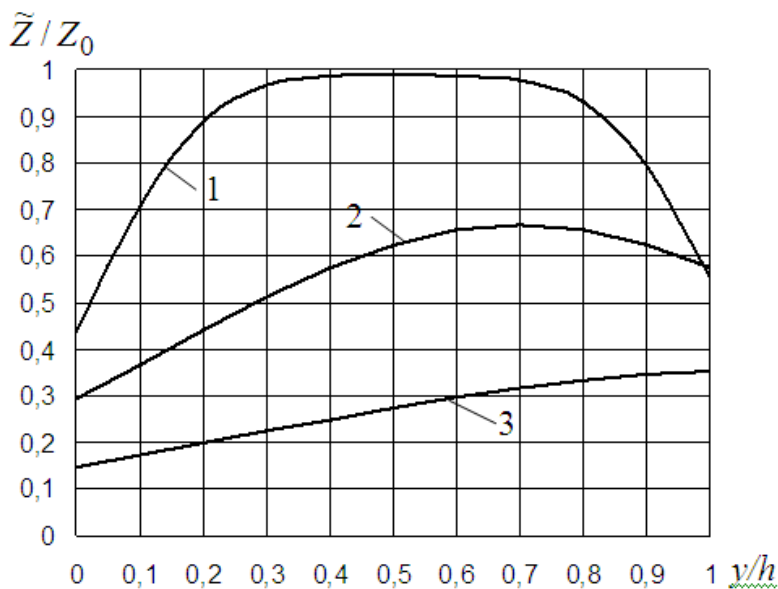


Рисунок 3.2. – Розподіл концентрації порошку по висоті каналу на різних відстанях від місця його подачі (1 – $x/h = 1$, 2 – $x/h = 10$, 3 – $x/h = 30$)

Якщо збільшувати швидкість його осідання за умови значної маси фракції, то на цій відстані або ще ближче весь порошок перебуватиме у ґрунті каналу і, навпаки, якщо

зменшувати швидкість осідання при дрібних фракціях, то порошок може поширюватися на 100 м і більше.

На рис. 3.3 представлені результати моделювання розподілу концентрації порошку по довжині каналу у покрівлі, посередині і у ґрунті.

Штриховою лінією позначена середня по висоті каналу концентрація порошку. Як показують результати моделювання, спочатку в центрі каналу концентрація навіть більша, ніж у ґрунті за рахунок струменевого закінчення. Проте згодом потім у ґрунті вона збільшується, особливо при великих фракціях і відповідно, при збільшенні швидкості осідання порошку.

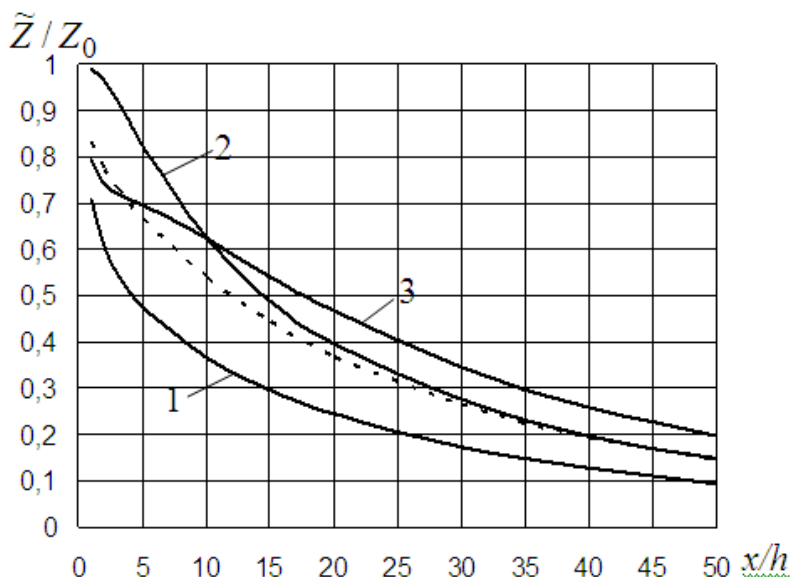


Рисунок 3.3. – Розподіл концентрації порошку вздовж каналу під його дахом (1), всередині (2) і у ґрунті (3)

Отримані кількісні результати не суперечать загальним уявленням про поведінку аерозолів у полі сили тяжіння,

проте існує потреба у встановленні адекватності розробленої моделі перенесення аерозолів натурному об'єкту.

3.3. Співставлення, порівняння результатів математичного моделювання переносу порошку в поле сили тяжіння з даними експериментальних досліджень

Як показали результати моделювання переносу порошку в горизонтальному каналі значної протяжності, основними його параметрами є:

- число Пекле $Pe = u_0 h / D_\psi$ турбулентного перемішування частинок із потоком повітря;
- відносна швидкість $V = v_0 / u_0$ осідання порошку під дією сил тяжіння;
- критерій втрат порошку $G = \gamma h / u_0$ через зіткнення з бічними стінками виробки.

Вхідний до числа Пекле коефіцієнт поперечного переносу частинок порошку дрібних фракцій нічим не відрізняється, як доведено [98, 109], від турбулентного переносу молей будь-якого газу в потоці повітря:

$$D_\psi = D_t, \quad (3.45)$$

де D_t – коефіцієнт турбулентного переносу будь-якого газу в потоці повітря, $\text{м}^2/\text{с}$.

Однак якщо частинки порошку не дуже малі і через це частково або зовсім не захоплюються молями газу в загальний потік, то законність використання тотожності (3.45), як зазначається, викликає сумніви. Як виявилось, експерименти підтверджують тотожність для дуже дрібних часток (менше 1 мкм) [110]. Так для грубодисперсних аерозольних частинок відношення D_ψ / D_t , як виявилось за даними дослідів [111] є набагато меншим одиниці і дорівнює $D_\psi / D_m = 0,038$ для фракції скляних кульок 100 мкм і

$D_u/D_t = 0,068$ для фракції 200 мкм при швидкості потоку повітря менше 10 м/с. Збільшення відношення коефіцієнтів турбулентної дифузії при збільшенні часток фракції можна пояснити впливом сили тяжіння.

Незважаючи на ці відхилення, тим більше для скляних кульок, багато дослідників, посилаючись на роботи [112,113], використовують при розрахунках саме тотожність (3.45).

У роботах [110] наведені табличні дані залежності коефіцієнта поперечної турбулентної дифузії газів у потоці повітря від числа Рейнольдса в горизонтальних круглих трубах і каналах квадратного перерізу. Обробка експериментальних даних показала (рис. 3.4), що ці параметри з досить високою точністю підпорядковуються лінійній залежності з величиною достовірності апроксимації $R^2 = 0,99$.

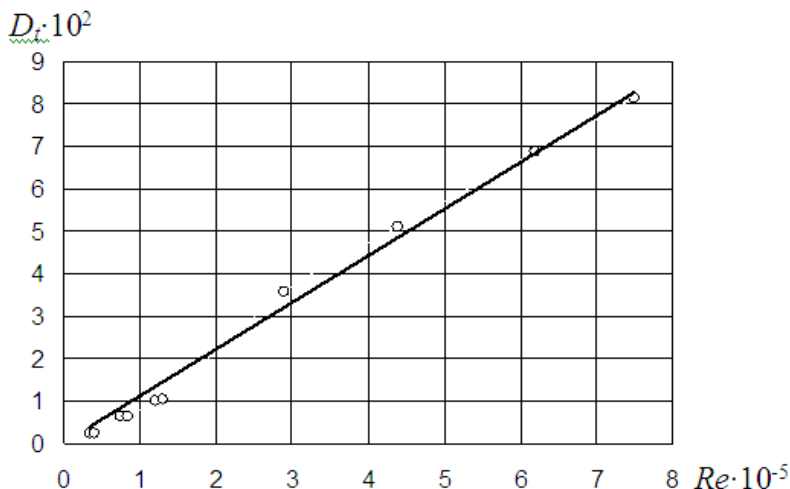


Рисунок 3.4. – Залежність коефіцієнта поперечної турбулентної дифузії газів у потоці повітря від числа Рейнольдса в горизонтальних круглих трубах і каналах квадратного перерізу

Тут у вигляді прямої наведена лінія тренду, яка має вигляд:

$$D = D_0 + 1,1 \cdot 10^{-7} Re, \quad (3.46)$$

де D_0 – коефіцієнт молекулярної дифузії газів (приймається рівним $2 \cdot 10^{-5}$ м²/с для метану або кисню в повітрі, а при великих числах Рейнольдса може рівнятися нулю).

Тут число Рейнольдса:

$$Re = \frac{uh}{\nu}, \quad (3.47)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря (приймається рівним $1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с).

У цьому випадку число Пекле для частинок порошку можна, згідно (3.46) і (3.47), знайденим за формулою:

$$Pe = \frac{uh}{D_0 + 7,3 \cdot 10^{-3} uh}. \quad (3.48)$$

Для пошуку відносної швидкості $V = v_0/u_0$ осідання частинок порошку під дією сил тяжіння використовуємо рівняння руху кожної окремо взятої частинки у вертикальній площині [97] у вигляді:

$$\frac{\pi}{6} d_q^3 \rho_q \frac{dv}{d\tau} = \zeta \frac{1}{2} \rho v |v| \frac{\pi d_q^2}{4} - \frac{\pi}{6} d_q^3 \rho_q g, \quad (3.49)$$

де d_q – діаметр частинки, м;

ρ – густина повітря, кг/м³;

ρ_q – густина частинки, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ζ – коефіцієнт аеродинамічного опору частинки порошку під час руху.

Ділячи ліву і праву частини рівняння (3.49) на обсяг частки, отримуємо:

$$\frac{dv}{d\tau} = \zeta \frac{3\rho}{4\rho_q d_q} v|v| - g. \quad (3.50)$$

Запропоновано різні залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса, з яких найбільш вдалою вважається формула:

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}_q} + \frac{4}{\text{Re}_q^{1/3}}. \quad (3.51)$$

У даному випадку число Рейнольдса включає в себе замість висоти каналу діаметр частки. Аналіз величини чисел Рейнольдса показує: у разі якщо взяти найбільшу фракцію порошку $d_q = 200$ мкм і прийняти швидкість осідання $v_0 = 1$ м/с, то максимальне число Рейнольдса дорівнюватиме:

$$\text{Re}_q = \frac{v_0 d_q}{\nu} = \frac{1 \cdot 200 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-5}} \approx 13.$$

У цьому випадку замість залежності (3.51) можна використовувати більш просту формулу:

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}_q} + 1,8. \quad (3.52)$$

На рис. 3.5 представлені результати розрахунку за формулами (3.51) і (3.52) зміни коефіцієнта опору падіння частинок порошку при числах $\text{Re}_q < 20$.

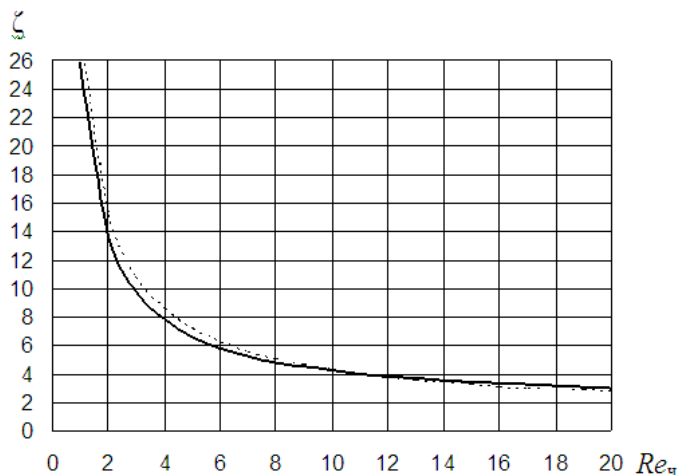


Рисунок 3.5. – Криві зміни коефіцієнта опору в залежності від числа Рейнольдса (переривчаста лінія за формулою (3.51) і суцільна лінія за формулою (3.52))

Порівнюючи дані розрахунку, встановлено, що максимальна помилка не перевищує 10%. Це дозволяє використовувати більш просту формулу (3.52). Отримана крива збігається також із даними багатьох дослідників щодо осідання шарів під дією сили тяжіння.

Будемо розглядати стаціонарний режим осідання частинок порошку. Тоді праву частину рівняння (3.50) можна прирівняти до нуля, в результаті чого отримаємо:

$$\zeta \frac{3\rho}{4\rho_{\chi}d_{\chi}} \nu_0 |\nu_0| = g. \quad (3.53)$$

Підставляючи формулу (3.52) в рівність (3.53), матимемо:

$$\left(\frac{24\nu}{\nu_0 d_{\chi}} + 1,8\right) \frac{3\rho}{4\rho_{\chi}d_{\chi}} \nu_0 |\nu_0| = g. \quad (3.54)$$

Перетворимо рівняння (3.54) до виду:

$$\frac{1,35}{d_q} \nu_0^2 + \frac{18\nu}{d_q^2} \nu_0 = \rho_q g / \rho. \quad (3.55)$$

Розв'язуючи рівняння (3.55) щодо шуканої швидкості осідання частинок, отримуємо:

$$\nu_0 = -\frac{\nu}{0,15d_q} + \sqrt{\nu^2 / (0,15d_q)^2 + \rho_q g d_q / (1,35\rho)}. \quad (3.56)$$

Якщо прийняти коефіцієнт кінематичної в'язкості рівним $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$, а густину порошку $\rho_q = 1800 \text{ кг/м}^3$, то формула (3.56) набуде простого для практичних розрахунків вигляду:

$$\nu_0 = -\frac{100}{d_q} + \sqrt{10^4 / d_q^2 + 1,31d_q / 100}. \quad (3.57)$$

У таблиці 3.1 представлені дані розрахунку за формулою (3.57) щодо швидкості осідання частинок порошку при різних його фракціях.

Таблиця 3.1

Швидкість осідання частинок порошку при різних його фракціях

d_q , мкм	10	20	30	40	50	100	150	200
ν_0 , м/с	0,0065	0,026	0,058	0,103	0,158	0,520	0,886	1,194

Таким чином, лише при фракціях порошку понад 150 мкм швидкість його осідання перевищить 1 м/с.

Критерій втрат порошку $G = \gamma h / u_0$ через зіткнення з бічними стінками виробки визначимо, використовуючи експериментальні дані.

Під час проведення експериментів в полігонних умовах використовувався вогнегасний порошок П-2АП [116]. Лабораторний аналіз цього порошку в серії з п'яти експериментів дозволив визначити його фракційний склад. Дані про це наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Фракційний склад порошку П-2АП

d_i , мкм	10	20	30	40	50	100	200
δ_i , %	19	25	13	3	21	15	4

Середньозважений діаметр частинок порошку визначався за формулою:

$$d_q = \frac{100}{\sum_{i=1}^n \delta_i / d_i}, \quad (3.58)$$

де i – номер фракції;

n – кількість фракцій;

δ_i – процентний вміст фракції, %;

d_i – діаметр i -тої фракції.

Відповідно до даних таблиці 3.2 за формулою (3.58) знайдений середньозважений діаметр фракцій порошку $d_q = 23,5$ мкм. За цієї умови швидкість їх осідання згідно з (3.57) дорівнює $v_0 = 0,036$ м/с.

Експерименти за натурних умов здійснювалися в горизонтальному довгому каналі площею поперечного перерізу 4 м^2 при швидкості руху повітря $2,5$ м/с. Подача порошку П-2АП здійснювалася установкою "Вихор" [114, 117, 120] з регульованою продуктивністю, що дозволяло створювати початкову концентрацію порошку в потоці повітря $Z_0 = 0,1 - 0,4 \text{ кг/м}^3$, що при витраті повітря $Q = 10 \text{ м}^3/\text{с}$ відповідало продуктивності установки $G = 1 - 4 \text{ кг/с}$.

Вимірювання концентрації порошку здійснювалося спеціальними пробовідбірниками [115] в середній частині каналу по висоті і через кожні 25 м по його довжині до 100 м.

Для спрощення розрахунків прийнята середня по поперечному перетину концентрація порошку, яка може бути визначена із (3.41) за формулою:

$$Z = Z_0 \exp(-\gamma x / u). \quad (3.59)$$

На рис. 3.6 представлені експериментальні та розрахункові дані розподілу відносної середньої по перерізу концентрації порошку по довжині каналу при початковій його концентрації $Z_0 = 0,36 - 0,4 \text{ кг/м}^3$.

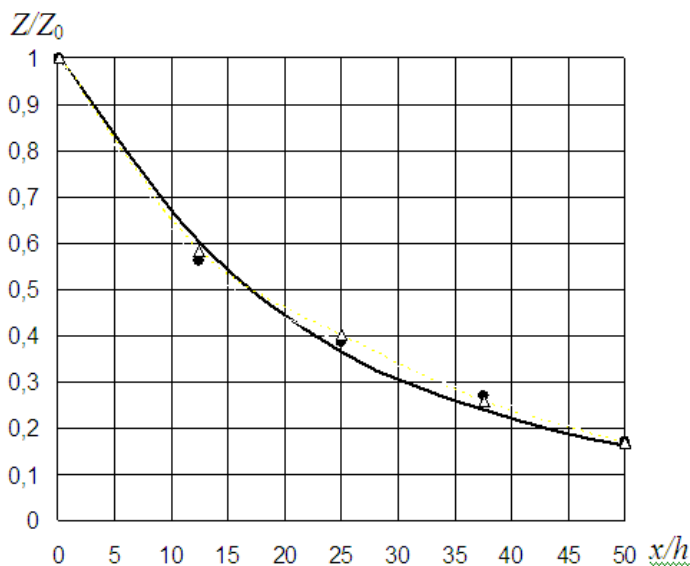


Рисунок 3.6. – Результати порівняння експериментальних (маркери) і розрахункових даних (крива) розподілу відносної концентрації порошку по довжині штольні при початковій його концентрації $Z_0 = 0,36 - 0,4 \text{ кг/м}^3$

Як показали результати порівняння розрахункових та експериментальних даних щодо розподілення вздовж каналу частинок порошку при початковій концентрації $Z_0 = 0,36 - 0,4 \text{ кг/м}^3$, в цьому діапазоні крива задовільно відповідає крайнім межам.

На рис. 3.7 представлені експериментальні та розрахункові дані розподілення відносної концентрації порошку по довжині каналу при початковій, дещо меншій, його концентрації $Z_0 = 0,22 - 0,26 \text{ кг/м}^3$ і $0,1 \text{ кг/м}^3$.

Вказаний діапазон зміни початкової концентрації порошку мало позначається на поведінці кривої. Однак при малій початковій концентрації $Z_0 = 0,12 \text{ кг/м}^3$ спостерігається помітний зсув кривої вгору (штрихова лінія).

Таким чином, криві не універсальні і критерій втрат порошку $G = \gamma h / u_0$ явно залежить від початкової концентрації.

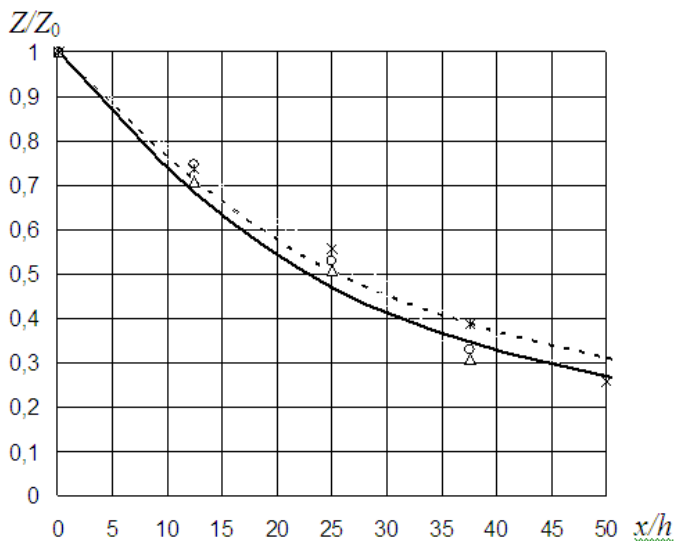


Рисунок 3.7. – Результати порівняння експериментальних (маркери) і розрахункових даних розподілення відносної концентрації порошку по довжині каналу при початковій його концентрації $Z_0 = 0,22 - 0,26 \text{ кг/м}^3$ (суцільна крива) і при $Z_0 = 0,12 \text{ кг/м}^3$ (штрихова лінія)

Обробка експериментальних даних показала (рис. 3.8), що критерій швидкості осідання частинок порошку істотно залежить від початкової його концентрації.

Наведена на рис. 3.8 лінія тренда степеневої залежності показує, що з достатнім ступенем точності критерій швидкості осідання частинок порошку на стінках каналу може бути знайдений за формулою:

$$G = 0,17Z_0^2. \quad (3.60)$$

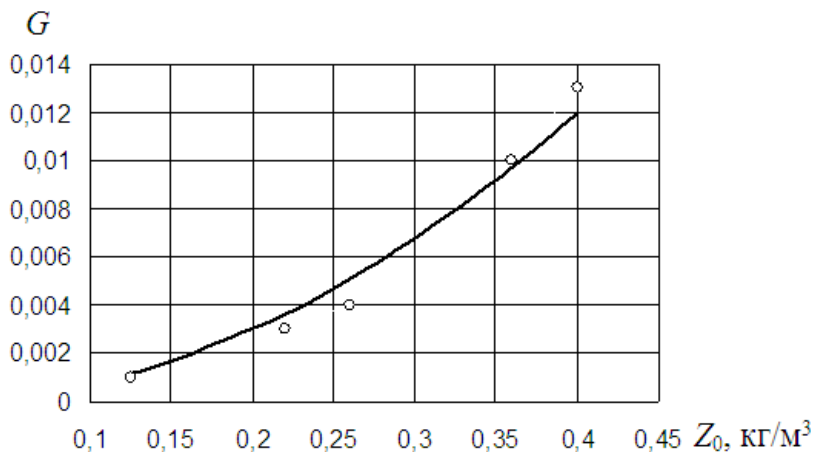


Рисунок 3.8. – Залежність показника швидкості осідання частинок порошку на стінках каналу від його початкової концентрації

Отримані результати доводять: чим більша концентрація вогнегасного порошку, тим інтенсивніше він осідає на стінках каналу. Цей факт також зазначається в роботах [117, 118, 121], однак, при цьому вважається, що осідання на стінках каналу пов'язане ще й із силами гравітації. Тут слід розрізняти два явища: осідання на ґрунт каналу, якраз пов'язане з силами гравітації, і осідання на всі стінки, що пов'язане з турбулентними пульсаціями швидкості повітря. Ці два явища нічого спільного між собою не мають, але інколи виникає плутанина щодо їх визначення [121].

Встановлені зв'язки критеріїв подібності з вихідними параметрами дозволяють робити достовірний прогноз щодо кількості порошку, що надходить до осередку пожежі і розподіляється уздовж каналу. Однак це ніяким чином не свідчить про характер впливу порошку на осередок і тривалість його гасіння.

3.4. Моделювання характеру впливу вогнегасного порошку на осередок великомасштабної пожежі

Зазвичай вважається, що флегматизуючий вплив на осередок пожежі полягає в розриві ланцюгів хімічних реакцій продуктів горіння з киснем і утворенні плівки на горючих матеріалах, що перешкоджає проникненню кисню вглиб твердої речовини.

Для моделювання використовуємо таку ж квазістаціонарну модель теплогазопереносу і систему рівнянь (2.58) і (2.59), котрі наведені у другому розділі.

Будемо вважати, що на процеси горіння флегматизуючим чином впливає концентрація вогнегасного порошку, розподілена довжиною каналу по експоненційній залежності в осередку пожежі (3.59). Порошок зменшує як інтенсивність, так і площу горіння. Це дозволяє функцію інтенсивності горіння, згідно (2.58) і (3.59), подати у вигляді:

$$q = \frac{\chi \nu_0 H_c}{1 + a Z_0 \exp(-\gamma x / u)} \frac{b}{S} \frac{C}{C_0} \exp(-k \tau_i), \quad (3.61)$$

де a – емпірична константа, м³/кг.

Тоді, як і раніше, підставляючи формулу (3.61) до системи рівнянь (2.59), отримаємо в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{C}}{\partial \bar{x}} &= -\frac{AB}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma \bar{x} / u)} e^{-K \bar{\tau}_i \bar{C}}; \\ \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= -St \bar{T} + \frac{B}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma \bar{x} / u)} e^{-K \bar{\tau}_i \bar{C}}.\end{aligned}\quad (3.62)$$

Завдання, що стоять в першому рівнянні системи (3.62) в чисельнику параметри представляють собою константи по відношенню до змінної $\bar{x}$. В цьому випадку, розділяючи змінні, рішення першого рівняння системи (3.62) представимо у вигляді:

$$\bar{C} = \left[\frac{aZ_0 + 1}{aZ_0 + \exp(\gamma \bar{x} / u)} \right]^b. \quad (3.63)$$

Параметр b для скорочення запису прийнято рівним:

$$b = \frac{AB}{\gamma / u} \exp(-K \bar{\tau}_i).$$

Очевидно, за відсутності порошку ($Z_0=0$), формула (3.63) перетворюється на формулу (2.60).

На рис. 3.9 представлені результати моделювання розподілу концентрації кисню у разі впливу вогнегасного порошку на осередок пожежі.

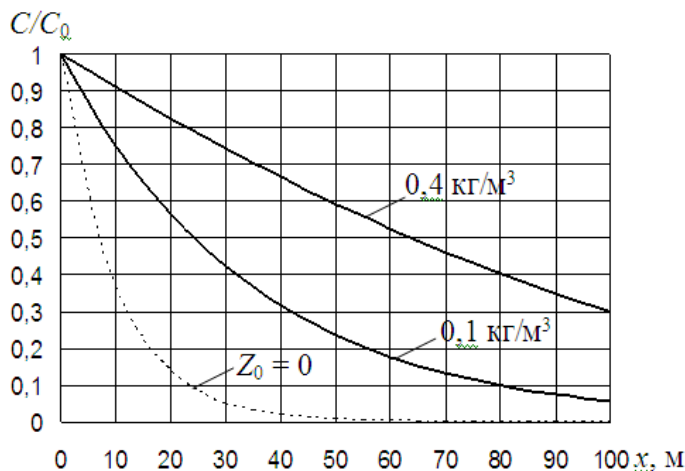


Рисунок 3.9. – Розподіл концентрації кисню при
впливі вогнегасного порошку на осередок пожежі

Моделювання проводилося за такими параметрами:
 $\bar{\tau}_i = 0$; $AB = 0,1$ л/с; $a = 25$ м³/кг. Відношення параметрів γ/h
визначалося з використанням формули (3.60) при висоті
каналу $h = 2$ м.

Результати моделювання показують, що до гасіння
пожежі концентрація кисню різко знижується майже до нуля
через 40 – 50 м. При подачі порошку зниження концентрації
кисню тим менше, чим більше його витрата.

Оскільки функція концентрації кисню відома (3.62), то
друге рівняння системи (3.62) являє собою лінійне
неоднорідне диференціальне рівняння першого порядку, рішення
якого аналогічно (2.56) можна представити у вигляді:

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) = e^{-St\bar{x}} \int_0^{\bar{x}} \frac{B \exp(-K\bar{\tau}_i St\xi)}{1 + aZ_0 \exp(-\gamma\xi/u)} \bar{C}(\xi, \bar{\tau}) d\xi, \quad (3.64)$$

де ξ – змінна інтегрування.

Очевидно, при $\bar{X} = 0$ розв'язок повертається в нуль, що відповідає другій граничній умові (2.50). Виносячи за знак інтеграла константи по відношенню до змінної ξ , замість (3.64), отримаємо

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{\tau}) = Be^{-(K\bar{w}\bar{\tau}_i + St\bar{x})} \int_0^{\bar{x}} \frac{e^{St\xi}}{1 + aZ_0 e^{-\gamma\xi/u}} \bar{C}(\xi, \bar{\tau}_i) d\xi. \quad (3.65)$$

Інтеграл, який увійшов до формули (3.65) обчислювався методом трапецій.

На рис. 3.10 представлені результати моделювання впливу на осередок пожежі вогнегасним порошком за таких вихідних даних: $K = 0$; $St = 1$; $AB = 2$; $B = 12$; $aZ_0 = 100$; $\gamma/u = 5$.

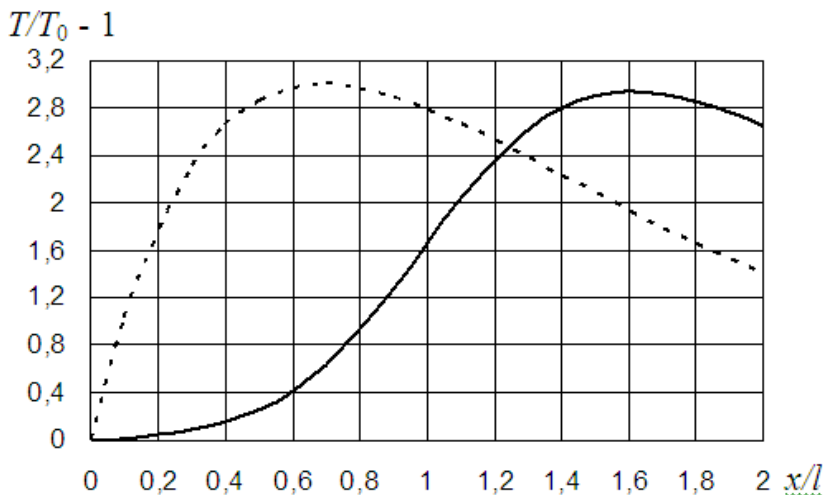


Рисунок 3.10. – Криві розподілу відносної температури по довжині каналу до подачі порошку на осередок пожежі (штрихова лінія) і при подачі порошку (суцільна лінія)

Результати моделювання показують, що вплив порошку на осередок пожежі найбільш інтенсивно спостерігається на початку зони горіння, а потім все менше углиб її. Під час великомасштабних пожеж у результаті припинення горіння на початку осередку пожежі під впливом порошку відбувається зміщення зони горіння углиб каналу.

Флегматизуюча дія порошку позначається на концентрації кисню, який не бере участі в горінні на початку осередку пожежі, про що свідчать дані математичного моделювання (рис. 3.11).

Таким чином, спочатку порошок у зоні своєї дії розриває ланцюги хімічних реакцій газоподібних продуктів горіння з киснем, що позначається на температурі пожежних газів та зміщує її максимум углиб каналу.

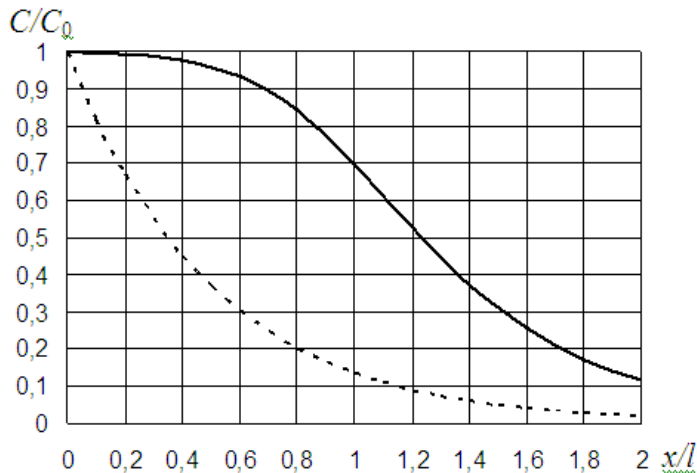


Рисунок 3.11. – Розподіл відносної концентрації кисню по довжині каналу до подачі вогнегасного порошку (штрихова лінія) і при подачі порошку (суцільна крива)

3.5. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі гасіння пожеж вогнегасним порошком в натурних умовах

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі гасіння порошком пожеж в довгих каналах використані дані експериментальних досліджень НДІГС [122]. Вони проводилися у дослідній штольні (довгому, горизонтально розташованому каналі поперечним перерізом 4 м^2 , як зазначено у другому розділі), де покрівля і бічні стінки закріплені суцільним дерев'яним затулюванням на довжині 105 м. Після виникнення пожежі за допомогою порошково-пінної установки «Буря» до її осередку протягом 12 хв подавався тонкодисперсний порошок П-2АП загальною кількістю 1200 кг і продуктивністю 1,7 кг/с. Швидкість вентиляційного потоку повітря, як вказується, становила близько 3 м/с, що при перерізі 4 м^2 давало витрати повітря $Q = 11 \text{ м}^3/\text{с}$. Отже, початкова концентрація порошку була рівною $Z_0 = 0,15 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 3.12 представлені дані порівняння розрахунків та експерименту під час гасіння пожежі порошком П-2АП.

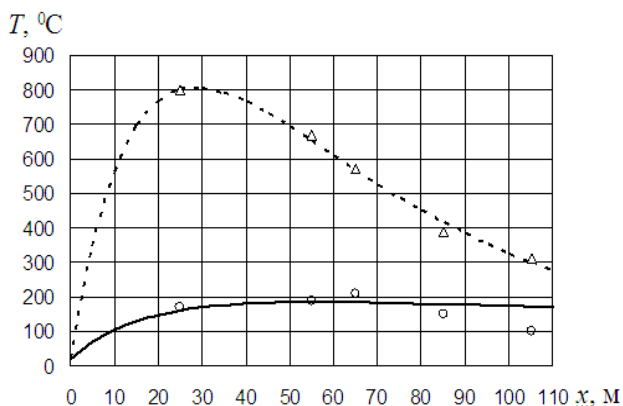


Рисунок 3.12. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних розподілу температури уздовж каналу до подачі порошку П-2АП (штрихова лінія і трикутні маркери) і при подачі порошку через 12 хв (суцільна лінія і кружечки)

При порівнянні розрахункових і експериментальних даних прийнято безрозмірні параметри рівними: $aZ_0 = 6$; $\gamma l/u = 0,05$; $AB = 0,9$; $B = 13,5$; $St = 3$.

Звідси знайдені: емпірична константа $a = 40 \text{ м}^3/\text{кг}$; коефіцієнт осідання порошку на стінках каналу $\gamma = 0,003 \text{ 1/с}$ при умовній довжині $l = 50 \text{ м}$; коефіцієнт тепловіддачі стінок каналу $\alpha = 0,2 \text{ кВт / (К} \cdot \text{м}^2)$ при периметрі поперечного перерізу каналу $\Pi = 8 \text{ м}$.

Як показують результати порівняння, розроблена модель впливу на осередок пожежі порошком повністю адекватна натурному об'єкту. Вплив порошком призводить до зниження температури в зоні горіння – до 200°C , що є недостатнім, тому й не випадково, що подальше гасіння пожежі проводиться піною. Крім того, була розроблена установка «Буря» порошково-пінного гасіння пожеж.

В іншій роботі [115] наводяться дані з гасіння пожежі порошком П-3АТ. Цього разу дерев'яною зтяжкою було закріплено 110 м тієї ж дослідної штольні. Після виникнення пожежі через деякий проміжок часу установкою "Буря" подавався порошок П-3АТ протягом 12 хв. Витрати повітря цього разу були приблизно рівними $Q = 11 \text{ м}^3/\text{с}$, а початкова концентрація порошку – $Z_0 = 0,25 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 3.13 представлені дані порівняння розрахунків та експерименту під час гасіння пожежі порошком П-3АТ.

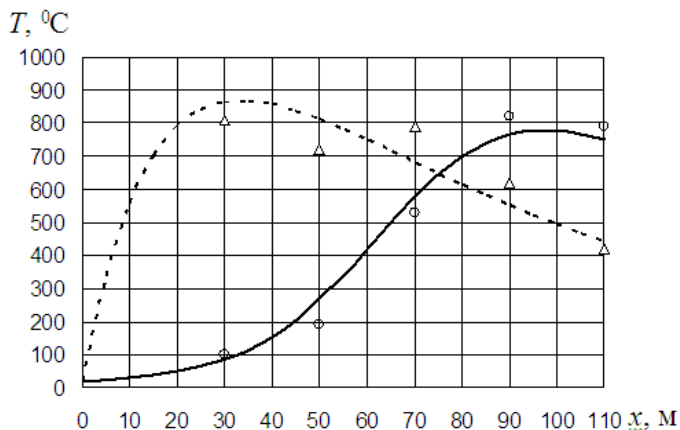


Рисунок 3.13. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних розподілу температури уздовж каналу до подачі порошку П-3АТ (штрихова лінія і трикутні маркери) і при подачі порошку через 12 хв (суцільна лінія і кружечки)

При порівнянні розрахункових і експериментальних даних прийняті безрозмірні параметри рівними: $\alpha Z_0 = 100$; $\gamma l/u = 4$; $AB = 0,6$; $B = 13$; $St = 3$.

Звідси знайдені: емпірична константа $a = 400 \text{ м}^3/\text{кг}$; коефіцієнт осідання порошку на стінках каналу $\gamma = 0,22 \text{ 1/с}$ за умовної довжини $l = 50 \text{ м}$; коефіцієнт тепловіддачі стінок каналу є таким же і дорівнює $\alpha = 0,2 \text{ кВт/(К м}^2\text{)}$ при периметрі поперечного перерізу каналу $\Pi = 8 \text{ м}$.

Якщо в першому випадку при застосуванні порошку П-2АП температура по всій довжині каналу знизилася до 200°C , то в другому – при застосуванні порошку П-3АТ вона знизилася до 100°C на ділянці 35 м , а потім зростала до 200°C на решті довжині до 50 м . За межами цієї ділянки температура продовжувала зростати до 800°C . Це повністю відповідає результатам математичного моделювання впливу на осередок пожежі порошком як за даними рис. 3.13, так і

рис. 3.10. Не випадково в керівному документі [114] щодо застосування порошків для гасіння пожеж у гірничих виробках рекомендовано довжину до 35 м для ефективної дії установки «Буря». Отже для подальшого впливу на осередок пожежі після подачі порошку застосовується піна.

Таким чином, виконані теоретичні дослідження переконливо довели, що для найбільш повної і достовірної картини процесів розвитку і гасіння великомасштабних пожеж порошками і піною необхідно розглядати не середньооб'ємні температури, а їх розподіл по довжині залежно від розподілів концентрації кисню, порошку та піни.

3.6. Експериментальні дослідження ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях порошками за допомогою рециркуляції легких продуктів згоряння

Для проведення експериментальних досліджень впливу на осередок пожежі порошками і за допомогою рециркуляції в лабораторних умовах використовувалася камера, описана в розділі 2.

Цього разу застосування методів гасіння в лабораторних умовах здійснювалось на момент розповсюдження горіння до 85-90% довжини кабельної ділянки (15-та хвилина), при цьому температура сягала максимуму на 12-й хвилині від початку дослідів.

Вільне горіння триває 5-6 хвилин до припинення зростання температури, а це 700 – 750 °С.

Гасіння проводиться при досягненні температури 700°C. Мінімальний приплив повітря до камери для підтримання горіння 5 кг кабельної ізоляції повинен складати 0,0235 м³/с.

Під час гасіння осередку пожежі порошком в першому експерименті (рис. 3.14) його подача (1 кг) тривала 0,5 хвилини до зникнення полум'яного горіння.

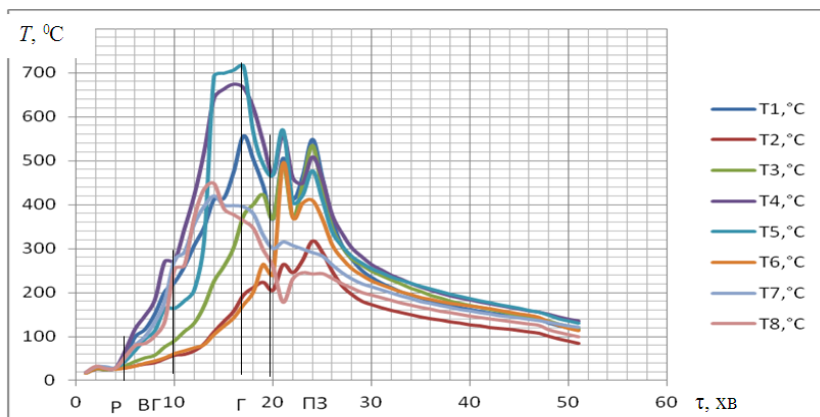


Рисунок 3.14. – Експериментальні криві зміни температури в камері у часі за даними термодатчиків в першому експерименті (подача порошку 1 кг протягом 0,5 хв і при рециркуляції 2,5 хв): Р – розпалювання; ВГ – вільне горіння; Г – гасіння; Т – тління; КТ – кінець тління

Тут струмінь порошку спрямований перпендикулярно до кабельної лінії, на відстані 0,5 м від неї, в режимі рециркуляції, швидкість потоку продуктів горіння становить 3 м/с, а температура 67°C . Через дві хвилини після початку гасіння вимикаємо рециркуляцію і відновлюємо надходження повітря при працюючій припливній вентиляції і притоком повітря $0,0235 \text{ м}^3/\text{с}$ (швидкість потоку повітря 3 м/с), внаслідок чого через 1 хв відбувається повторне загоряння.

У другому експерименті (рис. 3.15) подача порошку (2 кг) тривала протягом 50 с до зникнення полуменевого горіння.

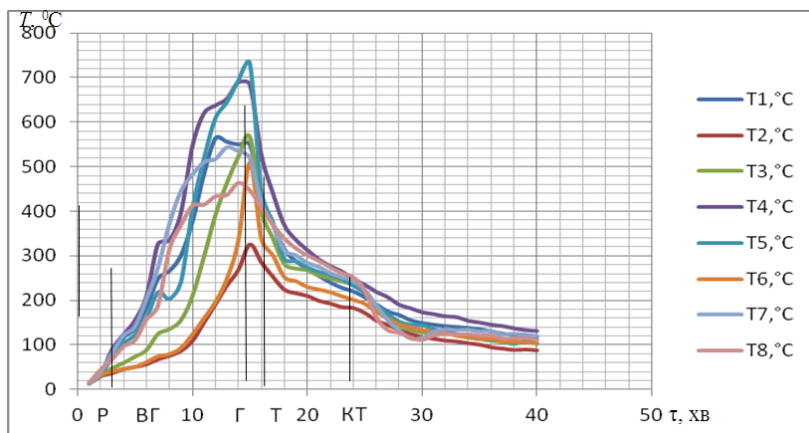


Рисунок 3.15. – Експериментальні криві зміни температури в камері у часі за даними термодатчиків у другому експерименті (подача порошку 2 кг протягом 50 с і при рециркуляції 10 хвилин)

Подавання порошку здійснювалося при вимкненій припливній вентиляції і працюючій рециркуляції. В режимі рециркуляції швидкість потоку продуктів горіння – 3 м/с, температура – 67 $^\circ\text{C}$. Струмінь порошку подавали з нижнього рівня камери під кабельну лінію на відстані 0,5 м від неї. Через десять хвилин після початку гасіння вимикалася рециркуляція і відновлювалося надходження повітря при працюючій припливній вентиляції. Під час гасіння спостерігалось тління, яке припинилось через 7 хвилин після закінчення гасіння.

У третьому експерименті (рис.3.16) подавання порошку (1 кг) тривало протягом 30 с при досягненні температури 560 $^\circ\text{C}$.

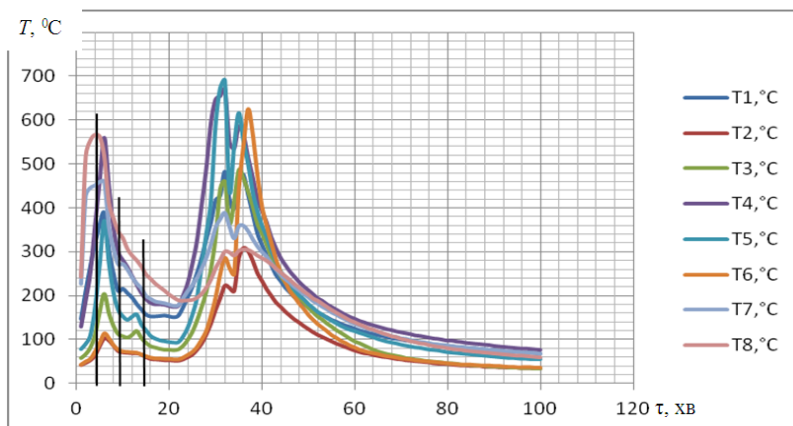


Рисунок 3.16. – Експериментальні криві зміни температури в камері у часі за даними термодатчиків у третьому експерименті (подача порошку 1 кг протягом 30 с і при рециркуляції 30 с з подальшою подачею порошку ще 2 рази)

Вільне горіння тривало протягом 7 хв при працюючій припливній вентиляції з витратою $0,047 \text{ м}^3/\text{с}$, в камері температура сягала $560 \text{ }^\circ\text{C}$ і не зростала. Гасіння проводилося при досягненні температури $560 \text{ }^\circ\text{C}$. Подавання порошку (1 кг) тривало протягом 30 с, до зникнення полуменевого горіння, при вимкненій припливній вентиляції і працюючій рециркуляції, повторне загоряння через 3 хв. після гасіння. Повторне гасіння тривало 32 з використанням 650 г порошку, загоряння сталося через 3 хв. Третє гасіння тривало 15 с, використовувалось 250 г порошку, рециркуляція відбувалась через 2 хв, загоряння через 2,5 хв. В режимі рециркуляції швидкість потоку продуктів горіння дорівнювала 3 м/с , температура $67 \text{ }^\circ\text{C}$. Струмінь порошку подавали до газопровідної мережі вентиляції. Мінімальний приплив повітря до камери для підтримання горіння (5 кг) кабельної ізоляції має становити $0,0235 \text{ м}^3/\text{с}$.

У четвертому експерименті (рис. 3.17) подавання порошку 130 г тривало протягом 5 с до зникнення полуменевого горіння.

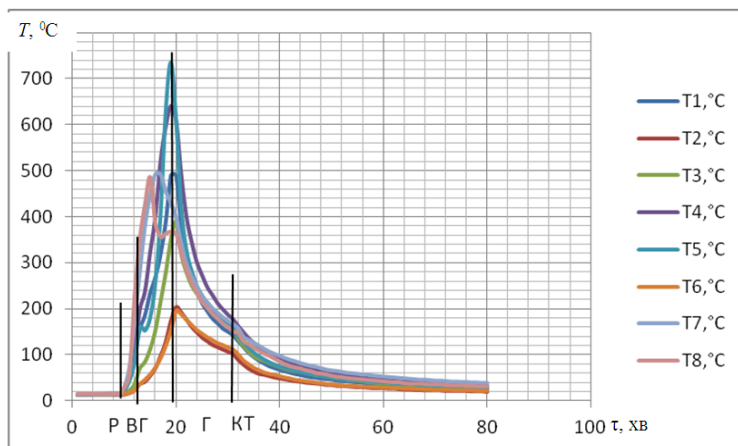


Рисунок 3.17. – Експериментальні криві зміни температури в камері у часі за даними термодатчиків в четвертому експерименті (подача порошку 130 протягом 5 с і при рециркуляції 10 хв)

Подавання 130 г порошку тривало протягом 5 с при вимкненій припливній вентиляції і працюючій рециркуляції. В режимі рециркуляції швидкість потоку продуктів горіння дорівнює 3 м/с, температура – 67 $^\circ\text{C}$. Рециркуляція відбувається протягом 10 хв. Струмінь порошку подавали до вентиляції. Після гасіння спостерігалось тління, яке припинилося через 6 хв після закінчення гасіння.

На рис. 3.18 представлені експериментальні дані, отримані в лабораторних умовах, з гасіння пожежі способом рециркуляції пожежних газів.

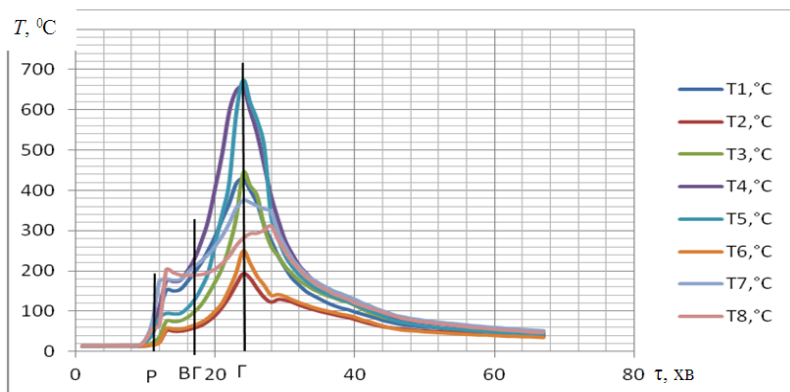


Рисунок 3.18. – Експериментальні криві зміни температури в камері у часі за даними термодатчиків при рециркуляції пожежних газів

У цьому разі вільне горіння тривало протягом 7 хв, а гасіння рециркуляцією – 12 хвилин. Повторного загорання не відбувалося. В режимі рециркуляції швидкість потоку продуктів горіння становить 3 м/с, температура – 67°C.

Для встановлення ефективності гасіння пожеж у кабельних тунелях вогнегасним порошком математичне моделювання впливу на середовище проводилося роздільно (спочатку засобами рециркуляції, а потім з одночасним із застосуванням порошку і рециркуляції).

При застосуванні рециркуляції на осередок пожежі повинні подаватися продукти згорання. У цьому випадку систему рівнянь (2.38) будемо розв'язувати не за явною схемою, а за комбінованою схемою (явною і неявною) [105,106], що дає велику точність і більший крок за часом. Як приклад розглянемо диференціальне рівняння виду:

$$f'(\tau) = -f(\tau). \quad (3.66)$$

Як відомо, розв'язком цього рівняння за початкової умови $f(0) = 1$, є експонента:

$$f(\tau) = \exp(-\tau). \quad (3.67)$$

Розв'язуватимемо це рівняння чисельними методами: за явною, неявною та комбінованою схемами відповідно:

$$f^{n+1} = (1 - \Delta\tau) f^n; \quad f^{n+1} = \frac{f^n}{1 + \Delta\tau}; \quad f^{n+1} = \frac{1 - \Delta\tau/2}{1 + \Delta\tau/2} f^n. \quad (3.68)$$

На рис. 3.19 представлені результати розрахунку за цими формулами і по експоненті (3.67).

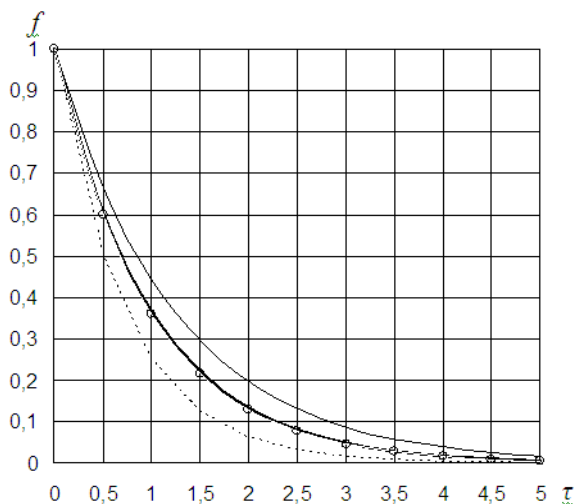


Рисунок. 3.19. – Результати розрахунку чисельними методами диференціального рівняння (3.66) (жирна лінія – точне рішення, штрихова лінія – явна схема, тонка лінія – неявна схема, маркери – комбінована схема)

Як видно, комбінована схема (з однаковою питомою вагою явною і неявною) дає, по суті, точний розв'язок задачі

навіть при кроці за часом $\Delta\tau = 0,5$. Тому замість явної схеми (2.42), використовуючи систему рівнянь (2.38), будемо розв'язувати її за комбінованою схемою, приймаючи $\bar{D} = \bar{a}_1 = 0$. У результаті отримаємо таку систему рівнянь для комбінованої схеми:

$$\begin{aligned}\bar{C}_m^{n+1} &= \frac{[1 - (Cu + AB\bar{q}_m^n) / 2] \bar{C}_m^n + Cu \bar{Z}_m^n}{1 + (Cu + AB\bar{q}_m^n) / 2}; \\ \bar{T}_m^{n+1} &= \frac{[1 - Cu(1 + St) / 2] \bar{T}_m^n + St \bar{\theta}_m^n + B\bar{q}_m^n Cu (\bar{C}_m^n + \bar{C}_m^{n+1}) / 2}{1 + Cu(1 + St) / 2}; \\ \bar{\theta}_m^{n+1} &= \frac{(1 - \bar{a}_2 / 2) \bar{\theta}_m^n + \bar{a}_2 \bar{T}_m^n}{1 + \bar{a}_2 / 2}.\end{aligned}\quad (3.69)$$

Тут параметр $\bar{Z}_m^n$ означає відносну концентрацію кисню перед осередком пожежі. У розімкненому контурі це концентрація кисню при нормальних умовах $\bar{Z}_m^n = 1$. У замкненому контурі при рециркуляції параметр $\bar{Z}_m^n$ визначається з використанням ще одного рівняння:

$$V_1 \frac{dZ}{d\tau} = -(Z - C)Q + (C_0 - C)Q_1, \quad (3.70)$$

де V_1 – об'єм зони рециркуляції пожежних газів за винятком зони горіння, м³;

Q – витрата пожежних газів, м³/с;

Q_1 – підсмоктування повітря, м³/с.

Аналіз рівняння (3.70) доводить, що зміна концентрації кисню в часі в зоні рециркуляції за межами осередку пожежі відбуватиметься через надходження до цього об'єму концентрації кисню з осередку та із зовнішнього середовища. Так за відсутності підсмоктувань чистого повітря ($Q_1 = 0$), чого в реальних умовах навряд чи можна досягти, утворюється повністю замкнений контур. При підсосах чистого повітря контур є повністю розімкненим ($Q_1 = Q$) і

до осередку пожежі буде надходити чисте повітря з концентрацією $Z = C_0$.

Представимо рівняння (3.70) в кінцевих різницях

$$\bar{Z}_m^{n+1} = (1 - Cu_1)\bar{Z}_m^n + (1 - \bar{Q}_1)Cu_1\bar{C}_m^n + Cu_1\bar{Q}_1, \quad (3.71)$$

де $Cu_1 = Q\Delta\tau/V_1$ – число Куранта перед зоною горіння;

$\bar{Q}_1 = Q_1/Q$ – відносна величина підсмоктування повітря.

Отримана система рівнянь (3.69) і (3.71) дозволяє моделювати процеси горіння в кабельному каналі як без рециркуляції пожежних газів, так і при їхній рециркуляції.

Розрахунки за формулами (3.69) в розімкненому контурі при горінні в кабельному тунелі показали, що ці результати повністю збігаються з тими результатами, які отримані в другому розділі.

На рис. 3.20 представлені експериментальні та розрахункові дані динаміки температури пожежних газів при їх рециркуляції.

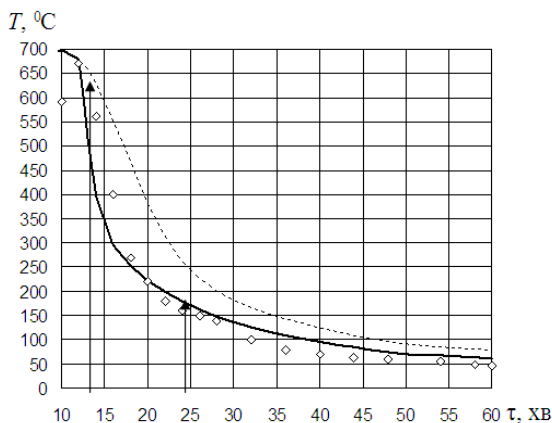


Рисунок 3.20. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних динаміки максимальної температури пожежних газів при їх рециркуляції в кабельному тунелі (маркери – експериментальні дані відповідно до рис. 3.18, суцільна крива – розрахункові дані при рециркуляції, пунктирна лінія – розрахункові дані без рециркуляції)

Стрілками вказані початок і кінець рециркуляції. Очевидно, що більш тривала рециркуляція призвела б до більш значного ефекту.

У розрахунках для найкращої збіжності розрахункових і експериментальних даних прийнято число Куранта в рециркуляційному потоці $Cu_1 = 0,05$ і відносні підсоси повітря $\bar{Q}_1 = 0,1$. Інші параметри прийняті рівними: $Cu = 0,5$; $A = 0,02$; $B = 600$; $St = 4,5$.

На рис. 3.21 наведені розрахункові та експериментальні дані впливу на осередок пожежі вогнегасним порошком і короткочасною рециркуляцією пожежних газів.

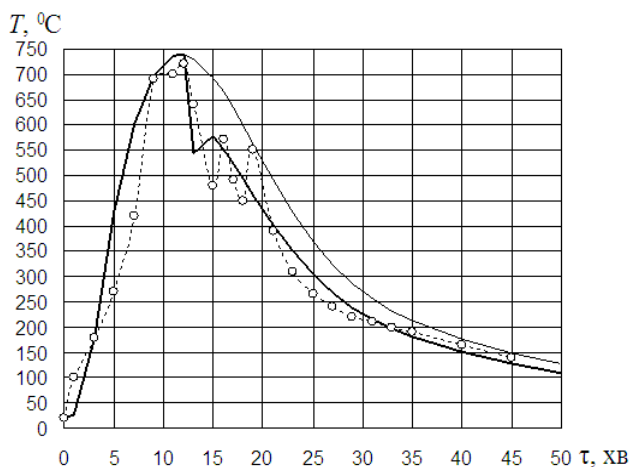


Рисунок 3.21. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних динаміки температури пожежних газів при їх короткочасній рециркуляції і подачі порошку протягом 30 с в кабельному тунелі (маркери – експериментальні дані відповідно до рис. 3.14, жирна лінія – розрахункові дані при рециркуляції, тонка – розрахункові дані без рециркуляції і без подачі порошку)

Як видно (рис. 3.21), дані моделювання достовірно відтворюють як процеси горіння, так і гасіння пожежі. Однак короткочасна подача порошку (всього 0,5 хв (і рециркуляція (2 хв) майже не чинять помітного впливу на осередок пожежі.

При виконанні розрахунків в цьому випадку прийнято також число Куранта в рециркуляційному потоці $Su_1 = 0,05$, а відносні підсмоктування повітря $\bar{Q}_1 = 0,1$. У той же час число Стантона $St = 5$, параметри $A = 0,02$ і $B = 700$. Подача порошку призвела, як показують розрахункові дані, до зменшення поверхні горіння F на 20%, в результаті чого параметр B зменшено з 700 до 560.

На рис. 3.22 наведені розрахункові та експериментальні дані впливу на осередок пожежі вогнегасним порошком (2 кг) протягом 50 с і рециркуляцією пожежних газів протягом 10 хв.

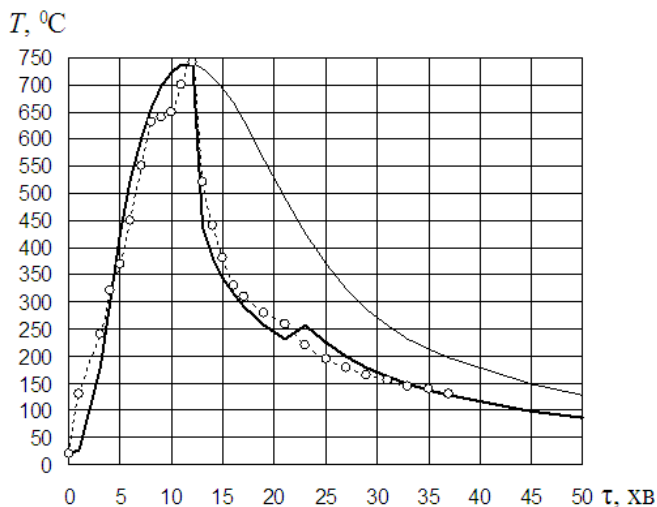


Рисунок 3.22. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних динаміки температури пожежних газів при їх тривалій рециркуляції протягом 10 хв і подачі (2 кг) порошку протягом 50 с до кабельного тунелю (маркери – експериментальні дані відповідно до рис. 3.15, жирна лінія – розрахункові дані при рециркуляції, тонка – розрахункові дані без рециркуляції і без подачі порошку)

Більш тривала подача порошку призвела, як показують розрахункові дані, до зменшення поверхні горіння на 30%, в результаті чого параметр B зменшено з 700 до 500.

Із порівняння даних експериментів (рис. 3.21 і рис. 3.22) випливає, що більш тривала рециркуляція пожежних газів протягом 10 хв і подача порошку з інтенсивністю приблизно 2 кг/хв, хоча б протягом хвилини, призводять до ефективного впливу на осередок пожежі.

Таким чином, експерименти в лабораторних умовах показали, що короткочасна і періодична подача порошку на осередок пожежі разом із рециркуляцією продуктів згоряння дозволяє ефективно впливати на цей процес і економно використовувати порошок. У той же час, гасіння осередку горіння порошком під час великомасштабних пожеж потребує тривалої подачі порошку і повинно проводитися протягом 10 – 12 хв до зниження температури 100 - 200 °С. Після цього необхідно переходити на режим рециркуляції пожежних газів або використовувати інші засоби пожежогасіння.

Висновки

1. Розроблено математичну модель стаціонарного перенесення аерозолів (порошку) потоком повітря в довгих каналах з урахуванням їх вертикальної турбулентної дифузії, осідання на стінках за рахунок пульсацій повітря і осідання на ґрунт каналу під дією сили тяжіння.

2. Отримано аналітичну залежність концентрації порошку від положення частинок по довжині каналу і по висоті при різній швидкості струменевого закінчення й подальшого руху та перемішування в потоці повітря з урахуванням початкової концентрації порошку і коефіцієнтів швидкості осідання.

3. Встановлено адекватність математичної моделі натурному об'єкту щодо перенесення порошку супутнім потоком повітря. За результатами порівняння розрахункових та експериментальних даних визначено коефіцієнт турбулентної дифузії в залежності від числа Рейнольдса, а також коефіцієнти

швидкостей осідання частинок порошку під дією сили тяжіння і пульсацій швидкості повітря, а також від діаметру частинок в діапазоні їх зміни від 10 до 200 мкм і початкової концентрації порошку.

4. Розроблено квазістаціонарну математичну модель гасіння великомасштабних пожеж вогнегасним порошком, вплив якого здійснюється шляхом зменшення швидкості вигорання матеріалу при збільшенні концентрації порошку в потоці повітря, що відбивається на розподілі по довжині каналу як концентрації кисню, так і температури пожежних газів.

5. Отримано аналітичні залежності концентрації кисню і температури пожежних газів від початкової концентрації порошку, коефіцієнта швидкості його осідання і параметрів осередку по всій довжині зони горіння, що змінюється з часом.

6. Встановлено адекватність математичної моделі натурному об'єкту при гасінні двох великомасштабних пожеж порошком П-2АП і П-3АТ на довжині зони розташування горючого матеріалу до 100 – 110 м в реальних умовах і показана необхідність комплексного впливу на осередок пожежі порошками та іншими засобами пожежогасіння. Розрахункові криві з достатнім ступенем точності відображають тепломасообмінні процеси як до застосування порошків, так і при їх впливі на осередок пожежі. Отримані результати можуть бути використані при прогнозуванні ефективності гасіння пожеж порошком в каналах значної протяжності і для вибору оптимальних параметрів роботи установки порошкового пожежогасіння та її відстані до осередку.

7. Проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах гасіння пожеж у кабельних тунелях вогнегасним порошком з одночасною рециркуляцією продуктів згоряння. Теоретичними та експериментальними дослідженнями встановлено, що економна, короткочасна і періодична подача порошку до осередку пожежі призводить до

ефективного її гасіння, особливо при перпендикулярному подаванні порошку до потоку повітря. Ефективність гасіння ще більше посилюється при застосуванні додаткової рециркуляції продуктів згоряння.

РОЗДІЛ 4

ВЗАЄМОДІЯ ГАЗОВИХ ПОТОКІВ З ДИСПЕРГОВАНОЮ ВОДОЮ У ПРОТЯЖНИХ КАНАЛАХ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ

4.1. Розробка математичної моделі переносу диспергованої води в протяжних каналах

Головну роль серед сучасних засобів пожежогасіння і досі займає вода у вигляді суцільного або розпиленого струменя, яка подається до осередку пожежі. Використання води в диспергованому вигляді дозволяє підвищити її вогнегасні властивості завдяки розосередженому розподілу в потоці повітря і швидкому випаровуванню при малих діаметрах крапель. При вивченні цих процесів будемо ґрунтуватися на добре розробленій теорії течії двофазних середовищ крапельної і бульбашкової структури в теплообмінниках і трубах [90 - 95], на результатах експериментальних досліджень двофазних потоків [98,99]. Оскільки відомі дослідження проводилися в основному при вирішенні питань кавітації при випаровуванні рідини і конденсації її пари на лопатках турбін з утворенням плівок рідини, розроблена теорія потребує відповідних доопрацювань, після чого може бути використана для вивчення процесів руху крапель рідини в різних каналах з їх подальшим випаровуванням в зоні високих температур.

Однак для безпосереднього впливу диспергованої води на осередок пожежі необхідно подати її з певної відстані в зону горіння. У зв'язку з цим запропоновані різні математичні моделі переносу диспергованої води в потоці повітря.

Одна з таких математичних моделей виходить із теорії динаміки кожної окремої краплі рідини у вертикальній

площині з урахуванням сили тяжіння краплі і аеродинамічного опору руху краплі за законом Стокса [203].

Оскільки розпилений струмінь рідини являє собою сукупність крапель, які майже не взаємодіють майже одна з одною, за винятком окремих сутичок, то будемо виходити з моделі переносу кожної окремої краплі в потоці повітря. При цьому звернемося до рівняння динаміки краплі у векторній формі [98]

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = m\vec{g} - \vec{W} \quad (4.1)$$

де m – маса краплі рідини, кг;

$\vec{U}$ – вектор швидкості руху краплі, м/с;

$\vec{g}$ – вектор прискорення вільного падіння, м/с²;

$\vec{W}$ – вектор опору руху краплі, кг·м/с²;

t – час з моменту вильоту краплі з форсунки, с.

Оскільки крапля має форму кулі, то до неї застосовні всі експериментальні дані [97], отримані при вивченні руху тіла (кулі) в рідині або в повітрі при її нестисканні і дозвукових швидкостях. Встановлена загальна залежність сили опору W з боку повітря руху кулі у вигляді

$$W = \rho D^2 U^2 f(Re) \quad (4.2)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³;

D – діаметр краплі, м;

U – швидкість руху краплі в якому не будь напрямку, м/с;

Re – число Рейнольдса, рівне

$$\text{Re} = \frac{\rho u D}{\mu}. \quad (4.3)$$

Тут μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Па·с.

Як наголошується в роботі Л.І. Сєдова, визначення функції $f(\text{Re})$ є найважливішим завданням теоретичної та експериментальної аеродинаміки.

Оскільки коефіцієнт динамічної в'язкості пов'язаний з коефіцієнтом кінематичної в'язкості залежністю

$$\mu = \rho \nu, \quad (4.4)$$

то число Рейнольдса зазвичай представляють у вигляді

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu}, \quad (4.5)$$

де ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, що дорівнює $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Як показують експериментальні дані при малих числах Рейнольдса ($\text{Re} < 1$), тобто малій швидкості руху кулі і малих його розмірах, функція опору обернено пропорційна числу Рейнольдса і сила опору в цьому випадку є лінійною функцією і може бути представлена у вигляді

$$W_1 = 3\pi\mu DU. \quad (4.6)$$

У той же час при великих числах Рейнольдса $\text{Re} > 1000$ функція опору є константою, і сила опору може бути визначена за формулою

$$W_2 = 0,1\pi\rho D^2 U^2. \quad (4.7)$$

Використовуючи двочленний закон опору й об'єднуючи формули (4.6) і (4.7), отримаємо

$$W = 3\pi\mu DU + 0,1\pi\rho D^2 U^2. \quad (4.8)$$

У літературі наводяться дані залежності коефіцієнта опору кулі $C_w = 8f / \pi$ при числах Рейнольдса $Re < 200$. На рис 4.1 представлена така залежність у вигляді кривих (штрихова лінія – дані експериментів, тонка лінія – ламінарний режим руху куль, товста лінія – турбулентний, проміжний і ламінарний режими руху куль).

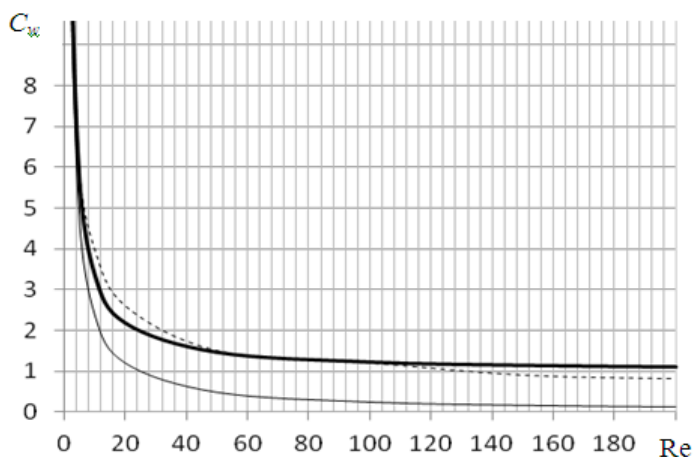


Рисунок.4.1. – Залежність коефіцієнта опору тіл кулястої форми від числа Рейнольдса

Обробка експериментальних даних показала, що з достатнім ступенем точності (відносна похибка не більше 15%), формула для розрахунку коефіцієнта опору може бути представлена у вигляді

$$C_w = 24/Re + 0,8. \quad (4.9)$$

Аналіз отриманих результатів показує, що враховувати при розрахунках тільки ламінарний режим руху крапель в потоці повітря можна тільки при числах Рейнольдса $Re < 10$. В іншому випадку розрахункові коефіцієнти опору будуть відрізнятися в 2 і більше разів від фактичних.

Разом з тим встановлено [205], що при створенні водяної завіси середньозважений діаметр крапель рідини залежить від об'ємної витрати води і знаходиться в межах $(0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3}$ м. Використовуючи ці дані, знайдемо діапазон зміни числа Рейнольдса

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{(0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-5}} U = (13 - 53) U.$$

Таким чином, навіть при швидкості крапель рідини $U = 1$ м/с режим їх руху знаходиться в перехідній та турбулентній області. Тому використання тільки закону Стокса, як в роботі [203], може призвести до грубих помилок при розрахунках.

Представляючи залежність (4.8) у векторній формі і підставляючи її в рівняння (4.1), отримаємо

$$m \frac{d\vec{U}}{dt} = m\vec{g} - 3\pi\mu D\vec{U} - 0,1\pi\rho D^2 \vec{U}^2. \quad (4.10)$$

У проекціях на осі координат у горизонтальному каналі будемо мати по довжині і висоті наступну систему рівнянь

$$\begin{aligned} m \frac{d(u - u_0)}{dt} &= -3\pi D\mu(u - u_0) - 0,1\pi\rho D^2 (u - u_0)^2, \\ m \frac{dv}{dt} &= -mg - 3\pi D\mu v - 0,1\pi\rho D^2 v^2, \end{aligned} \quad (4.11)$$

де u і v – проекції швидкості руху крапель на горизонтальну і вертикальну осі координат, спрямовану знизу вгору (рис. 4.2), м/с;

u_0 – швидкість вентиляційного потоку повітря, м/с;

g – прискорення вільного падіння, яке дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$.

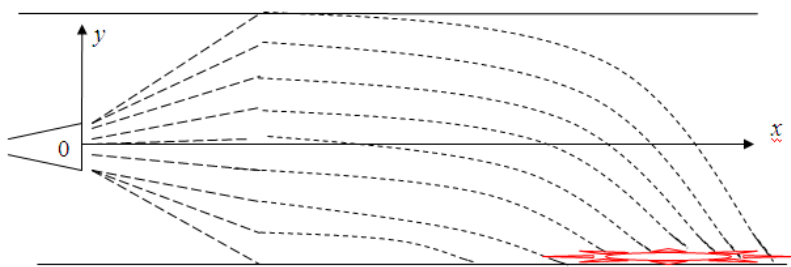


Рисунок 4.2. – Схема подачі дисперсної води до осередку пожежі з прив'язкою до осей координат

До системи рівнянь (4.11) необхідно додати початкові умови закінчення крапель рідини із ствола під різними кутами

$$\begin{aligned} u(0) &= u_1 \cos \beta; \\ v(0) &= u_1 \sin \beta, \end{aligned} \quad (4.12)$$

де u_1 – початкова швидкість витікання крапель рідини із ствола, м/с;

β – кут, під яким ця крапля стікає зі ствола, відлічуваний від осі x , град.

Аналіз запропонованої для дослідження системи рівнянь переносу крапель рідини (4.11) з початковими умовами (4.12) показує, що на відміну від відомої системи рівнянь [203] тут в правій частині присутні вирази, що представляють собою силу опору при турбулентному режимі руху крапель, що, як вже показано, необхідно враховувати.

До того ж береться до уваги кут витікання крапель рідини із ствола.

Система рівнянь (4.11) з початковими умовами дозволяє знайти аналітичне рішення задачі.

4.2. Моделювання динаміки дрібнодисперсної рідини в протяжному каналі

Отримання аналітичного рішення задачі переносу крапель рідини у вентиляційному потоці дозволяє виконати математичне моделювання цього процесу і отримати узагальнені результати для прогнозу дальності польоту крапель рідини і площі, зрошуваним розпорошеним струменем.

Для отримання аналітичного рішення задачі розділимо змінні в рівняннях системи (4.12) і будемо вважати, що в попереречному напрямку справедливий закон Стокса. Тоді отримаємо

$$\begin{aligned} m \frac{d(u - u_0)}{0,1\pi\rho D^2 (u - u_0)^2 + 3\pi D\mu(u - u_0)} &= -dt, \\ m \frac{dv}{3\pi D\mu v + mg} &= -dt. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Розв'язок першого рівняння системи (4.13) можна представити у вигляді

$$\frac{m}{3\pi D\mu} \ln \left(\frac{0,1\pi\rho D^2 (u - u_0)}{0,1\pi\rho D^2 (u - u_0) + 3\pi D\mu} \right) = -t + K_1, \quad (4.14)$$

де K_1 – константа інтегрування, яка визначається з першої початкової умови (4.12) і дорівнює

$$K_1 = \frac{m}{3\pi D\mu} \ln \left(\frac{0,1\pi\rho D^2 (u_1 \cos \beta - u_0)}{0,1\pi\rho D^2 (u_1 \cos \beta - u_0) + 3\pi D\mu} \right). \quad (4.15)$$

Підставляючи константу інтегрування K_1 в розв'язок (4.14), отримаємо

$$\ln\left(\frac{D(u-u_0)}{D(u-u_0)+30\mu/\rho} \frac{D(u_1 \cos \beta - u_0) + 30\mu/\rho}{D(u_1 \cos \beta - u_0)}\right) = -3\pi D\mu t/m. \quad (4.16)$$

Потенціюючи отриманий розв'язок (4.16) і беручи $\mu/\rho = v$, будемо мати

$$\frac{u-u_0}{(u-u_0)+30v/D} = \frac{u_1 \cos \beta - u_0}{(u_1 \cos \beta - u_0) + 30v/D} \exp(-3\pi D\mu t/m). \quad (4.17)$$

Розв'язуючи отриману формулу (4.17) відносно поздовжньої швидкості руху краплі, отримаємо

$$u = u_0 + \frac{30v \exp(-3\pi D\mu t/m)/D}{\frac{u_1 \cos \beta - u_0}{(u_1 \cos \beta - u_0) + 30v/D} - \exp(-3\pi D\mu t/m)}. \quad (4.18)$$

Розв'язок другого рівняння системи (4.13) можна отримати згідно з [163] у вигляді

$$\frac{m}{3\pi D\mu} \ln(3\pi D\mu\omega + mg) = -t + K_2, \quad (4.19)$$

де K_2 – константа інтегрування, яка визначається з другої початкової умови (4.12) і дорівнює

$$K_2 = -\frac{m}{3\pi D\mu} \ln(3\pi D\mu u_1 \sin \beta + mg). \quad (4.20)$$

Підставляючи (4.20) у формулу (4.19), отримаємо

$$\frac{m}{3\pi D\mu} [\ln(3\pi D\mu\omega + mg) - \ln(3\pi D\mu u_1 \sin \beta + mg)] = -t \quad (4.21)$$

Потенціюючи ліву частину формули (4.21), будемо мати

$$3\pi D\mu v + mg = (3\pi D\mu u_1 \sin \beta + mg) \exp\left(-\frac{3\pi D\mu t}{m}\right), \quad (4.22)$$

звідки в явному вигляді отримаємо

$$v = (u_1 \sin \beta + \frac{mg}{3\pi D\mu}) \exp\left(-\frac{3\pi D\mu t}{m}\right) - \frac{mg}{3\pi D\mu}. \quad (4.23)$$

Отримані розв'язки (4.18) і (4.23) дозволяють визначати швидкості польоту крапель рідини в будь-який час з моменту подачі води до осередку пожежі. Однак практичний інтерес представляє місцезнаходження кожної краплі. Тому необхідно ще раз проінтегрувати формули (4.18) і (4.23), в результаті чого згідно з [108] отримаємо

$$X(t) = u_0 t + \frac{10m}{\pi \rho D^2} \ln\left(\frac{u_1 \cos \beta - u_0 + 30v/D}{u_1 \cos \beta - u_0} - \exp(-3\pi D\mu t/m)\right) + K_3 \quad (4.24)$$

де K_3 – константа інтегрування, яка визначається з умови того, що в початковий момент краплі знаходяться на виході і $X(0) = 0$. В результаті отримаємо

$$K_3 = -\frac{10m}{\pi D^2 \rho} \ln\left(\frac{u_1 \cos \beta - u_0 + 30v/D}{u_1 \cos \beta - u_0} - 1\right). \quad (4.25)$$

Підставляючи знайдену константу інтегрування (4.25) у формулу (4.24), остаточно матимемо

$$X(t) = u_0 t + \frac{10m}{\pi \rho D^2} \left[\ln\left(\frac{u_1 \cos \beta - u_0 + 30v/D}{u_1 \cos \beta - u_0} - \exp(-3\pi D\mu t/m)\right) - \ln\left(\frac{u_1 \cos \beta - u_0 + 30v/D}{u_1 \cos \beta - u_0} - 1\right) \right]. \quad (4.26)$$

Проінтегруємо також рівняння (4.23) за часом і згідно з [108] отримаємо

$$Y(t) = -\frac{m}{3\pi D\mu} \left(u_1 \sin \beta + \frac{mg}{3\pi D\mu} \right) \exp\left(-\frac{3\pi D\mu t}{m}\right) - \frac{mg}{3\pi D\mu} t + K_4 \quad (4.27)$$

Константу інтегрування K_4 визначимо з умови $Y(0) = 0$, внаслідок чого рішення (4.27) набуде вигляду

$$Y(t) = \frac{m}{3\pi D\mu} \left(u_1 \sin \beta + \frac{mg}{3\pi D\mu} \right) [1 - \exp\left(-\frac{3\pi D\mu t}{m}\right)] - \frac{mg}{3\pi D\mu} t. \quad (4.28)$$

При моделюванні зручно виразити масу краплі рідини через її густину і об'єм:

$$m = \rho_w \pi D^3 / 6, \quad (4.29)$$

де ρ_w – густина води, рівна 1000 кг/м³.

Встановимо діапазон зміни маси крапель, виходячи з даних [205] по їх діаметру

$$\begin{aligned} m &= \rho_w \pi D^3 / 6 = 1000 \cdot \pi [(0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3}]^3 / 6 = \\ &= (0,004 - 0,27) \cdot 10^{-6} \text{ кг.} \end{aligned}$$

Позначимо через деякий умовний час величину

$$t_0 = \frac{m}{3\pi D\mu}. \quad (4.30)$$

Діапазон зміни цього умовного часу згідно з [205] буде перебувати в межах

$$t_0 = \frac{m}{3\pi D\mu} = \frac{(0,004 - 0,27) \cdot 10^{-6}}{3\pi (0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5}} = 0,12 - 2,0 \text{ с.}$$

Візьмемо до розгляду ще величини, що характеризують деяку умовну горизонтальну швидкість і критерій або гравітаційне число, що характеризує відношення сил гравітації до в'язкості повітря

$$u_2 = \frac{30\nu}{D}; \quad G = \frac{0,4\rho mg}{9\pi\mu^2}. \quad (4.31)$$

Згідно з даними [208] умовна поздовжня складова швидкості і гравітаційне число набудуть таких значень

$$u_2 = \frac{30\nu}{D} = \frac{30 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5}}{(0,2 - 0,8) \cdot 10^{-3}} = (0,56 - 2,25) \text{ м/с};$$
$$G = \frac{0,4\rho mg}{9\pi\mu^2} = \frac{0,4 \cdot 1,2 \cdot (0,004 - 0,27) \cdot 10^{-6}}{9\pi(1,8 \cdot 10^{-5})^2} = (2 - 138).$$

У результаті спрощень формули (4.26) і (4.28) для розрахунку координат знаходження крапель рідини приймуть вигляд

$$X(t) = u_0 t + u_2 t_0 \left[\ln \left(\frac{u_1 \cos \beta - u_0 + u_2}{u_1 \cos \beta - u_0} - \exp(-t/t_0) \right) - \right. \\ \left. - \ln \left(\frac{u_1 \cos \beta - u_0 + u_2}{u_1 \cos \beta - u_0} - 1 \right) \right]; \quad (4.32)$$

$$Y(t) = t_0 (u_1 \sin \beta + g t_0) [1 - \exp(-t/t_0)] - g t_0 t. \quad (4.33)$$

Отримані аналітичні залежності (4.32) і (4.33) координат знаходження крапель рідини дозволяють моделювати траєкторії їх польоту.

На рис. 4.3 наведені результати моделювання крайніх меж траєкторій крапель води діаметром $0,2 \cdot 10^{-3}$ м при куті нахилу 100^0 до горизонту.

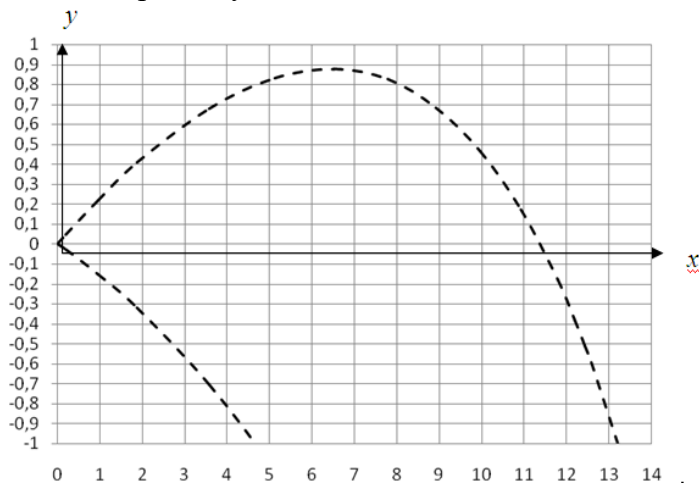


Рисунок 4.3. – Верхня і нижня межі розпиленого струменя при куті нахилу 10^0 до горизонту в каналі висотою 2 м

При цьому бралася початкова швидкість витікання розпиленого струменя $u_1 = 20$ м/с, а швидкість вентиляційного потоку приймалася $u_0 = 1$ м/с в каналі висотою 2 м.

Як видно, отримані результати повністю збігаються з даними випробувань багатофункціонального пожежного ствола СШПМ-50 [208] з середньою довжиною розпиленого струменя 12 м.

Подальші результати моделювання показали, що подача розпиленого струменя проти потоку повітря призводить до незначного скорочення довжини зони покриття всього на 1 м. Це дозволяє використовувати два пожежних стволи в одному місці і сприятимуть їх в протилежні сторони, збільшуючи тим самим в два рази зону впливу на осередок пожежі диспергованою водою.

4.3. Вплив диспергованої води в потоці повітря на осередок пожежі

Будемо вважати, що осередок пожежі знаходиться на деякій відстані від місця подачі розпиленої води і займає або частину площі поверхні каналу, або знаходиться на деякій відстані від стінок каналу. Так, при горінні деревини це може бути вся бічна поверхня каналу за винятком його ґрунту, а при горінні одного або декількох кабелів вся їх поверхня, рівна сумарному периметру кожного кабелю на довжину зони горіння.

Для опису впливу на осередок пожежі диспергованої води використовуємо [95] рівняння збереження теплоутримання суміші повітря з краплями рідини в одиниці об'єму осередку горіння і представимо його у вигляді

$$\rho \left[\frac{dh}{d\tau} + (h - h_0)Q/V \right] = q + \alpha \Pi (T_{cm} - T)/V, \quad (4.34)$$

де h – тепломісткість потоку суміші газів за осередком пожежі, Дж/кг;

h^0 – тепломісткість потоку суміші газів до осередку пожежі, Дж/кг;

$V = Sl$ – об'єм осередку горіння, м³;

l – довжина зони горіння, м;

S – площа поперечного перерізу каналу, м²;

Π – периметр поперечного перерізу каналу, м;

$Q = uS$ – розхід суміші газів, м³/с;

α – коефіцієнт теплообміну між стінками каналу і повітрям, Вт/(м²К);

T_{cm} – температура стінки каналу, К;

T – температура повітря, К;

q – інтенсивність теплового потоку з осередку пожежі, Вт/м³;

τ – час з моменту виникнення пожежі, с.

Тепломісткість вологого повітря знаходиться за формулою [103, 104]

$$h = [c_g + c_n U]T + rU, \quad (4.35)$$

де c_g і c_n – питомі теплоємності відповідно газу і пари, Дж/(кг·К)

U – вологовміст, що припадає на 1 кг сухого газу, кг/кг;

r – теплота пароутворення, Дж/кг.

Виразимо вологовміст повітря, як відношення вологи, що випаровується у вигляді пари до витрати повітря:

$$U = \frac{G_2}{G_1} \chi, \quad (4.36)$$

де G_2 – масова витрата рідини, кг/с;

G_1 – масова витрата повітря, кг/с;

χ – частка рідини, що випарувалася в осередку пожежі в залежності від температури.

Для визначення частки рідини, що випарувалася в осередку пожежі використовуємо рівняння переносу вологи без урахування дифузії [95] і отримаємо

$$u_2 \frac{dZ_2}{dx} = -(\gamma_1 + \gamma_2)Z_2, \quad (4.37)$$

де u_2 – швидкість переносу вологи, м/с;

Z_2 – концентрація вологи в потоці повітря, кг/м³;

γ_1 – показник швидкості випаровування вологи, 1/с;

γ_2 – показник швидкості осідання вологи на стінках каналу, 1/с.

Уявімо рівняння (4.37) в кінцевих різницях

$$u_2 \frac{Z_2 - Z_{20}}{\Delta x} = -(\gamma_1 + \gamma_2) Z_2, \quad (4.38)$$

звідки отримаємо формулу для розрахунку концентрації вологи в осередку пожежі

$$Z_2 = \frac{Z_{20}}{1 + (\gamma_1 + \gamma_2) \Delta x / u_2}. \quad (4.39)$$

У результаті частка вологи, що випарувалася може бути визначена за формулою

$$\chi = 1 - Z_2 / Z_{20} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{u_2 / \Delta x + \gamma_1 + \gamma_2}. \quad (4.40)$$

Показник швидкості випаровування вологи можна пов'язати з температурою повітря і діаметром крапель рідини залежністю

$$\gamma_1 = \frac{\beta \bar{T}}{d_k}, \quad (4.41)$$

де $\bar{T} = T / T_0 - 1$ – відносна температура в осередку;

d_k – діаметр крапель рідини, м;

β – емпірична константа, м/с.

Нехтуючи втратами крапель на стінках каналу в осередку пожежі ($\gamma_2 \approx 0$), приведемо формулу (4.40) до виду

$$\chi = 1 - Z_2 / Z_{20} = \frac{\bar{T}}{\bar{T} + Q d_k / (\beta V)}, \quad (4.42)$$

де $Q = u_2 S$ – витрата повітря через осередок пожежі, м³/с;

$V = \Delta x S$ – об'єм каналу з осередком пожежі, м³.

Порівняємо одержану аналітичну залежність (4.42) з емпіричною залежністю частки вологи що випаровується у водяній завісі за пожежею, наведеною в роботі [204]

$$\chi = \exp\left(-\frac{26d_k^2}{\bar{T}}\right). \quad (4.43)$$

Тут d_k – діаметр крапель води, мм.

Розрахунки за формулами (4.42) і (4.43) показують, що вони практично збігаються (рис.4.4) з похибкою всього до 5%, що говорить про велику достовірність отриманої аналітичної залежності (4.43).

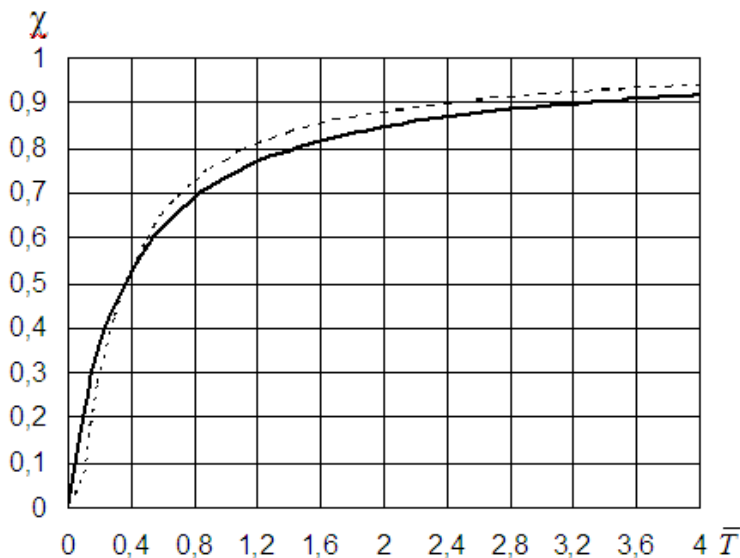


Рисунок 4.4. – Результати порівняння аналітичної залежності (4.42) (суцільна лінія) з емпіричної залежністю (4.43) (штрихова лінія) при середньому діаметрі крапель $dk = 0,1$ мм (100 мкм)

Перевага отриманої залежності (4.42) полягає в тому, що вона більш повно описує процеси випаровування вологи, вказуючи на те, що не тільки температура і діаметри крапель рідини впливають на випаровування, але також витрата повітря і об'єм зони горіння. Так, при збільшенні витрати повітря випаровування буде зменшуватися через швидке проскакування крапель через осередок пожежі, а при збільшенні об'єму осередку, навпаки, випаровування буде збільшуватися через більш довге перебування крапель в осередку пожежі.

Отримана залежність (4.42) може бути використана у формулі для ентальпії пожежних газів. Однак, оскільки процес теплогазообміну нестационарний, то більш правильно використовувати рівняння нестационарного переносу рідкої фази без урахування дифузії в одновимірному випадку:

$$\frac{\partial Z_2}{\partial \tau} + \frac{\partial(u_2 Z_2)}{\partial x} = -(\gamma_1 + \gamma_2) Z_2 . \quad (4.44)$$

Очевидно, при стаціонарному процесі приходимо до вже розглянутого рівняння (4.37). Наведемо рівняння (4.44) до безрозмірного вигляду, нехтуючи втратами крапель рідини при зіткненні зі стінками каналу ($\gamma_2 \approx 0$), і отримаємо

$$\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{\tau}} + \frac{\partial \bar{Z}}{\partial \bar{x}} = -\bar{\gamma}_1 \bar{T} \bar{Z} , \quad (4.45)$$

Де $\bar{Z} = Z_2 / Z_{20}$ – відносна концентрація рідкої фази – в потоці повітря;

$\bar{\tau} = u_2 \tau / l$ – безрозмірний час;

$\bar{x} = x / l$ – безрозмірна відстань;

$\bar{\gamma}_1 = \gamma_1 l / u_2$ – відносна швидкість випаровування вологи;

l – довжина частини ізольованого об'єму з осередком пожежі, м.

Розв'язок рівняння (4.45) будемо шукати чисельним методом за комбінованою схемою (явної і неявної з однаковою питомою вагою) і представимо його в кінцевих різницях

$$\frac{\bar{Z}_{n+1} - \bar{Z}_n}{\Delta \bar{\tau}} + (\bar{Z}_{n+1} + \bar{Z}_n) / 2 - 1 = -\bar{\gamma}_1 \bar{T}_n (\bar{Z}_{n+1} + \bar{Z}_n) / 2. \quad (4.46)$$

Тут прийнято $\Delta x = 1$. Позначимо безрозмірний час рівним числу Куранта

$$\Delta \bar{\tau} = Cu. \quad (4.47)$$

Розв'язуючи в цьому випадку рівняння (4.46) відносно концентрації рідкої фази на новому часовому шарі, отримаємо

$$\bar{Z}_{n+1} = \frac{[1 - Cu (1 + \bar{\gamma}_1 \bar{T}_n) / 2] \bar{Z}_n + Cu}{1 + Cu (1 + \bar{\gamma}_1 \bar{T}_n) / 2}. \quad (4.48)$$

Частина рідини, що випарувалася, на новому часовому шарі, визначається за формулою

$$\chi_{n+1} = 1 - \bar{Z}_{n+1}. \quad (4.49)$$

Відносна швидкість випаровування може бути визначена за формулою

$$\bar{\gamma}_1 = \beta l / (u_2 d_k). \quad (4.50)$$

Як уже відзначено, ентальпія пожежних газів згідно з (4.35) і (4.36) визначається за формулою

$$h = c_z T + (r + c_n T) \left[\frac{G_2 \chi}{G_1} \right]. \quad (4.51)$$

Підставляючи формулу (4.5) у рівняння (4.34) і, приймаючи з деяким наближенням похідну, будемо мати

$$\begin{aligned} \rho(c_e + c_n \frac{G_2 \chi}{G_1}) \frac{dT}{d\tau} + \rho[c_e(T - T_0) + (r + c_n T) \frac{G_2 \chi}{G_1}] Q/V = \\ = q + \alpha \Pi (T_{cm} - T)/V. \end{aligned} \quad (4.52)$$

З аналізу отриманого рівняння (4.52) випливає, що якщо частка вологи, яка випарувалася, мала ($\chi \approx 0$), то рівняння перетворюється в звичайне рівняння теплопровідності з джерелами теплоти і її стоку.

До рівняння (4.52) необхідно додати, як встановлено в розділі 2, ще й рівняння (2.21) нагрівання навколишніх порід каналу, яке в кінцевих різницях для правої частини перетворюється в рівняння (2.25), що дозволяє систему рівнянь (2.25) і (4.52) представити у вигляді

$$\begin{aligned} \rho(c_e + c_n \frac{G_2 \chi}{G_1}) \frac{dT}{d\tau} + \rho[c_e(T - T_0) + (r + c_n T) \frac{G_2 \chi}{G_1}] Q/V = \\ = q + \alpha \Pi (\theta - T)/2V; \\ \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{a}{2\Delta y^2} (T - \theta). \end{aligned} \quad (4.53)$$

Таким чином, отримані два диференціальних рівняння з двома невідомими функціями T і θ при заданих решта параметрах і відомої функціональної залежності χ від часу.

Як і в розділі 2, представимо рівняння (4.53) в безрозмірному вигляді

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{T}}{d\bar{\tau}} + \bar{T} &= [B\bar{C}\bar{q} + St(\bar{\theta} - \bar{T}) - \bar{r}U\chi]/(1 + U\chi); \\ \frac{d\bar{\theta}}{d\bar{\tau}} &= \frac{1}{Pe}(\bar{T} - \bar{\theta}),\end{aligned}\tag{4.54}$$

де $\bar{T} = T/T_0 - 1$ – безрозмірна температура пожежних газів;

$\bar{\theta} = \theta/T_0 - 1$ – безрозмірна температура навколишнього масиву;

$\bar{\tau} = Q\tau/V$ – безрозмірний час.

Крім того, в систему рівнянь (4.54) введені такі критерії подібності:

$Pe = 2Q\Delta y^2 / (AV)$ – температурне число Пекле в навколишньому масиві;

$St = \frac{\alpha\Pi}{2\rho c_p Q}$ – критерій Стантона теплообміну потоку

повітря з навколишнім масивом;

$B = \frac{37\chi\nu_0 FH_c}{\rho c_e T_0 Q}$ – критерій теплової енергії пожежі;

$\bar{r} = \frac{r + c_n T_0}{c_n T_0}$ – питома теплота пароутворення;

$U = \frac{c_n G_2}{c_e G_1}$ – відносна вологовмісткість.

Критерій B теплової енергії пожежі взятий з множником 37, щоб надалі не враховувати його як похідну в функції (2.45).

Застосуємо чисельний метод розв'язку системи рівнянь (4.54) за комбінованою схемою і представимо її у вигляді системи алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{\bar{T}_{n+1} - \bar{T}_n}{\Delta \bar{\tau}} + (\bar{T}_{n+1} + \bar{T}_n) / 2 = \\ = \{ B\bar{C}_n \bar{q}_n + St[\bar{\theta}_n - (\bar{T}_{n+1} + \bar{T}_n) / 2] - \bar{r}U\chi_n \} / [1 + U\chi_n]; \quad (4.55) \\ \frac{\bar{\theta}_{n+1} - \bar{\theta}_n}{\Delta \bar{\tau}} = \frac{1}{Pe} [\bar{T}_n - (\bar{\theta}_{n+1} + \bar{\theta}_n) / 2], \end{aligned}$$

Розв'язуючи рівняння (4.55) відносно температур на новому часовому шарі $(n + 1)$, з урахуванням того, що $\Delta \bar{\tau} = Cu$, отримаємо

$$\begin{aligned} \bar{T}_{n+1} = \frac{(1 - Cu/2)\bar{T}_n + Cu[B\bar{C}_n \bar{q}_n + St(\bar{\theta}_n - \bar{T}_n/2) - \bar{r}U\chi_n]/(1 + U\chi_n)}{1 + Cu/2 + CuSt/(1 + U\chi_n)/2}, \quad (4.56) \\ \bar{\theta}_{n+1} = \frac{(1 - Cu/2Pe)\bar{\theta}_n + Cu\bar{T}_n/2Pe}{1 + Cu/2Pe}. \end{aligned}$$

Рівняння вирішуються спільно з першим рівнянням (3.69) для концентрації кисню, а також спільно з рівнянням (4.46), які в цілому утворюють систему

$$\begin{aligned} \bar{C}_{n+1} = \frac{[1 - (1 + AB\bar{q}_n)Cu/2]\bar{C}_n + Cu}{1 + (1 + AB\bar{q}_n)Cu/2}; \\ \chi_{n+1} = 1 - \frac{[1 - Cu(1 + \bar{\gamma}_1\bar{T}_n)/2](1 - \chi_n) + Cu}{1 + Cu(1 + \bar{\gamma}_1\bar{T}_n)/2} \\ \bar{T}_{n+1} = \frac{\{1 - Cu/2\}\bar{T}_n + Cu[B\bar{C}_n \bar{q}_n + St(\bar{\theta}_n - \bar{T}_n/2) - \bar{r}U\chi_n]/(1 + U\chi_n)}{1 + Cu/2 + CuSt/(1 + U\chi_n)/2}; \\ \bar{\theta}_{n+1} = \frac{(1 - Cu/2Pe)\bar{\theta}_n + Cu\bar{T}_n/2Pe}{1 + Cu/2Pe}. \end{aligned} \quad (4.57)$$

До системи рівнянь (4.57) необхідно додати функцію інтенсивності теплового потоку з осередку пожежі [97] в безрозмірному вигляді на кожному часовому шарі

$$\bar{q}_n = (n/n_m)^{3,6} \exp(-3,6n/n_m), \quad (4.58)$$

де n – кількість кроків, відповідно поточному часу τ ;

n_m – кількість кроків, відповідне часу τ_m максимального тепловиділення, які при числі Куранта $Cu = 0,5$ рівні

$$n = 2u\tau/l; \quad n_m = 2u\tau_m/l. \quad (4.59)$$

При моделюванні розвитку і гасіння пожежі ще враховувалося вплив води на палаючу поверхню твердого матеріалу, збиваючи полум'я, приводячи до зволоження поверхні і припиненню піролізу на деякій її частині.

Таким чином, в залежності від часу гасіння пожежі дисперговою водою частину поверхні горючого матеріалу зменшується до деякої величини. Якщо припустити, що швидкість зміни площі поверхні пропорційна цій же площі і витраті рідини на кілограм горючого матеріалу, то можна записати:

$$F'(\tau) = -\delta G_2 F / M. \quad (4.60)$$

Інтегруючи рівняння (4.60) з початковою умовою $F(0) = F_0$, отримаємо

$$\begin{cases} F = F_0 & \text{при } \tau < \tau_1; \\ F = F_0 \exp[-\delta G_2 (\tau - \tau_2) / M] & \text{при } \tau_1 < \tau < \tau_2; \\ F = F_0 \exp[-\delta G_2 (\tau_1 - \tau_2) / M] & \text{при } \tau > \tau_2 \end{cases} \quad (4.61)$$

де F_0 – початкова площа поверхні горючого матеріалу, m^2 ;

δ – емпірична константа;

M – загальна маса горючого матеріалу, kg ;

τ_1 і τ_2 – час відповідно початку і кінця гасіння пожежі, xv .

Відносна площа, що змінюється в часі палаючої поверхні повинна включатися в критерій B теплової енергії пожежі.

4.4. Експериментальні дослідження гасіння пожеж дисперговою водою і встановлення адекватності математичної моделі натурному об'єкту

Експериментальні дослідження гасіння пожеж дисперговою водою проводилися в лабораторних умовах в камері, опис якої дано у другому розділі. На рис. 4.5 і 4.6 представлені результати вимірювань динаміки в часі температури в камері при гасінні кабельної продукції дисперговою водою.

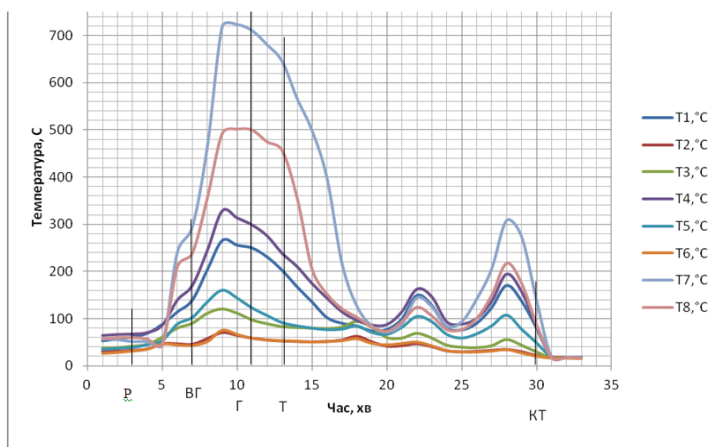


Рисунок 4.5. – Динаміка в часі температури в камері при гасінні кабельної продукції дисперсною водою при інтенсивності її подачі $0,01 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ протягом 2 хв

В камеру, як звичайно, завантажено 5 кг кабельної ізоляції з алюмінієвими провідниками масою 2,7 кг. Розпалювання 4 хвилини до температури 300°C , при увімкненій припливній вентиляції, що забезпечує притік

повітря $0,0235 \text{ м}^3/\text{с}$. Вільне горіння протягом 4 хв при працюючій припливній вентиляції з витратою $0,047 \text{ м}^3/\text{с}$. Гасіння проводиться при досягненні температури 700°С . Подача тонкорозпиленої води при інтенсивності її подачі $0,01 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ протягом 4 хвилин 15 секунд, до зникнення полуменевого горіння. Струмінь розпиленої води спрямований перпендикулярно до кабельної лінії, на відстані $0,5 \text{ м}$ від кабельної лінії, при працюючій припливній вентиляції і притоком повітря $0,0235 \text{ м}^3/\text{с}$. Після гасіння спостерігалось тління. Тління припинилося через 16 хвилин після закінчення гасіння, але ще спостерігались спалахи на 20 і 25 хвилинах.

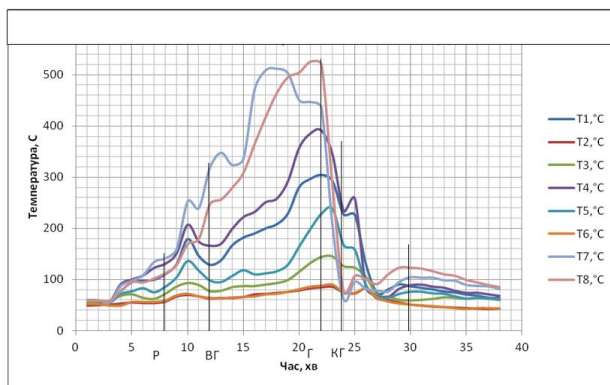


Рисунок 4.6. – Динаміка температури в часі при гасінні кабельної продукції в камері дисперсною водою при інтенсивності її подачі $0,06 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ протягом 2 хв

В камеру і на цей раз завантажено 5 кг кабельної ізоляції з алюмінієвими провідниками масою $2,7 \text{ кг}$. Розпалювання 4 хвилини до температури 300°С , при увімкненій припливній вентиляції, що забезпечує притік повітря $0,0235 \text{ м}^3/\text{с}$. Вільне горіння протягом 10 хв при працюючій припливній вентиляції з витратою $0,047 \text{ м}^3/\text{с}$, в камері температура 520°С і не зростає. Гасіння проводиться при досягненні температури 700°С . Подача тонкорозпиленої води протягом 2 хвилини, до зникнення

полуменевого горіння, інтенсивність подачі $0,06 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$. Струмінь розпиленої води направлений перпендикулярно до кабельної лінії, на відстані $0,5 \text{ м}$ від кабельної лінії, при працюючій припливній вентиляції і притоком повітря $0,0235 \text{ м}^3/\text{с}$. Після гасіння спостерігалось тління. Тління припинилося через 6 хвилин після закінчення гасіння і не було спалахів через те, що інтенсивність подачі води значно вища.

На підставі експериментальних даних випливає, що при малій інтенсивності подачі води до $0,06 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ і за проміжок часу менше 2 хвилини можливі повторні займання кабельної продукції.

На рис. 4.7 і 4.8 представлені результати порівняння розрахункових та експериментальних даних динаміки в часі максимальної температури пожежних газів при гасінні кабельної продукції в камері дисперсною водою з різною інтенсивністю її подачі.

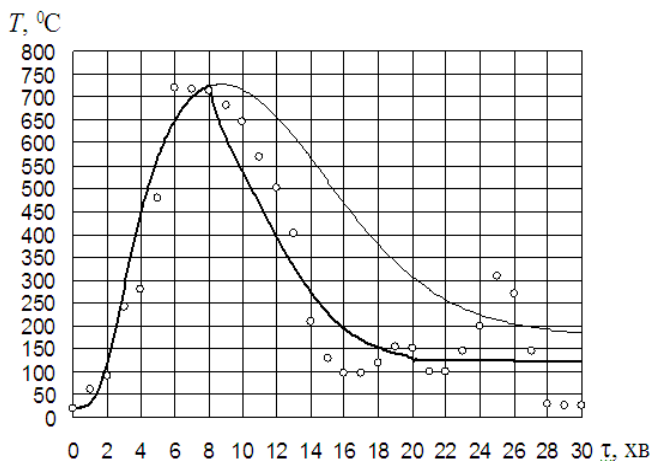


Рисунок 4.7. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних динаміки температури пожежних газів при гасінні кабельної продукції дисперсною водою з інтенсивністю її подачі $0,01 \text{ кг}/(\text{см}^2)$ протягом 4 хв (маркери – експериментальні дані відповідно до рис. 4.9, жирна лінія – розрахункові дані при подачі води, тонка лінія – розрахункові дані без подачі води)

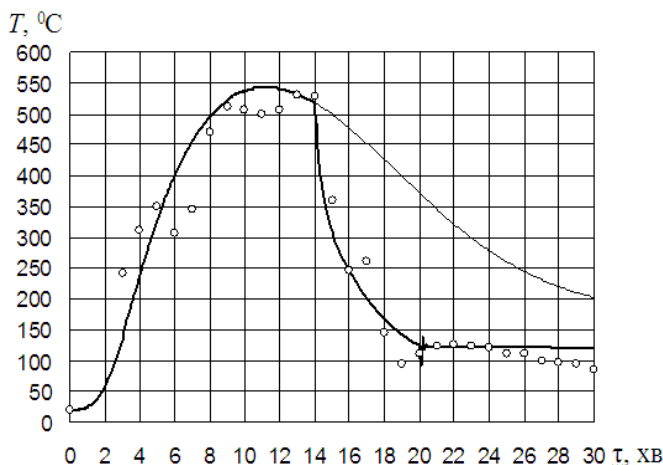


Рисунок 4.8. – Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних динаміки температури пожежних газів при гасінні кабельної продукції дисперсною водою з інтенсивністю її подачі $0,06 \text{ кг} / (\text{см}^2)$ протягом 2 хв (маркери – експериментальні дані відповідно до рис. 4.10, жирна лінія – розрахункові дані при подачі води, тонка – розрахункові дані без подачі води)

При математичному моделюванні і в першому і в другому експериментах приймалися: $A = 0,02$; $B = 700$; $Pe = 500$. У той же час число Стантона коливається від 6 до 8, а коефіцієнт зменшення палаючої поверхні, як встановлено, знаходиться в межах $\delta = 1,5 - 2,5$.

Результати порівняння розрахункових та експериментальних даних вказують на адекватність розробленої математичної моделі гасіння дрібномасштабних пожеж дисперсною водою.

Таким чином, експерименти в лабораторних умовах і в математичній моделі показали, що гасіння пожежі дисперсною водою дає позитивні результати при безпосередній подачі води з великою інтенсивністю на осередок. Звідси випливає, що гасіння осередку горіння дисперсною водою, як і при великомасштабних пожежах, повинно проводитися з близької

відстані і тривалий час до зниження температури 100 °С і нижче. При цьому для ефективності гасіння пожежі необхідний попередній розрахунок параметрів подачі дисперсної води на осередок.

Висновки

1. Розв'язана задача динаміки дрібно розпилених крапель рідини в потоці повітря, горизонтально розташованого провітрюваного каналу. При цьому враховано такі фактори: сили гравітації, ступінь диспергування рідини (діаметри крапель) і кут розкриття факела. Використаний двочленний закон аеродинамічного опору руху крапель у всій області ламінарних, турбулентних та проміжних режимів їх руху.

2. Отримано аналітичні залежності поздовжньої і поперечної складових швидкості руху крапель рідини в потоці повітря, а також визначені координати розташування крапель в просторі, що дозволяють встановити дальність їхнього польоту і величину зони покриття осередку пожежі. Як показали результати порівняння розрахункових та експериментальних даних дальності польоту, вони знаходяться в повній відповідності.

3. Розроблено математичну модель гасіння пожежі дисперговою водою з використанням рівнянь теплообміну крапель рідини з пожежними газами і стінками каналу, а також рівнянь переносу концентрацій кисню та вологи з урахуванням швидкості випаровування крапель води від температури. Результати чисельного моделювання показали, що подача диспергової води на осередок пожежі істотним чином впливає на його гасіння завдяки тепловіддачі на випаровування вологи і зменшення кисню, що витісняється паром.

4. Встановлено, що збільшення витрати води зменшує не тільки температуру пожежних газів, але й зону полум'яного горіння. Зі зменшенням довжини зони горіння рідина майже

повністю переходить в пару, тобто в газоподібний стан, що є флегматизуючою дією на осередок пожежі.

5. Встановлено, в результаті експериментальних досліджень в лабораторних умовах і методом математичного моделювання, що у слабо провітрюваних каналах (кабельних тунелях) дисперговану воду необхідно подавати в безпосередній близькості від осередку пожежі з інтенсивністю не менше $0,05 \text{ кг} / (\text{с} \cdot \text{м}^2)$ протягом до 10 хв.

РОЗДІЛ 5

ДИНАМІКА І ХАРАКТЕР ВПЛИВУ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ ПАРОГАЗОВИХ ПОТОКІВ (ІНЕРТНИХ ГАЗІВ) В КАНАЛАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ

5.1. Розробка математичної моделі динаміки парогазових сумішей та інертних газів і їхнього впливу на осередок пожежі в каналах значної протяжності

Суміші повітря з парою або інертним газом (азотом) є однофазними двокомпонентними потоками. Великий вміст пари або інертного газу в потоці повітря дозволяє знизити концентрацію кисню і обірвати ланцюги хімічних реакцій. Якщо під час руху інертного газу з повітрям відсутні їх втрати по довжині каналу, то під час руху парогазової суміші відбувається конденсація пари у вигляді утворення окремих крапель рідини, а найголовніше – конденсація пари на холодних стінках каналу. У результаті цього концентрація кисню в потоці може значно перевищувати вогнегасну концентрацію 10%, і гасіння пожежі стане неефективним.

Таким чином, незважаючи на наявність [102,105,106] численних оригінальних технічних рішень, при створенні газогенеруючих модулів, залишаються до кінця невивченими питання теоретичного плану стосовно динаміки високотемпературних потоків з їх вологонасиченням і охолодженням, за умов використання парогазових сумішей з різним вмістом кисню для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки.

Зважаючи на це, ставиться завдання щодо дослідження процесів перенесення вологонасичених високотемпературних потоків інертного газу в довгих каналах, їх впливу на осередок пожежі з урахуванням факторів, які раніше не бралися до уваги. Такими факторами є: 1) наявність в потоці

повітря двокомпонентної безперервної фази (газ + пара), 2) утворення, хоч і несуттєве, крапель рідини при конденсації пари в повітрі і її конденсація на холодних стінках каналу; 3) наявність теплообміну із зовнішнім середовищем, коли процес стає не адіабатичним.

Про специфічну особливість даного двокомпонентного середовища свідчить таке: якщо рідину можна вважати такою, що не стискається, то газ і пара при великих температурах поведуться як рідина, що має здатність стискатися.

Як відомо [95], рівняння нерозривності потоку в цілому (парогазової суміші) можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = -f, \quad (5.1)$$

де ρ – густина суміші, кг/м³;

u – швидкість потоку суміші, м/с;

f – втрати маси при конденсації пари на стінках каналу, (с·м³);

τ – час із моменту подачі парогазової суміші до каналу, с;

x – координата в напрямку руху потоку, м.

Потік складається з двох компонентів: 1 – повітря і 2 – пари. Зважаючи на це, кожному компоненту будемо розглядати окремо. Надамо вищевказані індекси тим параметрам, до компоненти яких вони належать, при цьому знехтуємо наявністю ще однієї фази – крапель рідини, через їх малу кількість.

Кожна компонента в перерізі потоку буде займати певну його частину, яку аналогічно (4.2) назвемо питомим вмістом компоненти:

$$\varepsilon_i = S_i / S, \quad (5.2)$$

де S_i – частина площі перерізу каналу, займана i -ю компонентою, м².

Рівняння нерозривності (6.1) розпадається на два рівняння для кожної компоненти з урахуванням конденсації пари:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varepsilon_1 \rho_1}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon_1 \rho_1 u_1}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial \varepsilon_2 \rho_2}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon_2 \rho_2 u_2}{\partial x} &= -f.\end{aligned}\quad (5.3)$$

Якщо відома частка повітря в потоці парогазової суміші, то першим рівнянням системи (6.3) можна не користуватися, так як в сумі:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1. \quad (5.4)$$

Прийmemo, що швидкості пари і повітря однакові ($u_1 = u_2 = u$), тоді друге рівняння системи набуде вигляду:

$$\frac{\partial \varepsilon_2 \rho_2}{\partial \tau} + u \frac{\partial \varepsilon_2 \rho_2}{\partial x} = -f. \quad (5.5)$$

При однаковій температурі пари і повітря в їх суміші ($T_1 = T_2 = T$) рівняння збереження теплової енергії потоку парогазової суміші (пара і повітря) з урахуванням теплообміну зі стінками каналу можна представити у вигляді [90,95]:

$$\frac{\partial (c\rho T)}{\partial \tau} + u \frac{\partial (c\rho T)}{\partial x} = -q, \quad (5.6)$$

де c – питома теплоємність парогазової суміші при постійному тиску, Дж/(кг·К);

ρ – щільність парогазової суміші, кг/м³;

T – температура парогазової суміші, К;

q – кількість теплоти, що втрачається парогазовою сумішшю при обміні з навколишнім середовищем, Вт/м³.

Кількість теплоти, що втрачається при теплообміні з навколишнім середовищем, можна визначити, використовуючи закон Ньютона [94]:

$$q = \frac{\alpha_0 \Pi}{S} (T - T_0), \quad (5.7)$$

де α_0 – коефіцієнт тепловіддачі зовнішньому середовищу, Вт/(К·м²);

Π – периметр поперечного перерізу каналу, м;

T_0 – температура стінок каналу, К.

Підставляючи формулу (6.7) до рівняння (6.6), отримаємо:

$$\frac{\partial(c\rho T)}{\partial \tau} + u \frac{\partial(c\rho T)}{\partial x} = \frac{\alpha_0 \Pi}{S} (T_0 - T). \quad (5.8)$$

У роботах [102, 126] запропоновані різні залежності для розрахунку швидкості фазових переходів, зокрема при конденсації пари на стінках каналу. Найбільш прийнятною, на нашу думку, є формула, яка враховує випаровування рідини і конденсацію її пари, у разі якщо той чи інший процес має місце. Цю формулу представимо аналогічно (4.6), при цьому замість діаметра крапель підставимо в неї приведений діаметр поперечного перерізу каналу:

$$D = \frac{4S}{\Pi}, \quad (5.9)$$

а за температуру T_1 приймемо температуру стінок каналу T_0 , в результаті чого замість (4.6) отримаємо:

$$f = \frac{3\Pi\delta_2\beta_2P}{2S(2\pi RT_0)^{1/2}} [1 - (T_0/T)^{1/2}]. \quad (5.10)$$

В розділі 4 показано, що функція, яка стоїть у квадратних дужках, з достатнім ступенем точності може бути представлена у вигляді лінійної залежності:

$$1 - (T_0 / T)^{1/2} \approx 0,25(T / T_0 - 1), \quad (5.11)$$

що дозволяє замість формули (5.10) використовувати:

$$f = \frac{0,375 \Pi \varepsilon_2 \beta P}{S (2\pi R T_0)^{1/2}} (T / T_0 - 1). \quad (5.12)$$

Із формули (5.12) випливає: чим вища температура пари і повітря, в порівнянні з температурою стінок каналу, і чим менше наведений діаметр поперечного перерізу каналу, тим інтенсивніше відбуватиметься конденсація пари.

Оскільки ряд параметрів, що входять до формули, є константами, представимо формулу (5.12) у вигляді:

$$f = \frac{e \varepsilon_2 \Pi}{S} (T / T_0 - 1), \quad (5.13)$$

де $e = \frac{0,375 \beta P}{(2\pi R T_0)^{1/2}}$ – емпірична константа швидкості

конденсації пари на стінках каналу відповідно до параметрів, що входять до формули (5.12), кг/(с·м²).

Підставляючи (5.13) в рівняння (5.5), матимемо:

$$\frac{\partial \varepsilon_2 \rho_2}{\partial \tau} + u \frac{\partial \varepsilon_2 \rho_2}{\partial x} = \frac{e \varepsilon_2 \Pi}{S} (T / T_0 - 1). \quad (5.14)$$

Представимо рівняння (5.8) і (5.14) в безрозмірному вигляді та складемо систему:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} &= -\frac{\alpha \Pi}{c \rho S} \bar{T}; \\ \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial \tau} + u \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial x} &= -\frac{e \Pi}{\rho_2 S} \varepsilon_2 \bar{T}, \end{aligned} \quad (5.15)$$

де $\bar{T} = T / T_0 - 1$ – безрозмірна температура.

Отриманої системи диференціальних рівнянь (5.15) з початковими і граничними умовами

$$\begin{aligned}\bar{T}(x,0) &= 0; \quad \bar{T}(0,\tau) = \bar{T}_1; \\ \varepsilon_2(x,0) &= 0; \quad \varepsilon_2(0,\tau) = \varepsilon_0.\end{aligned}\tag{5.16}$$

цілком достатньо для розв'язання поставленого завдання щодо перенесення до осередку пожежі парогазових потоків із урахуванням конденсації пари на стінках каналу і охолодження потоку.

Тут $\bar{T}_1$ – відносна температура в місці подачі парогазової суміші до ізолюваного об'єму;

ε_0 – об'ємна частка пари в місці подачі парогазової суміші в ізолюваний об'єм.

Обмежуючись однією зоною до осередку пожежі, представимо, з урахуванням умов (5.16), систему рівнянь (5.15) у вигляді:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + u \frac{\bar{T} - \bar{T}_1}{\Delta x} &= - \frac{\alpha \Pi}{c \rho S} \bar{T}; \\ \frac{\partial \varepsilon_2}{\partial \tau} + u \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_0}{\Delta x} &= - \frac{e \Pi}{\rho_2 S} \varepsilon_2 \bar{T}.\end{aligned}\tag{5.17}$$

Розв'язок першого рівняння системи (5.17) можна представити у вигляді експоненційної залежності [146]:

$$\bar{T}(\tau) = \frac{\bar{T}_1}{1 + \frac{\alpha \Pi L}{c \rho Q}} \{1 - \exp[-(\frac{\alpha \Pi}{c \rho S} + Q/V_1)\tau]\}, \tag{5.18}$$

де $L = \Delta x$ – довжина зони до осередку пожежі, м;

$V_1 = SL$ – ізолюваний об'єм, м³.

Концентрація кисню в парогазовій суміші може бути визначена за формулою:

$$Z = \frac{\varepsilon_1 C_0}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (5.19)$$

Звідки, згідно з (6.4), отримаємо:

$$\bar{Z} = 1 - \varepsilon_2, \quad (5.20)$$

де $\bar{Z} = Z / C_0$ – відносна концентрація кисню.

Використовуючи залежність (5.20), друге рівняння (5.17) приведемо до вигляду:

$$\frac{\partial \bar{Z}}{\partial \tau} + u \frac{\bar{Z} - \bar{Z}_0}{\Delta x} = \frac{e\Pi}{\rho_2 S} (1 - \bar{Z}) \bar{T}. \quad (5.21)$$

Розв'язок рівняння (5.21) будемо шукати для середньої температури парогазової суміші на шляху до осередку пожежі. Середню температуру можна знайти як середньоінтегральну за час подачі парогазової суміші, використовуючи формулу (5.18). Тоді розв'язок рівняння (5.21) також можна отримати у вигляді експоненційної залежності:

$$\bar{Z}(\tau) = \bar{Z}_\infty + (1 - \bar{Z}_\infty) \exp\left[-\left(\frac{e\Pi\bar{T}_c}{\rho_2 S} + Q/V_1\right)\tau\right], \quad (5.22)$$

де гранична концентрація кисню в парогазовій суміші визначається за формулою:

$$\bar{Z}_\infty = \frac{e\bar{T}_c\Pi/(\rho_2 S) + \bar{Z}_0 Q/V_1}{e\bar{T}_c\Pi/(\rho_2 S) + Q/V_1}, \quad (5.23)$$

де V_1 – ізолюваний об'єм, м³.

Таким чином, можна за формулами (5.18), (5.22) і (5.23), можна визначити як змінюється вміст кисню перед осередком пожежі під час подачі парогазової суміші ($\tau_1 < \tau < \tau_2$). Аналіз

рівняння (6.22) і формули (5.23) показує, що зміна концентрації кисню в часі в зоні перед осередком пожежі відбуватиметься завдяки надходженню до цього обсягу парогазової суміші або інертного газу протягом певного проміжку часу.

В осередку пожежі вплив парогазової суміші на інтенсивність горіння буде полягати в тому, що пара, як і інертний газ, залежно від його кількості в потоці повітря, буде зменшувати концентрацію кисню і переривати в тій чи іншій мірі ланцюги хімічних реакцій.

У цьому випадку можна використовувати систему рівнянь (2.38), яку, як і раніше, доцільно розв'язувати за найбільш точною комбінованою схемою (явною і неявною з однаковою питомою вагою). В результаті, отримаємо систему рівнянь (3.69) для комбінованої схеми:

$$\begin{aligned}\bar{C}_m^{n+1} &= \frac{[1 - (Cu + \bar{q}_m^n)/2]\bar{C}_m^n + CuZ_m^n}{1 + (Cu + \bar{q}_m^n)/2}; \\ \bar{T}_m^{n+1} &= \frac{[1 - (Cu + St)/2]\bar{T}_m^n + St\bar{\theta}_m^n + B\bar{q}_m^n(\bar{C}_m^n + \bar{C}_m^{n+1})/2}{1 + (Cu + St)/2}; \\ \bar{\theta}_m^{n+1} &= \frac{(1 - \bar{a}_2/2)\bar{\theta}_m^n + \bar{a}_2\bar{T}_m^n}{1 + \bar{a}_2/2}.\end{aligned}\quad (5.24)$$

Тут параметр $\bar{Z}_m^n$ означає відносну концентрацію кисню перед осередком пожежі на даному часовому шарі, яка може бути визначена для кожного часового шару за формулою (6.22).

Таким чином, отримана система рівнянь (5.24) і аналітичні залежності (5.18) і (5.22) дозволяють моделювати процеси горіння і гасіння пожежі як під час застосування парогазової суміші або інертних газів, так і до та після їх застосування.

5.2. Моделювання динаміки парогазових потоків і їхнього впливу на осередок пожежі в каналах значної протяжності

Будемо розглядати динамічний процес заповнення ізолюваного обсягу парогазової сумішшю. З цією метою представимо формулу (5.18), що описує зміну в часі температури в зоні перед осередком пожежі, в критеріальному вигляді:

$$\frac{T(\bar{\tau}) - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{1}{1 + St} \{1 - \exp[-(1 + St)\bar{\tau}]\}, \quad (5.25)$$

де $St = \frac{\alpha PL}{c\rho_2 Q}$ – критерій Стантона теплообміну зі стінками каналу;

$\bar{\tau} = \frac{Q\tau}{V_1}$ – кратність обміну парогазової суміші в аналізованому об'ємі.

На рис. 5.1 представлені результати моделювання динаміки температури в часі в міру заповнення ізолюваного об'єму парогазовою сумішшю.

З аналізу отриманих результатів випливає, що температура в зоні перед осередком пожежі буде зростати в міру заповнення ізолюваного об'єму парогазовою сумішшю. Однак чим більшим буде число Стантона (довший канал і менша витрата повітря), тим інтенсивніше охолоджуватиметься парогазова суміш, що надходить до осередку пожежі.

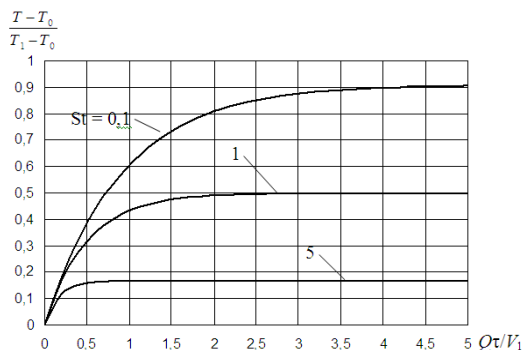


Рисунок 5.1. – Динаміка в часі температури в зоні перед осередком пожежі

Для зручності моделювання представимо формулу (5.22) також в критеріальному вигляді:

$$\bar{Z}(\tau) = \frac{KSt + \bar{Z}_0}{KSt + 1} + \left(1 - \frac{KSt + \bar{Z}_0}{KSt + 1}\right) \exp[-(KSt + 1)\bar{\tau}], \quad (5.26)$$

де $K = \frac{ec\bar{T}_c}{\alpha}$ – критерій інтенсивності конденсації пари на стінках каналу.

На рис. 5.2 представлені результати моделювання динаміки кисню в часі перед осередком пожежі в міру заповнення ізолюваного об'єму парогазовою сумішшю.

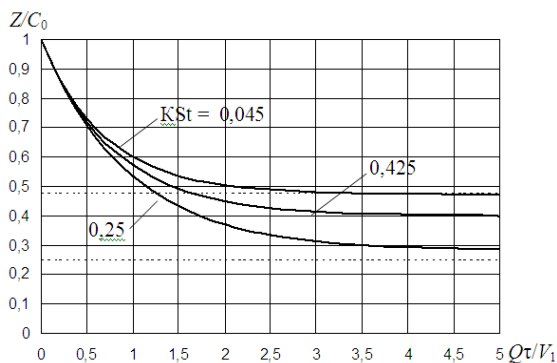


Рисунок 5.2. – Динаміка в часі концентрації кисню в зоні перед осередком пожежі при заповненні ізолюваного об'єму парогазовою сумішшю (штрихові лінії відповідають значенням концентрації кисню 5 і 10%)

При моделюванні прийнято, що початкова температура парогазової суміші $T_1 = 300$ °С, що дозволяє визначити, згідно рис. 5.1, середні температури і, задавши параметр $K=1$ при $\bar{T}_c=1$, отримати значення параметрів K залежно від середньої температури парогазової суміші. Їхній вплив на числа Стантона представлено на рис. 5.2.

З аналізу отриманих результатів випливає, що однократного обміну парогазової суміші в ізольованому об'ємі явно недостатньо, щоб знизити концентрацію кисню в зоні перед осередком пожежі, хоча б до 10%, при заданій початковій концентрації в суміші – 5%.

Виконаємо математичне моделювання гасіння пожежі парогазовою сумішшю або інертним газом, максимально наблизившись до натурального об'єкту – кабельного тунелю. Нехай довжина ізольованого об'єму становить $L = 40$ м, а площа поперечного перерізу каналу $S = 4$ м². Пожежа відбувається у протилежному від місця гасіння стінки із зоною горіння довжиною $l = 5$ м. Час настання максимальної температури горіння $\tau_m = 20$ хв. До гасіння пожежі парогазовою сумішшю з концентрацією кисню 5% і з витратою $Q = 1$ м³/с приступили через 20 хв після її виникнення та ліквідували пожежу через 30 хв.

На рис. 5.3 і 5.4 представлені результати чисельного моделювання, за формулами (5.24) та (5.26), розвитку й гасіння пожежі парогазовою сумішшю.

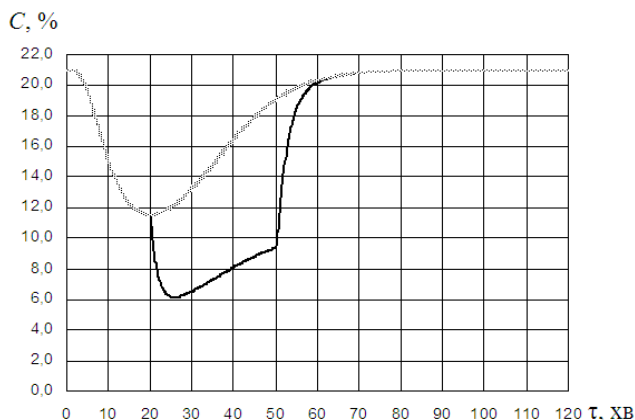


Рисунок 5.3. – Динаміка зміни в часі концентрації кисню в осередку пожежі при його розвитку (штрихова лінія) і при гасінні парогазовою сумішшю (жирна лінія)

Аналіз, отриманих результатів показує, що під час розвитку пожежі концентрація кисню знижувалася до 12% і потім повільно в міру загасання пожежі поверталася до свого початкового рівня – 21%. Через 3 хв від початку гасіння пожежі парогазовою сумішшю концентрація кисню знизилася до 6%, після чого поступово почала зростати до 9%, і лише після припинення гасіння повернулася (протягом 10 хв) до початкового рівня – 21%.

Як видно з рис. 5.4, розвиток пожежі триває 20 хв, після чого, протягом години, температура повільно знижується до 140 °С, і потім вже майже не змінюється. У той же час, під час гасіння пожежі відбувається різке зниження температури до 150 °С, а згодом і до 100 °С.

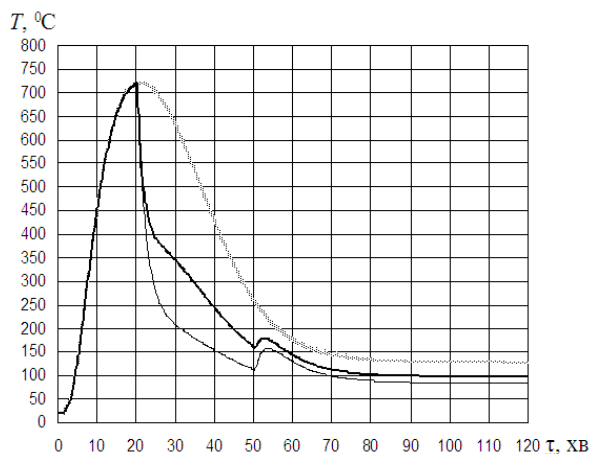


Рисунок 5.4. – Динаміка зміни в часі температури в осередку пожежі під час її розвитку (штрихова лінія), при гасінні парогазовою сумішшю (жирна лінія) і при гасінні 5-ти відсотковим інертним газом (тонка лінія)

За результатами подальшого моделювання гасіння пожежі інертним газом, більш помітний ефект щодо гасіння і зниження температури спостерігався на 70-й хвилині до – 100 $^{\circ}\text{C}$, а згодом і нижче. Це пояснюється тим, що парогазова суміш частково втрачає пару, через її конденсацію на стінках, а інертний газ – ні.

Таким чином, результати математичного моделювання гасіння пожеж парогазовою сумішшю та інертними газами довели її спроможність достовірно відтворювати всі особливості процесів горіння та гасіння.

5.3. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі гасіння пожеж парогазовою сумішшю

Експериментальні дослідження щодо транспортування парогазової суміші до осередку пожежі довгими каналами проводилися в полігонних умовах. Завданнями експериментальних досліджень руху парогазової суміші були:

- визначення втрат пари на шляху руху до передбачуваного осередку пожежі;

- визначення температури і концентрації кисню в різних точках каналу;
- перевірка адекватності математичної моделі натурному об'єкту.

Для проведення експериментальних досліджень щодо транспортування парогазової суміші використовувалася установка пожежогасіння АГВГ-100 з камерою охолодження і трубопровід довжиною 100 м, який прокладався з вентиляційних труб діаметром 0,6 м, з'єднаних між собою хомутами. Схема експериментальної установки транспортування парогазової суміші наведена на рис. 6.5.

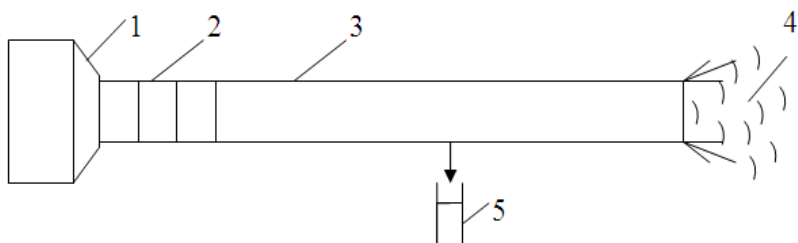


Рисунок 6.5. – Схема експериментальної установки транспортування парогазової суміші:

- 1 – установка АГВГ-100, 2 – трисекційна камера охолодження водою,
- 3 – вентиляційний трубопровід, 4 – вихід парогазової суміші;
- 5 – водозбірник

Через кожні 10 м у вентиляційному трубопроводі проводилися вимірювання швидкості руху парогазової суміші трубками Піто, там же встановлювалися газоаналізатори кисню і термопари для визначення температури потоку суміші.

При зіткненні парогазової суміші, котра має високу температуру, з холодними стінками каналу частина пари конденсується на стінках і збирається в нижній частині каналу, що дозволяє збирати конденсат в водозбірник. Оскільки конденсація пари охоплює весь об'єм парогазової

суміші, то прихована теплота конденсації нагріває суміш, і її температура повинна підвищуватися. У табл. 5.1 наведені результати вимірювань параметрів парогазової суміші в різних перетинах каналу.

Таблиця 5.1

**Результати вимірювань параметрів парогазової
суміші по довжині каналу**

Відстань, м	Температура з конденсацією, К	Температура без конденсації, К	Витрата парогазової суміші, кг/с	Концентрація кисню, %
10	358	350	36,8	3,7
20	381	351	36,4	3,8
30	380	352	36,0	3,95
40	393	348	35,8	4,0
50	382	344	35,6	4,1
60	377	340	35,5	4,3
70	375	343	35,4	4,6
80	374	345	35,3	4,8
90	376	340	35,1	4,85
100	375	342	34,9	4,91

Як показують дані спостережень (табл. 5.1), температура парогазової суміші без конденсації пари весь час знижується по довжині каналу, хоча і незначною мірою, всього на 8 градусів. У той же час, при конденсації пари температура до 40-го метра різко збільшується, на 35 градусів, а потім знижується – на 18 градусів. Таким чином, встановити закономірність зміни температури по довжині каналу досить важко. Отже, для розрахунку концентрації кисню з достатнім ступенем точності можна приймати початкову температуру.

У той же час, як показують дані спостережень (табл. 5.1), витрата парогазової суміші весь час знижується через конденсацію пари, а концентрація кисню неухильно підвищується.

Для встановлення адекватності розробленої математичної моделі отримана аналітична залежність (5.23) очікуваної концентрації кисню набула вигляду:

$$\bar{Z}_{\infty} = \frac{e\bar{T}_c \Pi L / G + \bar{Z}_0}{e\bar{T}_c \Pi L / G + 1}. \quad (5.27)$$

Тут прийнято $G = \rho_2 Q$ – витрата (кг/с) парогазової суміші, оскільки містить незначну кількість повітря.

На рис 5.6 представлені результати порівняння аналітичної залежності (5.27) з експериментальними даними таблиці 5.1, які підтверджують адекватність математичної моделі натурному об'єкту.

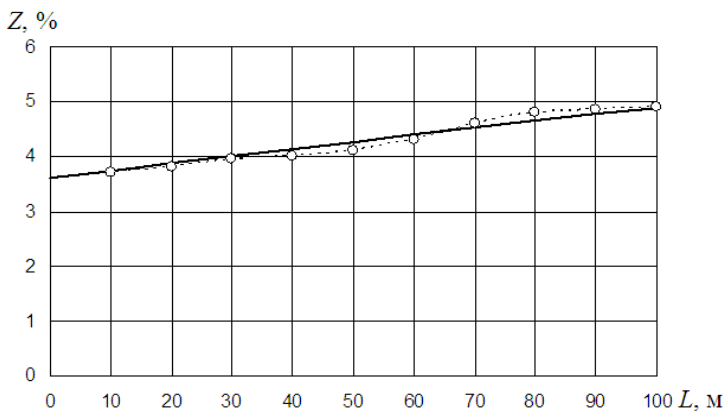


Рисунок 5.6. – Розрахункові (суцільна лінія) і експериментальні (кружечки) дані залежності концентрації кисню від довжини каналу

Обробка розрахункових та експериментальних даних із похибкою не більше 3-х відсотків показала, що емпірична константа швидкості випаровування $e = 0,062$ кг/(с·м²). Це дозволяє достатньо точно прогнозувати рівень очікуваної концентрації кисню в зоні перед осередком пожежі, що надходить до потоку парогазової суміші.

Експериментальні дослідження впливу парогазової суміші безпосередньо на осередок пожежі проводилися в лабораторних умовах в тій самій камері. Для отримання пари використовувався парогенератор, представлений на рис. 5.7.

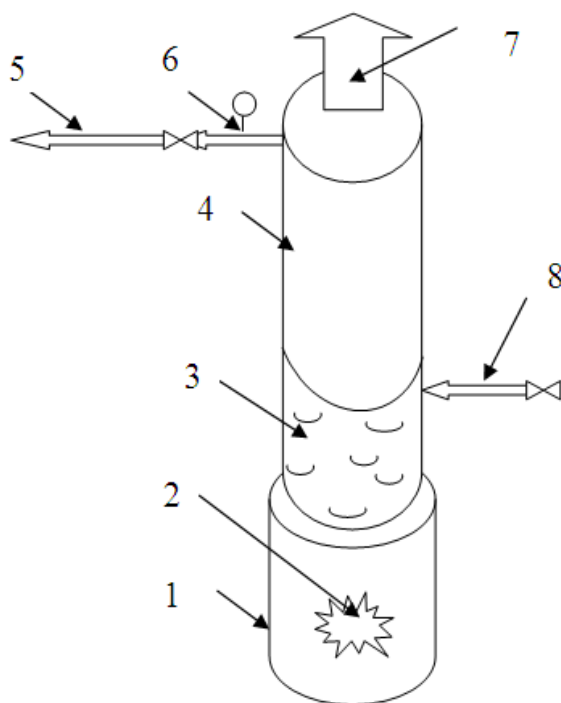


Рисунок 5.7. – Схема парогенератора:

- 1 – камера спалювання, 2 – тверде паливо, 3 – вода;
4 – парогенератор, 5 – трубопровід із запірним краном з насадкою для подачі пари;
6 – трубопровід з манометром для контролю тиску пари;
7 – димар; 8 – трубопровід для наповнення парогенератора водою

Парогенератор вертикальний на твердому паливі (деревина) ємністю 60 л заправлявся водою (18-20 л) та розігрівався за 35-40 хв до температури 140-145 °С, що відповідало тиску 3,5 кг/см². Насадка у вигляді трубки із внутрішнім діаметром 5 мм встановлена на запірному крані,

паропровід – гумовотканевий із внутрішнім діаметром 14 мм та довжиною 2 м. Продуктивність: приблизно 5 - 6,2 л/с пари (4 - 5 гр/с води за масою).

Під час проведення першого досліду без рециркуляції було використано 4,84 кг горючої ізоляції (гумова + пластикова ізоляція маслonaповненого кабелю) з металевими провідниками кабелю.

Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря становила $F_{\text{отв.}} = 0,0358 \text{ м}^2$. Об'єм камери (модуля) становив $0,5 \text{ м}^3$.

Тривалість розпалювання – 2 хв після усунення джерела запалювання. На 6 хвилині від початку досліду температура досягала 740 - 750 °С.

На момент подачі пари відключалась витяжна вентиляція, без проведення герметизації камери.

На 6-й хвилині з початку горіння подавали пару. Тривалість подачі становила 4,5 хв. Після подачі пари 4,9 – 6,2 л/с (витрата – 4-5 г/с H_2O , під тиском 3,5-3,0 кг/см², що відповідало температурі води ~130 °С) горіння кабелів припинялось, але внаслідок осипання обвугленої маси гумової ізоляції на дні камери тривало її тління, на окремих ділянках спостерігалось короткочасне полуменеве горіння. Маса залишків ізоляції, що не вигоріла, становила 1,3 кг. Динаміка температури показана на рис. 5.8.

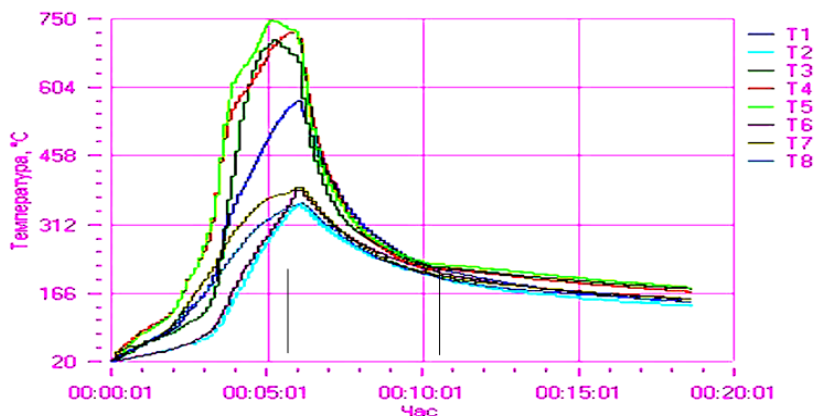


Рисунок 5.8. – Динаміка температури в осередку пожежі під час її гасіння парою в першому експерименті протягом 4,5 хв

На рис. 5.9 наведено результати чисельного моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю для умов першого експерименту.

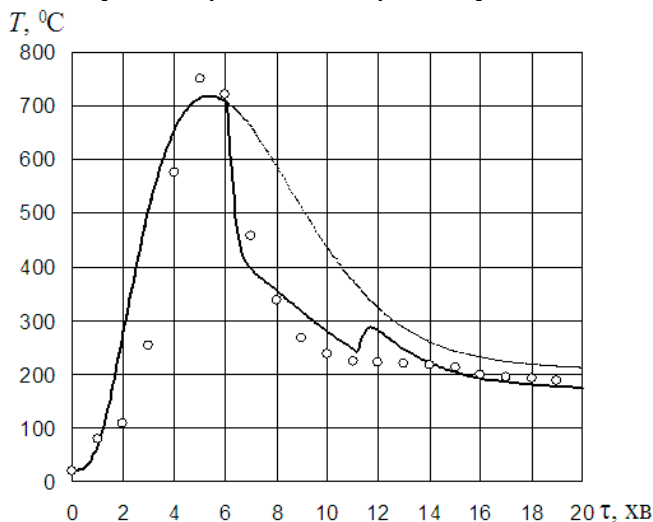


Рисунок 5.9. – Результати моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю (тонка лінія – без пари, жирна лінія – із застосуванням пари, кружечки – експериментальні дані)

Порівняння розрахункових і експериментальних даних показує, що вони задовільно узгоджуються між собою за таких вихідних даних ($A = 0,02$; $B = 500$; $St = 3,5$; $Fo = a_2 \Delta \tau / \Delta r^2 = 0,0005$).

На рис. 5.10 наведені результати моделювання динаміки в часі концентрацій кисню для умов першого експерименту.

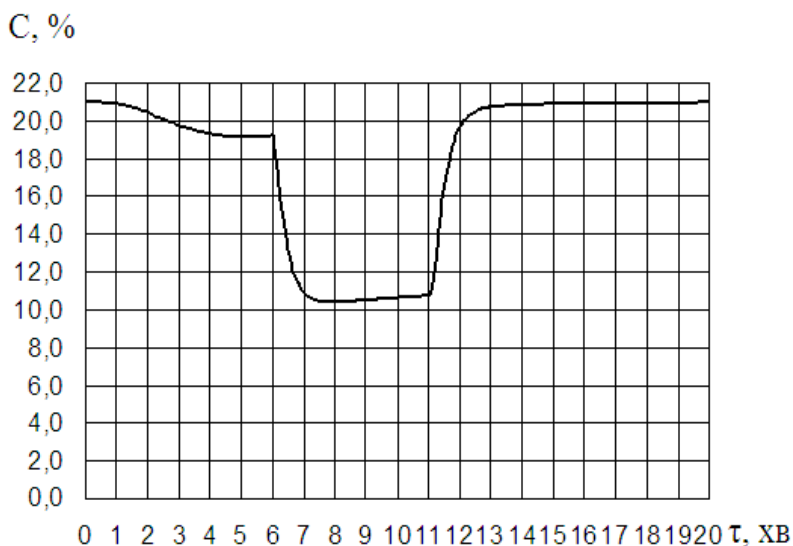


Рисунок 5.10. – Динаміка в часі концентрацій кисню для умов першого експерименту під час розвитку і гасінні пожежі парогазовою сумішшю

Порівняння даних моделювання з експериментальними показує, що до гасіння пожежі концентрація кисню знижувалася з 21 до 19%, а під час гасінні парогазовою сумішшю зниження кисню тривало до 10%, що відповідає концентрації кисню в суміші. Припинення подачі пари призводить до швидкого повернення значень концентрації до початкового рівня.

Для проведення дослід у другому експерименті було використано (гумова + пластикова ізоляція маслонаповненого кабелю) горючу ізоляцію масою 4,39 кг, з

металевими провідниками кабелю. Площа отворів для підсмоктування повітря – $F_{\text{отв}} = 0,03585 \text{ м}^2$.

Тривалість розпалювання – 2 хв після усунення джерела запалювання. На 6 хвилині від початку досліду, температура сягала 760-770 °С.

У даному досліді, на момент подачі пари, працювала витяжна вентиляція і за цих умов виникали вибухові спалахи продуктів деструкції кабелю та його неповного згоряння, внаслідок підсмоктування кисню повітря та високої температури в зоні горіння. Динаміка температури у другому експерименті показана на рис.5.11.

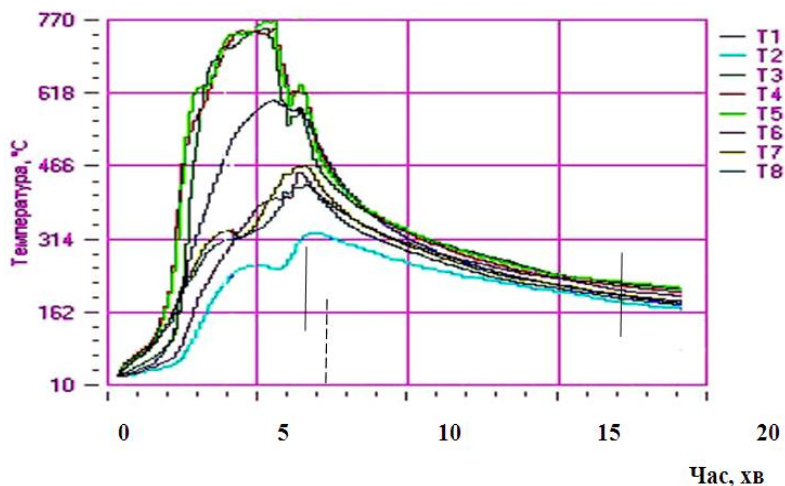


Рисунок 5.11. – Зміна температур під час досліду щодо гасіння парою на 6-й хв протягом 10-ти хв: – період подачі пари; – момент відключення витяжної вентиляції

Після припинення швидкого надходження свіжого повітря і заповнення камери парою зі швидкістю 4,9-6,2 л/с (4-5 г(H_2O)/с) протягом 10 хв відбувався процес локалізації горіння та поступового зниження температури до 180-186 °С.

Упродовж 10 хвилин подавання пари відбувалося охолодження камери і температура знижувалася до 200 °С.

Зниження температури до 100 °С відбувалось за 90 хв від початку гасіння.

На рис. 5.12 наведені результати моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю для умов другого експерименту.

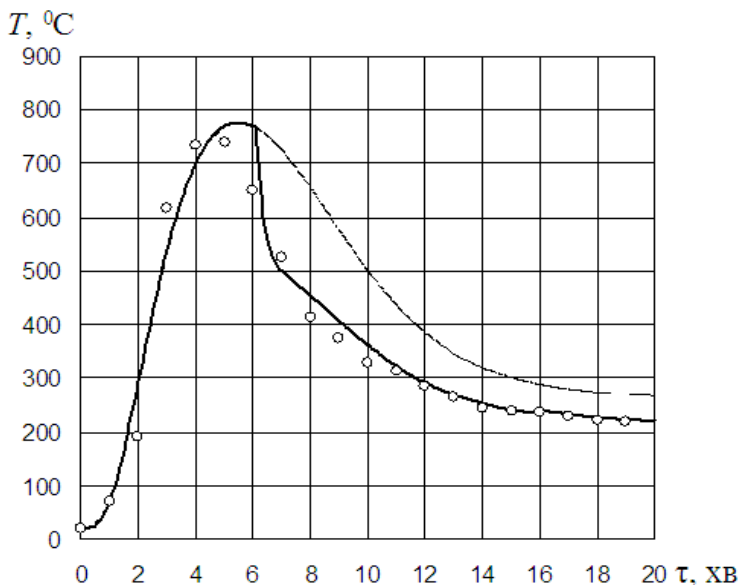


Рисунок 5.12. – Результати моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю (тонка лінія – без пари, жирна лінія – із застосуванням пари, кружечки – експериментальні дані)

Порівняння розрахункових і експериментальних даних показує, що вони задовільно узгоджуються між собою за наступних вихідних даних: $A = 0,02$; $B = 500$; $St = 3,5$; $Fo = 0,0006$, які майже не відрізняються від даних першого експерименту.

На рис. 5.13 наведені результати моделювання динаміки в часі концентрацій кисню для умов другого експерименту.

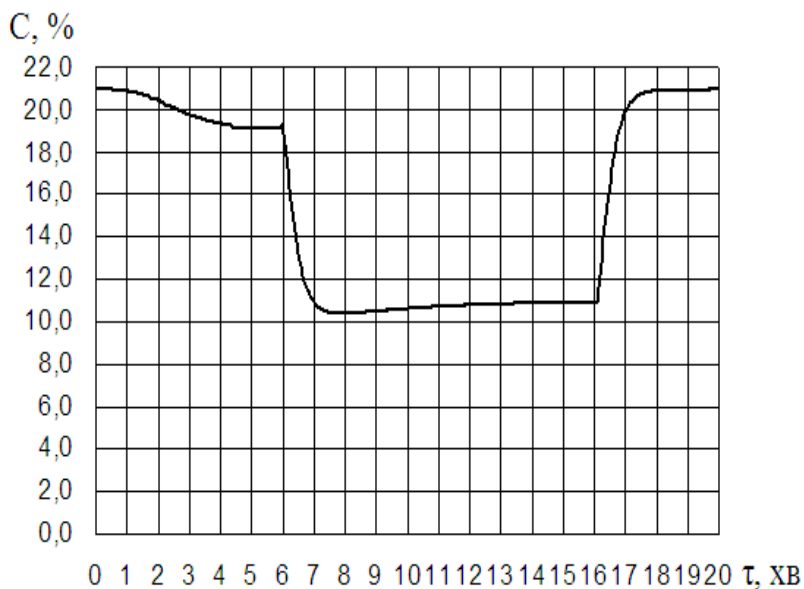


Рисунок 5.13. – Динаміка в часі концентрацій кисню для умов другого експерименту під час розвитку і гасінні пожежі парогазовою сумішшю

Порівняння даних моделювання з експериментальними показує, що, незважаючи на тривале гасіння пожежі парогазовою сумішшю, показники концентрації кисню залишаються незмінними. До гасіння пожежі концентрація кисню знижувалася з 21 до 19%. Проте під час гасінні пожежі парогазовою сумішшю зниження концентрації кисню сягало 10%, що відповідає концентрації кисню в суміші. Припинення подачі пари також призводить також до швидкого повернення концентрації до початкового рівень.

Таким чином, встановлена залежність концентрації кисню в продуктах згоряння від температури в камері та тривалості горіння. Чим вища температура горіння, тим менша концентрація кисню. Після подачі пари до камери

припиняється полуменеве горіння, відбувається «скачок» у бік збільшення концентрації кисню з подальшим поступовим її наближенням до вмісту в чистому повітрі, в міру охолодження вмісту камери.

У результаті виконаних експериментальних досліджень у полігонних та лабораторних умовах неодноразово було доведено адекватність розробленої математичної моделі натурному об'єкту. Результати досліджень викладені в наступних публікаціях [178-183].

Висновки

1. Розроблено математичну модель транспортування парогазової суміші в каналах будь-якої протяжності при конденсації пари на стінках, що дозволяє визначити очікувану концентрацію кисню в зоні перед осередком пожежі залежно від початкової кількості пари і витрати суміші газів.

2. Встановлено за результатами математичного моделювання та даними експериментальних досліджень у полігонних умовах, що втрати пари і зростання концентрації кисню в парогазовій суміші безперервно збільшуються та можуть становити 25% і більше. Крім того, вони різко зростають при великому градієнті температур між стінками каналу і потоком парогазової суміші.

3. Розроблено математичну модель впливу на осередок пожежі парогазової суміші, в основу якої покладено ефект інертизації атмосфери ізольованого об'єму через низьких концентрацій кисню та її динаміку в часі в зоні перед осередком пожежі і, безпосередньо, в осередку. Розроблена модель може бути використана також при застосуванні інертних газів для гасіння пожеж. У таких випадках очікується ще більш значний ефект, що

пов'язано з відсутністю втрат під час транспортування даного засобу гасіння.

4. Встановлено за результатами математичного моделювання гасіння пожежі парогазовою сумішшю, що при застосуванні даного засобу відбувається спочатку різке зниження концентрації кисню в зоні перед осередком пожежі, а потім і в осередку. Температура також різко знижується до 100 – 200 °С і утримується на цьому рівні тривалий час.

5. Проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах гасіння пожеж парою в суміші з повітрям, які повністю підтвердили адекватність математичної моделі натурному об'єкту. Встановлено, що до гасіння пожежі концентрація кисню знижується всього на 2%, а при подачі пари до осередку – знижується до 10%, перериваючи полуменеве горіння. Однак, незважаючи на зниження температури в осередку до 100 – 200 °С, вона ще довго, як і в математичній моделі, утримується на зазначеному рівні і лише через 1,5 години стає нижчою за 100 °С, що пояснюється тривалим охолодженням стінок камери та алюмінієвих провідників.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА І ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СПОСОБУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ІНЕРТНОЮ ПІНОЮ, ЩО УТВОРЕНА НА ОСНОВІ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ В РЕЦИРКУЛЬОВАНОМУ ПОТОЦІ ГАЗІВ

6.1. Розробка математичної моделі щодо утворення і динаміки інертної піни до осередку пожежі разом із продуктами згоряння

Використання пожежних газів разом із піною для гасіння пожеж на об'єктах значної протяжності (каналах різного призначення, кабельних тунелях, гірничих виробках тощо) є найбільш ефективним засобом впливу на осередок горіння. Це пояснюється з тим, що, з одного боку, подається суміш газів, збіднена киснем, а, з іншого — піна, котра завдяки високій вологості і випаровуванню знижує температуру в зоні горіння.

Однак складні процеси тепломасообміну в двофазних потоках вимагають глибокого вивчення. Так охолоджуюча здатність піни значною мірою залежить від режиму її руху до осередку пожежі та в зоні горіння. Не тільки режим руху піни визначає дальність її подачі, а також витрата піни, її стійкість та площа поперечного перерізу каналу.

При отриманні піни на основі пожежних газів не всі гази беруть участь в її утворенні, проходячи через сітку. Крім того, частина піни під час руху руйнується, і газ, який вивільняється, змішується з потоком повітря, збідненим киснем. У результаті, на об'єкті значної протяжності утворюються два потоки: пінний і газовий (рис. 6.1).

Організувати подачу піни на основі пожежних газів можна таким чином (рис. 6.1.): перед ізольованим відсіком каналу встановлюється піногенератор, тут же розміщується всмоктуючий вентилятор, який через трубопровід відбирає

пожежні гази з ізолюваного об'єму і нагнітає їх до піногенератора, куди (одночасно) на сітку подається піноутворююча рідина. Отримана піна потрапляє до каналу і рухається до осередку горіння, інтенсивно витісняючи повітря разом з пожежними газами, що там знаходяться. В результаті утворюються два потоки до осередку горіння: пінний потік і пожежні гази під покрівлею і потім по трубопроводу до вентилятора.

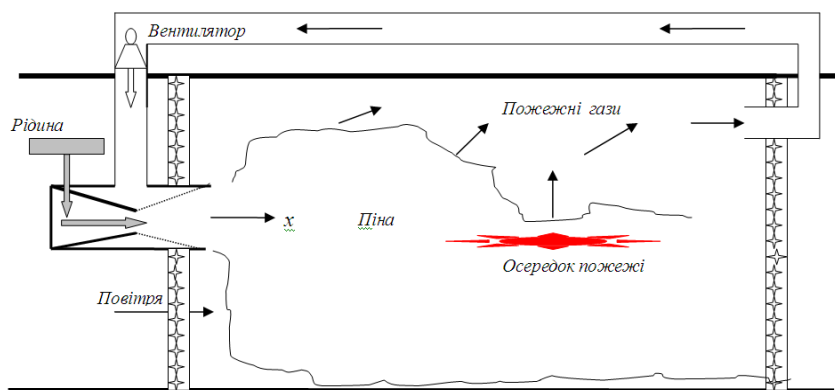


Рисунок 6.1. – Схема впливу на осередок горіння піною на основі пожежних газів в ізолюваному об'ємі каналу

Очевидно, чим вище буде розташована труба, тим ефективніше вентилятором відбиратимуться пожежні гази. Якщо пожежні гази на шляху до піногенератора не встигають охолонути, то для утворення стійкої піни необхідно їх пропускати через камеру охолодження, або вибирати місце для їх відбирання з температурою не вище $70 - 80^{\circ}\text{C}$.

Досліджуючи тепломасообмінні процеси в ізолюваному каналі із замкнутим контуром провітрювання розглянемо і дослідимо вплив концентрації кисню на осередок пожежі і визначимо ефективність комплексного

впливу на осередок пожежі продуктів згорання та, отриманої на їх основі, газомеханічної піни.

Для практичного застосування отриманих залежностей необхідно знати такі параметри, як:

- початкова кратність піни K_0 при її генеруванні з використанням пожежних газів з високою температурою;
- час її закінчення τ_{i3} ;
- дальність l_1 поширення піни або час «життя» $\tau_{жс}$ в залежності від швидкості руху пожежних газів

Таким чином, метою подальших досліджень є експериментальне вивчення і перевірка достовірності отриманих залежностей при генеруванні піни та рух пінного потоку в каналах.

6.2. Дослідження впливу вмісту кисню на осередок пожежі при рециркуляції продуктів згорання в ізольованому об'ємі

Досліджуючи комплексний вплив на осередок горіння піни і пожежних газів необхідно, насамперед, розглянути вплив на нього пожежних газів. У ряді робіт [97, 99, 132-141] при вивченні динаміки температури в осередку пожежі, зазвичай, не беруть до уваги залежність джерела горіння від концентрації кисню, що надходить на осередку потоку повітря. Проте така залежність при горінні різних матеріалів, як уже було доведено в другому розділі, існує. Так, інтенсивність джерела тепловиділення під час пожеж можна прийняти відповідно до аналітичної залежності (2.8) або експериментальної залежності (2.74).

Для описання динаміки кисню в замкненому контурі при рециркуляції використовуємо перше рівняння системи (2.30):

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - qC_0 / (H_c \rho_k). \quad (6.1)$$

Приймемо зональну модель газообміну в контурі рециркуляції. Одна зона – осередок пожежі, інша – решта ізолюваного об'єму поза осередком.

Представимо, як і раніше, рівняння (6.1) в кінцевих різницях по просторовій координаті, нехтуючи дифузією в порівнянні з конвекцією повітря, й отримаємо:

$$\frac{dC}{d\tau} + u \frac{\Delta C}{\Delta x} = -qC_0 / (H_c \rho_k). \quad (6.2)$$

Приймемо кінцеве припущення рівним довжині зони горіння $\Delta x = l$, тоді об'єм зони горіння буде дорівнювати $V = Sl$, а різниця концентрацій кисню – $\Delta C = C - Z$. У результаті матимемо:

$$V \frac{dC}{d\tau} = (Z - C)Q - qVC_0 / (H_c \rho_k), \quad (6.3)$$

де Z – концентрація кисню поза зоною горіння, об. частки;
 S – площа поперечного перерізу каналу, м².

За межами зони горіння використовуємо ще одне рівняння (3.70):

$$V_1 \frac{dZ}{d\tau} = -(Z - C)Q + (C_0 - C)Q_1, \quad (6.4)$$

де V_1 – об'єм зони за межами осередку пожежі, м³;
 Q – витрата пожежних газів, м³/с;
 Q_1 – підсоси повітря, м³/с.

Аналіз рівняння (6.4) показує, що при відсутності підсосів ($Q_1 = 0$), утворюється повністю замкнутий контур, а при $Q_1 = Q$ контур повністю розімкнений. Це дає можливість

моделювати в двох зонах динаміку кисню за часом в широкому діапазоні.

Введемо число Куранта

$$Cu = \frac{u\Delta\tau}{\Delta x} = \frac{Q\Delta\tau}{S\Delta x}, \quad (6.5)$$

Тоді, об'єднуючи рівняння (6.3) і (6.4) в систему, одержимо в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{C}}{d\bar{\tau}} &= \bar{Z} - \bar{C} - AB\bar{C}\bar{q}; \\ \bar{V}_1 \frac{d\bar{Z}}{d\bar{\tau}} &= \bar{C} - \bar{Z} + (1 - \bar{C})\bar{Q}_1, \end{aligned} \quad (6.6)$$

де $\bar{C} = C/C_0$ – безрозмірна концентрація кисню в зоні горіння;

$\bar{Z} = Z/C_0$ – безрозмірна концентрація кисню поза зоною горіння;

$\bar{Q}_1 = Q_1/Q$ – відносні підсоси повітря до ізолюваного об'єму;

$\bar{V}_1 = V_1/V$ – відношення об'ємів зон;

$\bar{\tau} = Q\tau/V$ – безрозмірний час.

Інші параметри A і B ті ж, що і в першому рівнянні (2.30), а функція інтенсивності джерела горіння може бути прийнята як у вигляді експоненти (останнє рівняння в системі (2.36)), так і емпіричної залежності (2.74), яка більш краща, тому що враховує розгорання твердого палива.

Застосуємо чисельний метод розв'язання системи рівнянь (6.6) за комбінованою схемою і представимо її у вигляді системи алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{(\bar{C}_{n+1} - \bar{C}_n)}{\Delta \bar{\tau}} &= \bar{Z}_n - (1 + AB\bar{q}_n)(\bar{C}_{n+1} + \bar{C}_n)/2; \\ \bar{V}_1 \frac{(\bar{Z}_{n+1} - \bar{Z}_n)}{\Delta \bar{\tau}} &= \bar{C}_n - (\bar{Z}_{n+1} + \bar{Z}_n)/2 + (1 - \bar{C}_n)\bar{Q}_1, \end{aligned} \quad (6.7)$$

де $\Delta \bar{\tau} = Q\Delta\tau/V = Cu$ – число Куранта.

Розв'язуючи рівняння (6.7) щодо концентрацій на новому часовому шарі, одержимо:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{n+1} &= \frac{[1 - (1 + AB\bar{q}_n)Cu/2]\bar{C}_n + Cu\bar{Z}_n}{1 + (1 + AB\bar{q}_n)Cu/2}; \\ \bar{Z}_{n+1} &= \frac{(\bar{V}_1 - Cu/2)\bar{Z}_n + [\bar{Q}_1 + (1 - \bar{Q}_1)\bar{C}_n]Cu}{\bar{V}_1 + Cu/2}. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Функція інтенсивності джерела горіння, що входить до першого рівняння системи (6.8), в кінцевих різницях набуде, як і (4.115), вигляду:

$$\bar{q}_n = (n/n_m)^{3,6} \exp(-3,6n/n_m), \quad (6.9)$$

де n_m – номер ітерації, що відповідає часу максимуму тепловиділення і визначається за формулою:

$$n_m = \frac{60Q\tau_m}{CuV}, \quad (6.10)$$

де τ_m – час максимуму інтенсивності теплового потоку в зоні горіння, хв.

На період рециркуляції приймаємо $Q_1 < Q$, а без рециркуляції $Q_1 = Q$.

На рис. 6.2 представлені результати моделювання динаміки кисню в зоні горіння без рециркуляції і з рециркуляцією.

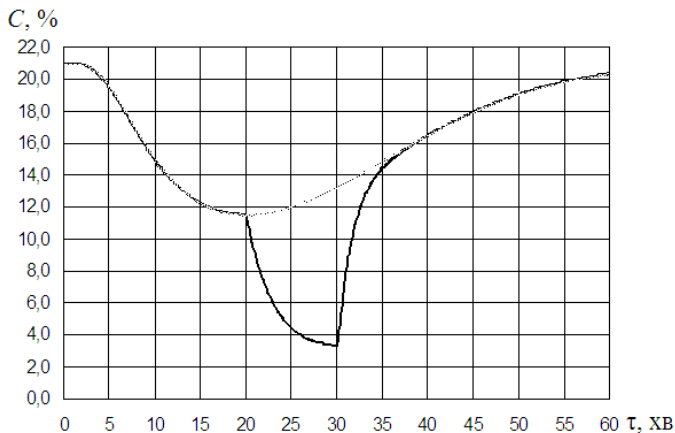


Рисунок 6.2. – Результати моделювання динаміки кисню в зоні горіння без рециркуляції (штрихова лінія) і при рециркуляції (суцільна лінія)

Розрахунки виконані за часом виходу теплового потоку на максимум через $\tau_m = 20$ хв і часом рециркуляції пожежних газів $\tau_p = 10$ хв. Інші параметри прийняті рівними: $A = 0,02$; $B = 1500$; $Cu = 0,5$; $V_1/V = 10$; $Q_1/Q = 0,1$.

Як показують результати моделювання (рис. 6.4), концентрація кисню в зоні горіння знизилася до 12%, після чого повільно відновлювалася в результаті вигорання твердого палива. У той же час перед зоною горіння концентрація кисню не змінювалася і залишалася на рівні 21%. Вмикання рециркуляції на 20-й хвилині і 30-й хвилині призвело до різкого зниження кисню в зоні горіння до 3%.

Розроблений більш детально чисельний метод впливу на осередок пожежі за допомогою рециркуляції дозволяє прогнозувати ефективність впливу на осередок пожежі і визначати оптимальні параметри рециркулюючого потоку газів.

Якщо встановлено низьку ефективність гасіння пожеж методом рециркуляції в протяжних об'єктах, коли об'єм зони з високою концентрацією кисню, набагато більший за об'єм зони горіння ($V_I \gg V$), то варто здійснити комплексний вплив на осередок не тільки продуктами згоряння, але порошком, піною або іншими засобами пожежогасіння.

6.3. Комплексний вплив на осередок пожежі продуктів згоряння і отриманої на їх основі газомеханічної піни

Вплив на осередок пожежі піни схожий з впливом на нього диспергованої води. Так піна, руйнуючись в осередку пожежі, утворює ту ж крапельну рідину, яка випаровується, охолоджуючи його, і зменшує частину поверхні горючого матеріалу, зволожуючи його і перериваючи процеси піролізу. Знаючи кратність піни перед осередком пожежі, можна визначити розміри крапель рідини, що утворюються.

Виразимо вологовміст повітря через кратність піни і частку рідини, що випаровується в осередку пожежі:

$$U = \frac{\rho_{ж} Q_{ж}}{\rho Q} \chi \approx \frac{\rho_{ж} \chi}{\rho K}, \quad (6.11)$$

де χ – частка рідини, що випаровується в осередку пожежі в залежності від температури в осередку пожежі.

Припустимо, що в процесі руйнування піни в осередку пожежі утворюються краплі рідини, які при цьому випаровуються. Середній діаметр такої краплі визначимо зі співвідношення, що представляє собою кратність піни:

$$K = \frac{\pi d_n^3 / 6}{\pi d_k^3 / 6}, \quad (6.12)$$

звідси знайдемо діаметр крапель рідини при руйнуванні піни:

$$d_k = d_n / \sqrt[3]{K}. \quad (6.13)$$

де d_n – діаметр бульбашок піни, мм.

Розрахунки за формулою (6.13) показують, що при середньому діаметрі бульбашок 1 мм, діаметри крапель рідини, що утворюються, будуть рівні 0,2 мм і 0,1 мм при кратності піни, відповідно, 100 і 1000. Частка рідини, що випаровується, згідно з (6.1), складе при цьому 64% і 90%, якщо прийняти температуру в осередку пожежі рівною 700 °С. Це свідчить про високу ефективність пінного засобу пожежогасіння.

Кратність піни K , що входить у формулу, повинна задаватися на підході до осередку.

Таким чином, визначивши розміри крапель рідини при руйнуванні піни, повністю повертаємося до попередньої задачі тепломасообміну під час гасіння пожеж дисперговою водою, чисельне розв’язання якої можна отримати через розв’язання системи рівнянь (4.114) і (4.16). У цьому випадку, отримуємо опис процесів гасіння пожежі піною без рециркуляції пожежних газів.

Для опису комплексного впливу на осередок пожеж піни, отриманої на основі продуктів згоряння і їх рециркуляції, використовуємо рівняння (6.8) і систему рівнянь (4.114) без першого рівняння, які представляємо у вигляді:

– для концентрацій кисню в зоні горіння і за її межами

$$\begin{aligned} \bar{C}_{n+1} &= \frac{[1 - (1 + AB\bar{q}_n)Cu / 2]\bar{C}_n + Cu\bar{Z}_n}{1 + (1 + AB\bar{q}_n)Cu / 2}; \\ \bar{Z}_{n+1} &= \frac{(\bar{V}_1 - Cu / 2)\bar{Z}_n + [\bar{Q}_1 + (1 - \bar{Q}_1)\bar{C}_n]Cu}{\bar{V}_1 + Cu / 2}, \end{aligned} \quad (6.14)$$

– для температури в осередку пожежі та навколишньому масиві

$$\begin{aligned}\bar{T}_{n+1} &= \frac{\{1 - Cu/2\}\bar{T}_n + Cu[B\bar{C}_n\bar{q}_n + St(\bar{\theta}_n - \bar{T}_n/2) - \bar{r}U\bar{\chi}_n]/(1 + U\bar{\chi}_n)}{1 + Cu/2 + CuSt/(1 + U\bar{\chi}_n)/2}, \\ \bar{\theta}_{n+1} &= \frac{(1 - Cu/2Pe)\bar{\theta}_n + Cu\bar{T}_n/2Pe}{1 + Cu/2Pe}\end{aligned}\quad (6.15)$$

з урахуванням функції тепловиділення в зоні горіння:

$$\bar{q}_n = (n/n_m)^{3,6} \exp(-3,6n/n_m), \quad (6.16)$$

з урахуванням частки випаровування крапель рідини:

$$\bar{\chi}_{n+1} = 1 - \frac{[1 - Cu(1 + \bar{\gamma}_1\bar{T}_n)/2](1 - \bar{\chi}_n) + Cu}{1 + Cu(1 + \bar{\gamma}_1\bar{T}_n)/2} \quad (6.17)$$

і частки, що змінюється в часі поверхні горючого матеріалу

$$\begin{cases} F = F_0 & \text{ї дє } \tau < \tau_1; \\ F = F_0 \exp[-\delta G_2(\tau - \tau_2)/M] & \text{ї дє } \tau_1 < \tau < \tau_2; \\ F = F_0 \exp[-\delta G_2(\tau_1 - \tau_2)/M] & \text{ї дє } \tau > \tau_2. \end{cases} \quad (6.18)$$

Подача піни здійснюється разом із рециркуляцією, починаючи із заданого часу τ_1 від початку гасіння пожежі і до закінчення часу τ_2 гасіння, що відповідає в математичній моделі часам ітераційного процесу, та визначається за формулою (6.10) й дорівнює кількості ітерацій n_1 і n_2 .

Отримана система рівнянь (6.14) – (6.18) дозволяє моделювати динаміку концентрацій кисню і температур, як під час виникнення пожежі та її загасання, так і в разі впливу на пожежу піни та продуктів згоряння.

На рис. 6.3 представлені результати моделювання динаміки температури в осередку пожежі при її виникненні, загасанні та ізоляції з рециркуляцією за тих же вихідних

даних, що представлені на рис. 6.4, але при підсосах повітря $Q_1/Q = 0,1$, починаючи з $\tau = 20$ хв протягом 10 хвилин. Там же наведені дані моделювання комбінованого впливу на осередок пожежі піною на основі продуктів згоряння в рециркульованому потоці.

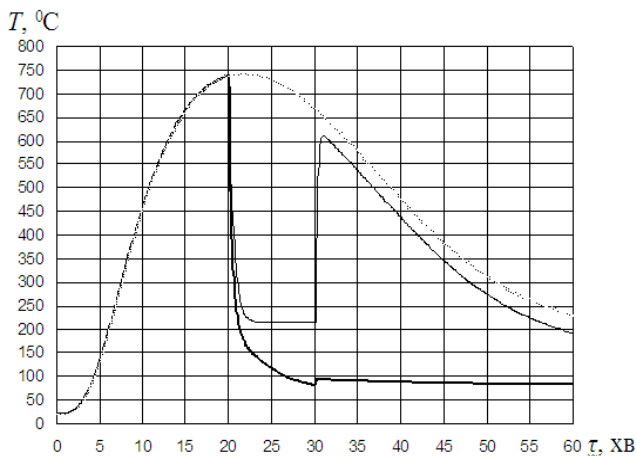


Рисунок 6.3. – Результати моделювання динаміки температури в осередку пожежі під час її виникнення, загасання та ізоляції з рециркуляцією без піни і при подачі піни (штрихова лінія – без рециркуляції, тонка лінія – з рециркуляцією, жирна лінія – подача піни на основі продуктів згоряння)

Аналіз отриманих результатів показує, що рециркуляція пожежних газів має незначний вплив на затухання пожежі, якщо час рециркуляції при такій потужній пожежі складає всього 10 хв. Таким чином, пожежа знову відновлюється.

Однак найбільш істотний вплив на осередок пожежі надає комплексна дія піни і продуктів згоряння, як видно за даними рис. 5.5. У розрахунках приймалося, що кратність піни на підході до осередку пожежі $K = 1000$, яка в перерахунку на діаметри крапель рідини при руйнуванні піни становить, згідно з залежністю (6.13), $d_k = 100$ мкм, при діаметрі бульбашок піни

$d_n = 1$ мм. За цих умов масова витрата рідкої фази G_2 згідно з (6.11) чисельно приймалася рівною витраті повітря Q .

З аналізу отриманих результатів випливає, що комплексний вплив на осередок пожежі піною разом з продуктами згоряння призводить до швидкого загасання осередку. Так температура в осередку пожежі знижується до 100°C всього за 7 хв.

Результати математичного моделювання динаміки в часі температури в осередку пожежі показують, що отримані результати відображають реальну картину подій і процесів, що спостерігаються під час пожеж. У той же час для обґрунтування конкретних параметрів гасіння пожеж піною на основі продуктів згоряння необхідне проведення експериментальних досліджень, що підтвердять адекватність математичної моделі натурному об'єкту.

6.4. Експериментальні дослідження динаміки пінного потоку і його впливу на осередок пожежі в натурних і лабораторних умовах

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі натурному об'єкту передбачалося проведення експериментальних досліджень в натурних і лабораторних умовах.

Для проведення експериментів на відстані 40 м від виходу зі штольні НДІГС, опис якої представлено у другому розділі, встановлювалася ізолююча бетонітова перемичка, а в гирлі штольні – навісна брезентова перемичка з прорізами. Центральний отвір призначено для подачі піни, а верхній – для вентиляційної труби, по якій за допомогою вентилятора місцевого провітрювання (ВМП), або димососа ДП-10 відбиралося повітря з ізолюваного об'єму і подавалося до піногенератора (рис.6.4).

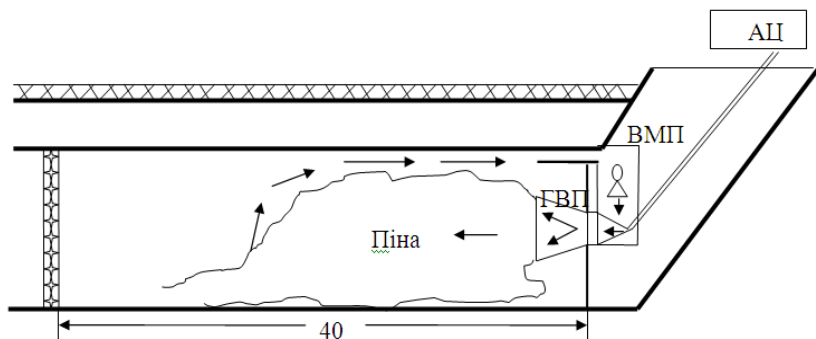


Рисунок 6.4. – Схема ізолюваної ділянки дослідної штольні для проведення експериментів з подачі піни

В ізолюваному об'ємі були розміщені три станції вимірів (на кінцях і в середині). На кожній замірній станції проводився дистанційний відбір проб повітря біля покрівлі і близько дна каналу. Для вимірювання висоти пінного потоку на замірних станціях вертикально встановлювалися рейки з поділками через 20 см, що фіксують наявність піни шляхом замикання електричного кола.

Піна в ізолюваному об'ємі подавалася піногенератором ГПС-600, шахтним піногенератором ППШ, встановленим у гирлі штольні біля дифузора. Згідно з технічними характеристиками [116] ГПС-600 дозволяє отримувати піну кратністю 70 – 100 з продуктивністю 0,4 – 0,6 м³/с. Під час роботи ППШ піна мала кратність 100 – 500 з продуктивністю 1 – 6 м³/с. При подачі від ПГУ-120 піна мала кратність 500-800.

У ході експериментів визначався коефіцієнт руйнування піни в ізолюваному об'ємі без пожежі.

Наявність дверей в ізолюючій бетонній перемичці дозволяла не тільки за допомогою рейок слідкувати за висотою пінного потоку, але й проводити безпосередні спостереження за його динамікою в каналі.

Процес піноутворення здійснювався шляхом набризкування водного розчину піноутворювача через розпилювач на пакет сіток. Піноутворюючий водний розчин містив 3 – 6% піноутворювача типу ПО-6ОСТ типу (БАРС, Пірена, Альпен). У цьому випадку утворювався суцільний потік піни, який викидався на 3 - 4 м від місця установки піногенератора. Потрапляючи до ізольованого об'єму, піна витісняла повітря, рухалася під власною вагою від однієї перемички до іншої. Натикаючись на найближчу перемичку, піна зупинялася, і вся її маса змушена була рухатися до дальшої перемички.

Піна подавалася таким чином, щоб при продуктивності піногенератора $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ або $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$ або ПГУ вона повністю заповнила ізольований об'єм, рівний $40 \cdot 4 = 160 \text{ м}^3$. Кожний дослід повторювався 5 раз. Однак візуальні спостереження показали, що в усіх випадках ізольований об'єм заповнювався не повністю. Що спостерігалось і в спільних дослідженнях проведених з Бойко Т.В. Це якраз і доводило наявність часткового руйнування піни (табл. 6.1).

Таблиця 6.1

Коефіцієнт руйнування піни в ізольованому об'ємі

Номер експерименту	Продуктивність, $\text{м}^3/\text{с}$	Кратність піни	Об'єм піни, м^3	Коефіцієнт руйнування
1-5	0,5	87-100	122	0,76
6-10	1,7	100-500	140	0,87
11-15	2	500-800	146	0,91

Для проведення дослідів під час горіння і гасіння пожежі піною (рис. 6.5), як і раніше за лабораторних умов, у камері, було використано 5 кг горючої ізоляції з металевими провідниками, при цьому припливна вентиляція здійснювалась через отвори площею – $F_{отв.} = 0,05 \text{ м}^2$.

Тривалість розпалювання складала 4 хв. Після усунення джерела запалювання температура на 13 хвилині від початку досліду сягала 700 °С. Було припинено приплив повітря і проведено герметизація камери для подачі піни. Після цього розпочалося гасіння піною 6% водного розчину ПУ Барс- S1, яке тривало 2,5 хв. Піною середньої кратності була заповнена камера вище рівня кабелю, розташованого в ній на лотках. Після подачі піни горіння не повторювалося, протягом 4 хв відбулося охолодження камери і температура впала нижче 200 °С.

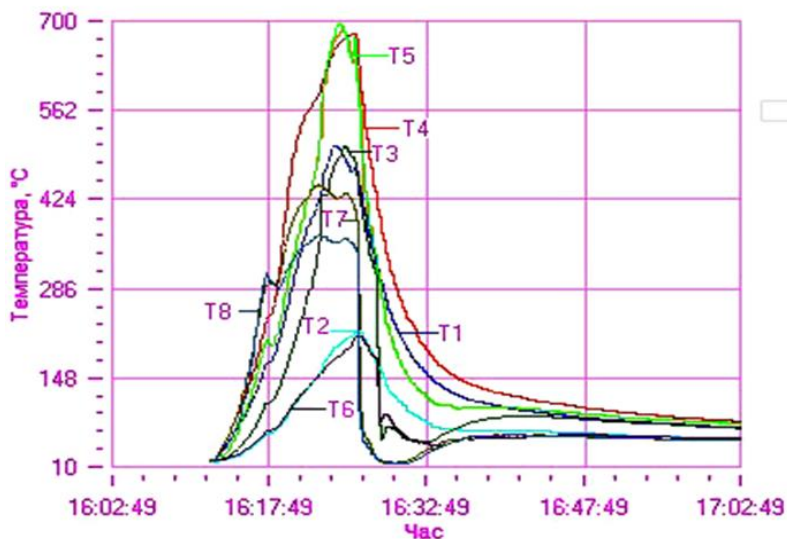


Рисунок 6.5. – Динаміка температури в кабельному тунелі під час горіння і гасіння пожежі піною протягом 2,5 хв після досягнення максимуму температури

На рис. 6.6 представлені результати порівняння експериментальних даних (рис. 6.5) і даних чисельних розрахунків, за формулами (6.14) – (6.18), щодо гасіння пожежі піною.

Як видно (рис. 6.6), отримані розрахункові дані достовірно відображають реальні процеси гасіння пожеж піною і вказують на адекватність математичної моделі натурному об'єкту. При цьому в розрахунках використовувалися ті ж вихідні дані, що і раніше, а витрата піни перераховувалася згідно із залежністю (6.11) і була прийнята рівною $G_2 = 0,048$ кг/с при витраті повітря $Q_1 = 0,024$ м³/с і кратності піни $K = 500$.

Очевидно, рециркуляція продуктів згоряння тільки підсилює ефективність гасіння пожежі, як уже було доведено при теоретичними дослідженнями.

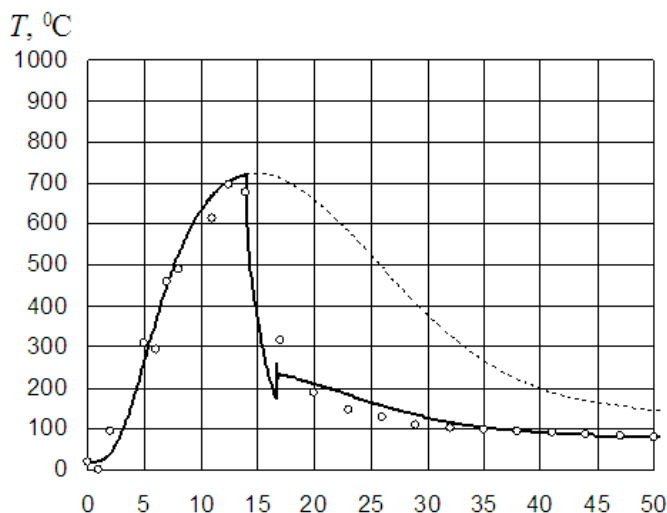


Рисунок 6.6. – Результати порівняння експериментальних даних у відповідності з даними рис. 6.5 і даних чисельних розрахунків гасіння пожежі піною (штрихова лінія – без гасіння піною, суцільна лінія – з гасінням піною, маркери – експериментальні данні)

Для реального здійснення комплексного впливу на осередок пожежі піною на основі продуктів згоряння запропоновано спосіб гасіння пожеж у замкнутих об'ємах інертною піною [35,40], схема якого наведена на рис. 6.7.

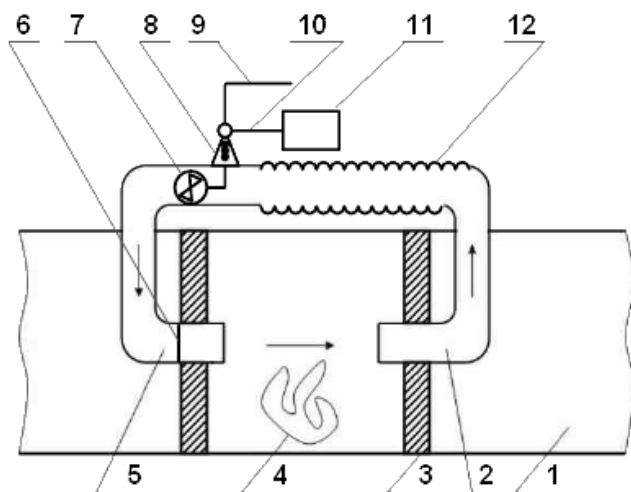


Рисунок 6.7. – Схема способу гасіння пожежі в ізолюваному об'ємі тунелю інертною піною:

- 1 – кабельний тунель; 2 – всмоктувальна частина трубопроводу;
- 3 – перегородка; 4 – вогнище; 5 – нагнітальна частина трубопроводу;
- 6 – пакет сіток для отримання інертної піни; 7 – вентилятор (димовсмоктувач), завдяки дії якого подається інертна піна до ізолюваної ділянки; 8 – установка для отримання водного розчину піноутворювача типу ПЗ; 9 – рукавна лінія; 10 – стороння посудина з піноутворювачем; 11 – трубопровід (рукав) для подачі води; 12 – металевий повітропровід, що виконує функції рекуперативного теплообмінника

З обох боків кабельного тунелю (шахти, підвалу), де виникла пожежа, встановлюємо брезентові перегородки 3, чим зменшуємо об'єм для розповсюдження летких продуктів згоряння, вмикаємо вентилятор (димовсмоктувач) 7, і леткі продукти згоряння потрапляють до всмоктувальної частини трубопроводу 2. Далі вони рухаються металевим трубопроводом, який виконує роль рекуперативного теплообмінника 12, де охолоджуються потоком повітря та потрапляють до димовсмоктувача 7, з якого розчин

піноутворювача та інертні гази подаються на пакет сіток 6, де утворюється інертна піна, а далі – в напірний трубопровід 5. У разі руйнування піни до зони горіння потрапляють збіднені на кисень леткі продукти згоряння, що не підтримують процесу горіння. Піна високої або середньої кратності ($K > 100$) витісняє кисень із зони горіння та охолоджує її. Температура в зоні горіння знижується, що дозволяє зменшити швидкість підготовки горючих матеріалів до горіння. Швидкому просуванню піни сприяє розрідження в об'ємі, яке створює вентилятор (димовсмоктувач) з боку всмоктувального трубопроводу.

Винахід, на який отримано патент [185], може використовуватись для гасіння пожеж у великих об'ємах (кабельні тунелі, підвали, шахти тощо).

У відомих способах гасіння пожежі об'ємним способом використовуються генератори піни, що генерують повітряно-механічну піну середньої, високої кратності (ГПС, вентилятори) з пакетом сіток; посудини, в яких попередньо накопичені піноутворювачі; всмоктувальні та напірні рукави. При застосуванні цього способу гасіння повітряно-механічна піна потрапляє до об'єму, в якому відбувається процес горіння, і витісняє газову суміш, в якій є кисень. Проте відомий спосіб передбачає в якості наповнювача піни застосування повітря, яке в результаті руйнування бульбашок піни вивільняється, і вміст кисню в об'ємі горіння збільшується.

Порівняно з використанням в тих же умовах генератора піни середньої кратності (ГПС) та способів, вказаних у патентах, цей винахід має низку переваг. Вони полягають у тому, що:

- 1) дану установку можна використовувати як автоматичну систему пожежогасіння в місцях підвищеної пожежонебезпеки з автономною системою забезпечення вогнегасними речовинами (піноутворювач, вода);

2) заздалегідь не потрібно накопичувати інертні гази, отримана піна високої кратності, відповідне розміщення рукавів та вентилятора (в тунелі знижують тиск газів, продуктів згоряння) дають змогу швидко заповнювати об'єм;

3) використовуючи установку як мобільний прилад гасіння, немає потреби в залученні ланки газодимозахисної служби (ГДЗС), як у випадку використання ГПС, що забезпечує безпеку особовому складу оперативно-рятувальних підрозділів цивільного захисту.

Спосіб гасіння інертною піною полягає в тому, що продукти горіння при температурі 700-800⁰С забираються із зони горіння димовсмоктувачем, при цьому зона горіння ізолюється перемичками з обох боків, а вміст кисню в продуктах згоряння зменшується, і, відповідно, збільшується об'єм газів, котрі не підтримують горіння та використовуються для утворення інертної піни.

Для отримання піни високої кратності ($K = 200 - 1000$) за допомогою димовсмоктувача, в його комплект входить піногенераторна установка ПГУ-120 (продуктивність по розчину 120 л/хв). Використовують ПГУ під час об'ємного гасіння.

На рис. 6.8 наведена схема піногенераторної установки ПГУ-120 для отримання піни середньої і високої кратності.

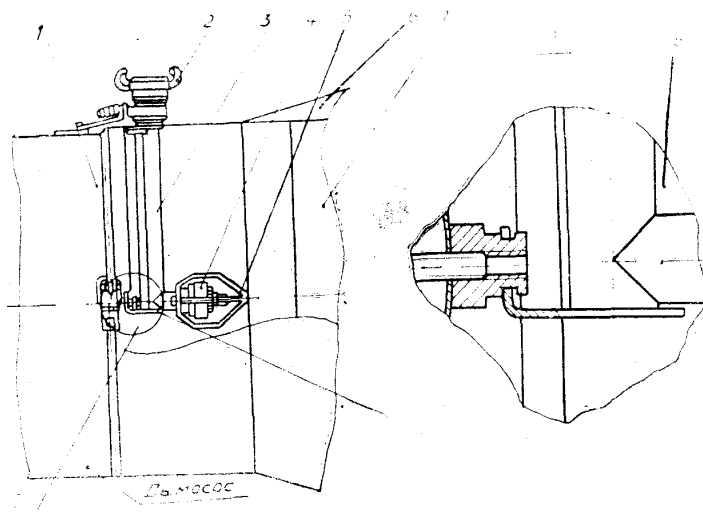


Рисунок 6.8. – Схема піногенераторної установки ПГУ-120:

- 1 – ремінь, 2 – з'єднувальна головка, 3 – трубопровід, 4 – розпилювач;
5 – сітка захисна; 6 – рукав; 7 – сітка; 8 – вісь замка

Принцип дії ПГУ такий же як і ГПС-200, 600, 2000. ПМП отримують в результаті змішування трьох компонентів: води, піноутворювача і повітря. Для отримання піни використовується 6% - 12% розчин ПУ з водою, при цьому дозатор пінозмішувача ПЗ-5 на насосі автоцистерни встановлюють на поділку 2.

Потім, під'єднують до напірного патрубку ДП-10 ПГУ, з'єднують ПГУ з ПН (пожежним насосом) напірним пожежним рукавом $d = 51$ мм та під'єднують пожежні напірні рукава до гідротурбіни і подають воду для її приводу.

Початковий тиск води, необхідний для функціонування гідротурбіни не повинен перевищувати 4 кгс/см^2 , а тиск перед ПГУ – $2 - 3 \text{ кгс/см}^2$.

Таблиця 6.2
Основні технічні дані та характеристики ПГУ

Показник, одиниці вимірювання	Значення
Марка	ДП-7
Продуктивність по повітрю, не менше м ³ /год	
з електроприводом	7000
з мотоприводом	7000
Продуктивність по піні м ³ /хв.	120-140
Кратність піни із 6% розчину піноутворювача ПО-6ОСТ	800-1000
Габаритні розміри, мм:	
Для димовсмоктувача	
Довжина	385
Ширина	585
Висота	670
Вага, кг:	
Димовсмоктувач	19
Всмоктуючий рукав	17
Напірний рукав	15
Піногенеруюча установка	4,5
Комплект рукав. В транспортному стані	38,5
Котушка з силовим кабелем	12,5
Електродвигун:	
Тип	4АХ7182
Потужність	1,1
Число обертів об/хв	3000
Напруга В	220-380

Від пожежного автомобіля по напірному рукаву, з'єднаному з головкою ПГУ-120, 6 – 12%, розчин піноутворювача через трубопровід потрапляє до розпилювача, де й розпилюється і потрапляє на тканинну сітку. Потім повітря від працюючого димовсмоктувача видувається на сітку, бульбашки піни високої кратності по перкалевому рукаву димовсмоктувача подаються до місця пожежі.

Режим роботи ПГУ вважається нормальним, якщо піна на виході з рукава заповнює його повністю, або не менше ніж на 2/3 його діаметра (перерізу).

Під час транспортування піни до приміщення зі складним плануванням, або подаючи її на висоту контроль за

роботою ПГУ виконується візуально. Якщо при цьому виходить розчин із рукава, то треба збільшити тиск води на вході в турбіну димовсмоктувача. У разі якщо рукав заповнюється піною менше ніж на половину його розрізу, то треба зменшити тиск на вході в турбіну.

Оптимальне отримання піни високої кратності, як правило, можливе при плюсових температурах навколишнього середовища. Розроблений спосіб і піногенераторна установка ПГУ разом із попередніми розрахунками на ЕОМ дозволяють ефективного їх застосовувати для зменшення часу гасіння пожежі та кількості піноутворювача.

Висновки

Розроблено математичну модель комплексного впливу на осередок пожежі піною з використанням продуктів згоряння в замкнутому контурі. Отримано результати чисельних експериментів під час розвитку пожежі як до застосування засобів її гасіння, так і під час їхнього застосування з урахуванням нагрівання й охолодження навколишніх порід.

Встановлено, що витрата піни, у міру просування, зменшується в залежності від її стійкості і синерезису. Це дозволяє визначити дальність просування піни і концентрацію рідини в ній або її кратність в осередку пожежі.

Встановлено, що найбільший ефект із гасіння пожеж в замкнутому контурі дає комплексний метод впливу на осередок піною і рециркульованими продуктами згоряння, коли піна витісняє із замкнутого об'єму пожежні газу. Отримані результати математичного моделювання розвитку та загасання пожежі наочно демонструють ефективність цього гасіння комплексним методом. Полігонні дослідження динаміки пінного потоку, максимально наближені до

натурного об'єкта, дозволили визначити характер руйнування піни в залежності від її початкової кратності. Коефіцієнт руйнування для піни середньої кратності при продуктивності піногенератора $0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ становить $0,7 - 0,8$, а при продуктивності $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$ і більше для піни високої кратності в середньому $0,9$. Експериментальні дослідження в лабораторних умовах щодо рециркуляції продуктів згоряння і гасіння пожеж піною дозволили визначити ефективність впливу на пожежу в ізольованих об'єктах.

Розроблено спосіб і піногенераторну установку ПГУ-120 для комплексного гасіння пожеж піною на основі продуктів згоряння, ефективність застосування яких доведена попередніми чисельними експериментами на ЕОМ.

РОЗДІЛ 7

РОЗРОБКА МЕТОДУ КОМП'ЮТЕРНОГО РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РІЗНИМИ ЗАСОБАМИ І ПРОГНОЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇХ ВПЛИВУ НА ОСЕРЕДОК ПОЖЕЖІ

7.1. Розроблення узагальненого підходу до математичного моделювання розвитку та гасіння пожеж різними засобами

Узагальнення отриманих результатів математичного моделювання та експериментальних даних з розвитку та гасіння пожеж різними засобами дає можливість створити універсальну математичну модель, яка давала б можливість у разі застосування того чи іншого засобу пожежогасіння проводити розрахунки параметрів інтенсивності і часу впливу на вогнище, а також визначати кількість того або іншого засобу пожежогасіння, що витрачається.

Для розрахунку часу максимального тепловиділення при горінні якого не будь матеріалу використовуємо залежність (2.8). Аналіз показника ступеня у експоненти (2.8) показує, що горіння в місці виникнення пожежі майже закінчиться з переходом на тління, коли інтенсивність горіння становитиме, приблизно, всього 10%. Тоді згідно з (2.8) при значенні експоненти 0,1 отримаємо

$$kw\tau_m / u = 2,3, \quad (7.1)$$

де k – показник швидкості піролізу і вигорання твердого матеріалу, $1/\text{с}$;

w – швидкість переміщення осередку пожежі, м/хв. ;

τ_m – час максимуму тепловиділення в осередку пожежі, хв. ;

u – швидкість повітря, що надходить до осередку, м/с .

Швидкість повітря не повинна бути менше швидкості вільного його руху до осередку пожежі під дією теплової депресії, яку на підставі експериментів в камері приймемо рівною $u_0 = 0,1$ м/с.

За час τ_m пожежа переміститься на відстань $l_m = w\tau_m$, тому максимальна довжина зони горіння дорівнюватиме

$$l_m = 2,3u / k. \quad (7.2)$$

Припустимо, що швидкість k піролізу твердого матеріалу пропорційна швидкості вигорання матеріалу v_0 і обернено пропорційна пожежному навантаженні q :

$$k \approx v_0 / q, \quad (7.3)$$

де q – пожежне навантаження, кг/м².

Підставляючи (7.3) у формулу (7.2), отримаємо

$$l_m = auq / v_0, \quad (7.4)$$

де a – емпірична константа пропорційності.

Для визначення емпіричної константи будемо виходити з експериментальних даних максимальної довжини зони горіння $l_m = 70$ м, отриманої в штольні ВНПГД при швидкості повітря $u = 3,1$ м/с і швидкості горіння $v_0 = 0,78$ кг/(с·м²) за даними [90]. В цьому випадку емпірична константа буде дорівнювати $a = 0,5$ при пожежному навантаженні $q = 35$ кг/м², приведенного до стандартного навантаження по деревині, для кабельних тунелів [127]. Приймаючи швидкість повітря, що дорівнює швидкості під дією тільки теплової депресії $u = u_0 = 0,1$ м/с, знайдемо за формулою (7.4)

мінімальну довжину зони горіння $l_m = 2,2$ м при відсутності примусової вентиляції.

Для визначення поточної довжини зони горіння використовуємо емпіричну залежність, отриману в результаті обробки багаточисленних експериментів

$$l = \frac{\tau}{15}(u + 4), \quad (7.5)$$

де l – поточна довжина зони горіння, м;

τ – час з моменту виникнення пожежі, хв.

Вирішуючи рівняння (7.5) відносно часу і підставляючи в нього формулу (7.4), отримаємо

$$\tau_m = \frac{7,5qu}{v_0(u + 4)}. \quad (7.6)$$

Тут τ_m – час максимального тепловиділення, як для великомасштабних, так і для дрібномасштабних пожеж.

Так, наприклад, при швидкості повітря $u = 0,2$ м/с та пожежному навантаженні $q = 35$ кг/м² для кабельного тунелю знайдемо за формулою (7.6) $\tau_m = 16$ хв. При темпі зростання температури в кабельному тунелі 40 °С/хв [187], знайдемо час виходу температури на максимум 700 - 800 °С за 18 – 20 хв.

Формула (7.6) також з великим ступенем точності визначає час максимуму тепловиділення в камері в лабораторних умовах. Так, при швидкості повітря $u = 0,2$ м/с ($Q = 0,047$ м³/с) і пожежному навантаженні $q = 17$ кг/м² для камери за формулою (7.6) отримаємо $\tau_m = 8$ хв, що з урахуванням часу розпалу 4 хв якраз становить 12 хв, що неодноразово наголошувалося в експериментах в лабораторних умовах.

Для розрахунку швидкості переміщення пожежі w (м/хв.) в будь яких умовах будемо вважати найбільш

перевірену при аваріях в шахтах і при натурних експериментах у штольні [167] модернізовану нами формулу

$$w = \frac{1,85u}{u + 1,23}. \quad (7.7)$$

Добуток швидкості переміщення пожежі на час з моменту виникнення горіння дозволяє визначити місцезнаходження фронту горіння

$$x_1 = w\tau, \quad (7.8)$$

де x_1 – відстань фронту горіння від місця виникнення пожежі, м.

Таким чином, здійснено і обґрунтовано загальний підхід до визначення поточної і максимальної довжини зони горіння, часу виходу тепловиділення осередку пожежі на максимум, а також до визначення місцезнаходження фронту горіння.

Знаючи час максимуму тепловиділення з осередку пожежі, можна задати, як змінюється функція тепловиділення в реальному масштабі часу, використовуючи формулу (2.74):

$$\bar{q} = (\tau / \tau_m)^{3,6} \exp(-3,6\tau / \tau_m). \quad (7.9)$$

Незалежно від засобу пожежогасіння, який використовується необхідно позначити час початку τ_1 і кінця τ_2 гасіння пожежі. Тривалість гасіння пожежі визначається введенням множника

$$m = 0,25 \left(1 + \frac{\tau - \tau_1}{|\tau - \tau_1|} \right) \left(1 + \frac{\tau_2 - \tau}{|\tau_2 - \tau|} \right). \quad (7.10)$$

Множник m якраз і визначає початок і кінець застосування будь якого засобу пожежогасіння. Так, до і після застосування засобу пожежогасіння $m = 0$, а під час застосування $m = 1$. Використання модуля числа у формулі (7.10) дозволяє без всяких умовних переходів за часом включати в дію той чи інший засіб пожежогасіння.

Для опису динаміки в часі процесів горіння і гасіння пожеж в ізолюваному відсіку каналу використовуємо зональну модель, виділяючи зону горіння і решту ізолюваного об'єму.

Математичне моделювання динаміки в часі кисню в осередку пожежі та за його межами визначаємо чисельним методом з використанням першого рівняння системи (3.69) і рівняння (3.71):

$$\bar{C}^{n+1} = \frac{[1 - (Cu + AB\bar{q}^n)/2]\bar{C}^n + Cu\bar{Z}^n}{1 + (Cu + AB\bar{q}^n)/2}; \quad (7.11)$$

$$\bar{Z}^{n+1} = (1 - \bar{V}Cu)\bar{Z}^n + m(1 - \bar{Q}_1)\bar{V}Cu(\bar{C}^n - 1) + \bar{V}Cu[1 + m(\bar{C}_1 - 1)],$$

де $\bar{C} = C/C_0$ – відносна концентрація кисню в зоні горіння;

$\bar{Z} = Z/C_0$ – відносна концентрація кисню поза зоною горіння в ізолюваному об'ємі;

$\bar{C}_1 = C_1/C_0$ – концентрація кисню на вході в ізолюваний об'єм при гасінні пожежі парогазовою сумішшю або інертними газами;

$\bar{V} = L/l_m$ – відносний об'єм відсіку каналу;

$\bar{Q}_1 = Q_1/Q$ – відносна величина підсмоктування повітря при рециркуляції пожежних газів (при $Q_1 = Q$ рециркуляція відсутня, а при $Q_1 = 0$ контур рециркуляції повністю замкнутий);

L – довжина ізолюваного відсіку каналу, м;

n – номер попереднього тимчасового шару при чисельних експериментах;

$n + 1$ – номер поточного тимчасового шару для визначення шуканих параметрів;

$Cu = u\Delta\tau / l_m$ – число Куранта, прийняте рівним 0,5 для стійкості рахунку;

$\Delta\tau$ – крок за часом, с.

Система рівнянь (7.11) дозволяє моделювати динаміку в часі концентрації кисню в ізолюваному каналі до вогнища і у вогнищі, як без рециркуляції пожежних газів, так і при їх рециркуляції, а також при подачі інертних газів на заданому інтервалі часу. При цьому в початковий час концентрація кисню перед осередком пожежі приймається рівною $\bar{Z}^0 = Z / C_0 = 1$.

Математичне моделювання динаміки в часі температури в зоні горіння і в навколишньому масиві проводимо також чисельним методом з використанням третього і четвертого рівняння системи (4.114):

$$\begin{aligned}\bar{T}^{n+1} &= \frac{\{1 - Cu/2\}\bar{T}^n + Cu[B\bar{C}^n\bar{q}^n + St(\bar{\theta}^n - \bar{T}^n/2) - \bar{r}U\bar{\chi}^n]/(1 + U\bar{\chi}^n)}{1 + Cu/2 + CuSt/(1 + U\bar{\chi}^n)/2}, \\ \bar{\theta}^{n+1} &= \frac{(1 - Fo/2)\bar{\theta}^n + Fo\bar{T}^n/2}{1 + Fo/2},\end{aligned}\tag{7.12}$$

де частка вологи, що випарувалася при подачі диспергованої води або піни визначається з використанням другого рівняння системи (4.114) на кожному часовому шарі за формулою

$$\bar{\chi}^{n+1} = m\left\{1 - \frac{[1 - Cu(1 + \bar{\gamma}\bar{T}^n)/2](1 - \bar{\chi}^n) + Cu}{1 + Cu(1 + \bar{\gamma}\bar{T}^n)/2}\right\}.\tag{7.13}$$

Тут $\bar{T} = T/T_0 - 1$ – безрозмірна температура пожежних газів;

$\bar{\theta} = \theta/T_0 - 1$ – безрозмірна температура навколишнього масиву;

$\bar{\gamma} = \gamma_m / d_k$ – відносна швидкість випаровування вологи;

γ – емпірична константа швидкості випаровування вологи, яка приймається 0,001;

d_k – діаметр крапель рідини, мм.

В систему рівнянь 7.11 – 7.13 введені наступні критерії подібності:

$Fo = Cu / Pe = a\Delta\tau/\Delta r^2$ – число Фур'є нагрівання та охолодження навколишнього масиву;

$St = \frac{\alpha \Pi_m}{2\rho c_e Q}$ – критерій Стантона теплообміну потоку

повітря з навколишнім масивом;

$A = \frac{\rho c_e T_0 C_0}{\rho_k H_c}$ – критерій теплоємності повітря;

$B = \frac{37\chi v_0 F H_c}{\rho c_e T_0 Q}$ – критерій теплової енергії пожежі;

$\bar{r} = \frac{r + c_n T_0}{c_e T_0}$ – питома теплота пароутворення;

$U = \frac{c_n G_2}{c_e \rho Q}$ – питома витрата рідини,

де G_2 – масова витрата рідини при гасінні пожежі диспергованою водою або піною, кг/с;

Q – витрата повітря при гасінні пожежі, м³/с.

Інші параметри, що входять в критерії подібності, приймаються для всіх випадків за константи. До них відносяться:

- густина повітря $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$;
- густина кисню $\rho_k = 1,32 \text{ кг/м}^3$;
- густина води $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$;
- питома теплоємність повітря $c_v = 1,04 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$;
- питома теплоємність пари $c_n = 1,93 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{К)}$;
- концентрація кисню в зовнішньому повітрі $C_0 = 0,21$;
- температура при нормальних умовах $T_0 = 293 \text{ К}$;
- теплота пароутворення $r = 2500 \text{ кДж/кг}$;
- теплота згоряння твердого палива $H_c = 13000 \text{ кДж/кг}$;
- коефіцієнт температуропровідності масиву з бетону і цегли $a = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Вхідна в критерій B подібна теплової енергії пожежі площа горіння F є також змінною величиною при гасінні пожежі порошком, диспергованою водою або піною. У загальному випадку площа горіння знаходиться за формулою

$$F = bl_m \left[1 - 0,5\varepsilon \left(1 + \frac{\tau - \tau_2}{|\tau - \tau_2|} \right) \right] \exp[-m\delta G_2(\tau - \tau_1)/(qbl_m)], \quad (7.14)$$

де b – ширина зони, яка горить, м;

δ – емпірична константа;

ε – частка залишку незгорілого матеріалу, що визначається за формулою

$$\varepsilon = 1 - \exp[-\delta G_2(\tau_2 - \tau_1)/(qbl_m)]. \quad (7.15)$$

Використання модуля числа у формулі (7.14) дозволяє також без умовних переходів безпосередньо проводити розрахунки необхідних параметрів для подальшого моделювання термо-газодинамічних процесів при пожежах.

Обробка експериментальних даних і лабораторних даних дозволила встановити залежність від швидкості числа Стантона, рівною

$$St = \frac{14(u + 0,1)}{(u + 0,5)}. \quad (7.16)$$

Критерій теплоємності повітря, як встановлено, може бути прийнятий у всіх випадках за константу і дорівнює $A = 0,021$. За даними [90] при вільній вентиляції осередку пожежі, відношення швидкості горіння до швидкості, що надходить до осередку потоку повітря є постійною величиною, що дозволяє критерій теплової енергії пожежі визначати з достатньою мірою точності за формулою

$$B = \frac{0,016 \chi^{FH_c}}{c_s S}. \quad (7.17)$$

Крім того, встановлено, що глибина прогріву навколишнього масиву $\Delta r(\text{м})$ залежить від часу вільного горіння осередку і дорівнює

$$\Delta r = 0,0035 \tau_m. \quad (7.18)$$

При заданому числі Куранта визначається при чисельному моделюванні крок за часом (с) за формулою

$$\Delta \tau = 0,5 l_m / u. \quad (7.19)$$

Для підтвердження ще раз адекватності математичної моделі розвитку великомасштабної пожежі в каналі великої протяжності на рис. 7.1 представлена розрахункова крива динаміки температури в довгому каналі, отримана чисельним методом.

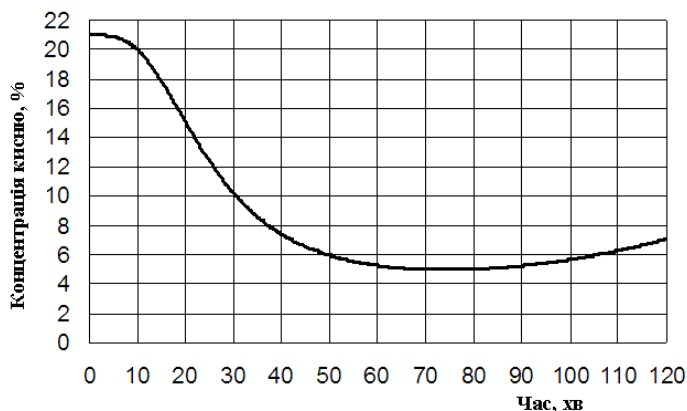


Рисунок 7.1 – Розрахункова крива динаміки температури в довгому каналі, отримана чисельним методом

При чисельному моделюванні пожежі приймалися дані про пожежу в штольні при пожежному навантаженні $q = 30 \text{ кг/м}^2$, ширині зони палаючої поверхні $b = 6 \text{ м}$, швидкості повітря $u = 1 \text{ м/с}$ і площі поперечного перерізу каналу $S = 4 \text{ м}^2$. Як показують експериментальні дані, концентрація кисню дійсно знизилася до 5% за 70 – 80 хв.

Інше підтвердження достовірності чисельних експериментів представлено на рис. 7.2, де порівнювалися розрахункові та експериментальні дані динаміки температури тієї ж великомасштабної пожежі. Як видно, розрахункові та експериментальні дані задовільно узгоджуються одна з одною навіть у діапазоні часу до 120 хв.

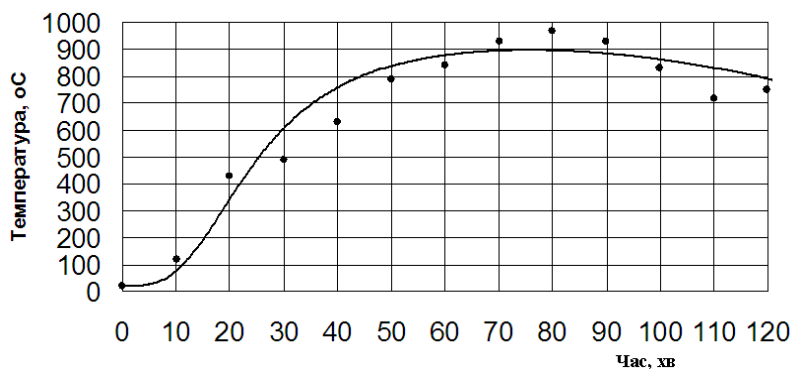


Рисунок 7.2. – Динаміка температури в зоні горіння довжиною 25 м при пожежі в довгому каналі (кружечки – експериментальні дані, суцільна лінія – розрахункові дані)

При дрібномасштабних пожежах, як в лабораторних умовах в камері, чисельні експерименти дають також збіг максимумів температури на 8 – 12 хв при витраті повітря в експерименті $Q = 0,024 - 0,047 \text{ м}^3/\text{с}$, а самі максимуми температури сягають майже 700°C .

Подальше порівняння експериментальних і розрахункових даних при пожежі в кабельному тунелі показали, що і тут повністю спостерігається збіг, як по швидкості наростання температур 40°C за 1 хв., так і щодо виходу на максимум 700°C .

Таким чином, розроблений узагальнений підхід до математичного моделювання розвитку та гасіння пожеж різними засобами, до яких відносяться:

- 1) рециркуляція пожежних газів в ізольованому об'ємі;
- 2) інертизація атмосфери ізольованого відсіку каналу шляхом подачі в нього парогазової суміші або інертного газу або того й іншого одночасно;
- 3) порошкові засоби пожежогасіння;
- 4) подача диспергованої води на осередок пожежі;

5) подача піни на основі пожежних газів при їх рециркуляції в замкнутому контурі.

На рис. 7.3 представлена технологічна схема реалізації способу пожежогасіння різними засобами в кабельному тунелі.

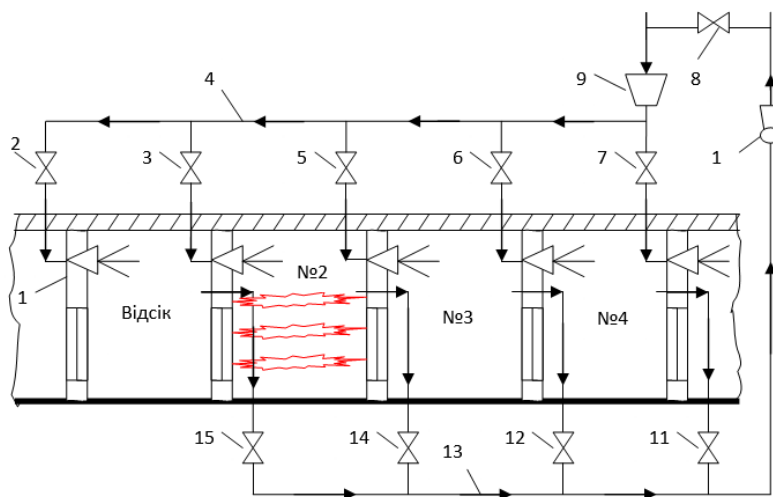


Рисунок 7.3. – Технологічна схема реалізації способу пожежогасіння різними засобами в кабельному тунелі:

1 – ізоляційні перемички з дверима; 2, 3, 5 – 7, 8, 11, 12, 14, 15 – ізолюючі пристрої для подачі засобу пожежогасіння (крани); 4 – нагнітальна гілка трубопроводу з соплами в кожному відсіку; 13 – всмоктувальна гілка трубопроводу; 10 – вентильатор; 9 – приймальний бункер для подачі диспергованої води, піни, парогазової суміші, інертних і пожежних газів

Так, при гасінні пожежі у відсіку № 2 відкриваємо крани 3 і 14. В результаті буде здійснюватися провітрювання відсіку № 2 свіжим повітрям, проте закорочування потоку шляхом відкриття ізолювального пристрою (крана 8) забезпечить подачу пожежних газів на осередок горіння. Можна подавати будь-який засіб пожежогасіння в приймальний пристрій 9, як при рециркуляції пожежних

газів, так і без неї. При цьому порошок або диспергована вода з великою швидкістю надходять в ізольований відсік через розташовані під покрівлею одне або декілька розподілених по довжині сопел.

7.2. Розробка алгоритму та програми розрахунку параметрів гасіння пожеж різними засобами

Велика протяжність кабельних тунелів не дозволяє в усіх випадках використовувати стаціонарні автоматичні установки пожежогасіння. У ряді випадків доводиться використовувати і пересувні засоби пожежогасіння, такі як установки пожежогасіння на базі автомобіля АГВГ-100. Загальна протяжність кабельних тунелів може досягати десятки кілометрів, в результаті чого їх доводиться ділити на відсіки протипожежними перегородками завдовжки від 40 м до 150 м. Площа поперечного перерізу кабельних тунелів коливається в незначних межах і може бути прийнята рівною від $1,6 \cdot 1,8 \text{ м}^2$ до $2,0 \cdot 2,0 \text{ м}^2$. Кабельна продукція, як горючий матеріал, розміщується в два ряди на бічних полицях, забезпечених асбоцементними піддонами. Середнє питоме пожежне навантаження, приведене до стандартної деревини, становить 35 кг/м^2 .

Усі завдання розрахунку теплових і газодинамічних параметрів у кабельних тунелях при пожежах можна розбити на два класи: задачі виникнення і розвитку пожеж без застосування засобів гасіння і з їх застосуванням.

До першого класу належать завдання природного розвитку і затухання пожежі при початковому завданні конкретних вихідних даних.

До другого класу належать завдання оперативного прогнозу і реагування на ситуацію, що сталася під час застосування того чи іншого засобу пожежогасіння. При цьому в першу чергу необхідно знати місце і час виникнення

пожежі, а також задати час з моменту початку і кінця гасіння пожежі для визначення очікуваної ефективності впливу на зону горіння.

Всі вище перераховані ситуації повинні бути заздалегідь розраховані на ЕОМ, щоб можна було встановити ефективність застосування того чи іншого засобу гасіння за його наявності та загальну кількість вогнегасних речовин.

Після введення всієї вихідної інформації в ЕОМ та виявленні помилок при її введенні можна приступати до розрахунку параметрів таких як, концентрація кисню і температура в осередку пожежі, досліджуючи при цьому як режими горіння до гасіння пожежі, так і при її гасінні.

Розрахунок таких параметрів в ізольованому пожежному відсіку тунелю ведеться методом ітерацій за формулами 7.9 – 7.15 з певним кроком у часі і з попереднім розрахунком похідних даних, що визначаються за формулами 7.2 – 7.8, 7.16 – 7.19. Процес ітерацій триває до тих пір, поки пожежа в моделі не потухне і за часом може тривати 1 – 2 години, щоб мати повну інформацію про ефективність гасіння пожежі.

При розрахунках на ЕОМ в Excel використовуються вертикальні матриці із зазначенням початку і кінця гасіння пожежі, кроків за часом, із зазначенням інтенсивності тепловиділення в осередку пожежі з урахуванням впливу на нього того чи іншого засобу пожежогасіння, частки вологи, що випаровується при застосуванні порошку, диспергованої води або піни. За цими матрицями сліднують матриці безрозмірних концентрацій кисню в зоні горіння і за його межами, безрозмірної температури в осередку пожежі та в навколишньому каналі.

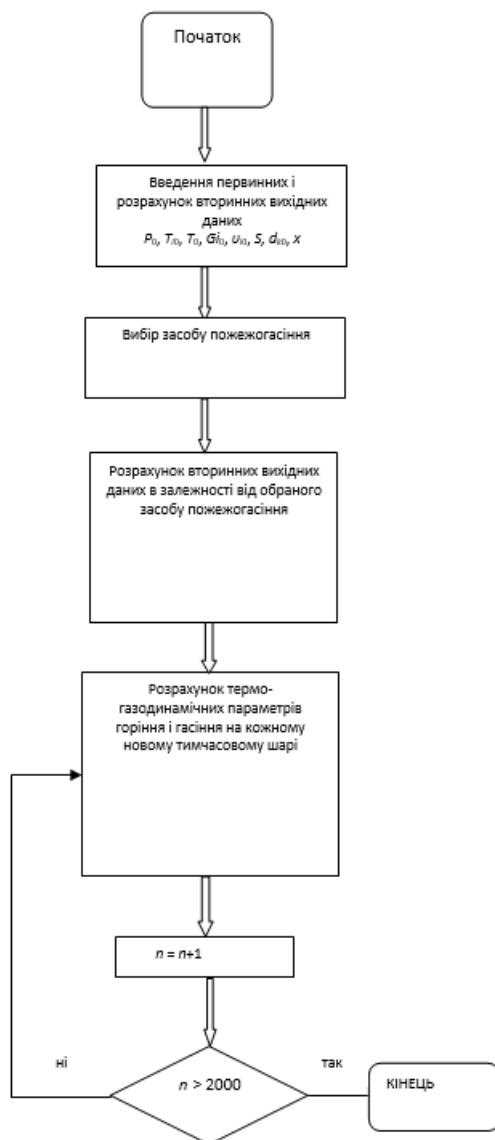


Рисунок 7.4. – Блок-схема розрахунку термо-газодинамічних параметрів горіння і гасіння пожежі у відсіку кабельного тунелю

Результати розрахунку зазначених параметрів представляються потім у розмірному чисельному вигляді в матрицях і у вигляді наочних графічних залежностей від часу концентрацій кисню і температури в зоні горіння, за якими можна судити, як про час самопогашення пожежі, так і про час її гасіння з застосуванням вибраного засоби впливу на осередок.

На рис. 7.4 представлена блок-схема розрахунку теплових і газодинамічних параметрів горіння і гасіння пожежі у відсіку кабельного тунелю при застосуванні різних засобів.

Як видно з блок-схеми, розрахунок теплових і газодинамічних параметрів закінчується при досягненні кількості ітерації $n = 2000$, що відповідає часу з моменту виникнення пожежі, рівної 1 – 2 год і більше. Це залежить від величини витрати газо-повітряної суміші, що надходить на осередок пожежі при швидкості її руху не менше 0,1 м/с.

7.3. Комп'ютерний розрахунок параметрів гасіння пожеж та ефективності впливу на осередок різними засобами

В результаті розроблених алгоритмів і програми розрахунку термо-газодинамічних параметрів горіння і гасіння пожежі у відсіку кабельного тунелю представляється можливість дати прогноз на ЕОМ в Excel ефективності застосування того чи іншого засобу пожежогасіння і визначити, як тривалість його застосування, так і кількість матеріалу, що витрачається.

У таблиці 7.1 представлені постійні вихідні дані, які зазвичай використовуються в літературі, а також прийняті вихідні дані для розрахунку в залежності від пожежного об'єкта, його параметрів, параметрів горючого матеріалу і часу з моменту виникнення пожежі.

Таблиця 7.1

Комп'ютерний розрахунок параметрів розвитку
і гасіння пожеж різними засобами

Постійні вихідні дані:	
1) Густина повітря, ρ (кг/м ³) =	1,2
2) Густина кисню, ρ_k (кг/м ³) =	1,32
3) Густина води, ρ_v (кг/м ³) =	1000
4) Концентрація кисню, Co (об. доли) =	0,21
5) Температура до пожежі, To (К) =	293
6) Питома теплоємність повітря, c_g (кДж/Ккг) =	1,04
7) Питома теплоємність пари, c_p (кДж/Ккг) =	1,93
8) Теплота пароутворення r (кДж/кг) =	2500
9) Теплота згоряння палива, H_c (кДж/кг) =	13000
10) Коефіцієнт температуропровідності масиву, α (м ² /с) =	0,0000005
Прийняті вихідні дані:	
1) Довжина ізолюваного об'єму, L (м) =	40
2) Площа поперечного перерізу каналу, S (м ²) =	4
3) Витрата повітря при гасінні пожежі, Q (м ³ /с) =	0,6
4) Пожежне навантаження, q (кг/м ²) =	35
5) Коефіцієнт неповноти згоряння, χ =	0,9
6) Швидкість вигорання матеріалу, vo (кг/м ² хв) =	0,78
7) Ширина укладання горючого матеріалу, b (м) =	3
8) Середній діаметр крапель води, dk (мм) =	0,1
9) Початок гасіння пожежі, t (хв) =	21
10) Кінець гасіння пожежі, t (хв) =	31

У таблиці 7.2 наведено дані, отримані за формулами (7.2) – (7.9), (7.16) – (7.19) для подальших чисельних розрахунків на ЕОМ розвитку та гасіння пожежі різними засобами.

Таблиця 7.2

Похідні дані для розрахунку:	
1) Швидкість повітря, u (м/с) =	0,15
2) Довжина зони горіння, l (м) =	5,61
3) Відношення обсягу зони горіння до загального обсягу, V_z/V =	0,14

Продовження таблиці 7.2

Похідні дані для розрахунку:	
4) Час максимуму температури, $t(xв) =$	20,27
5) Глибина прогріву масиву, Δr (м) =	0,071
6) Крок за часом, $\Delta t(c) =$	18,7
7) Площа укладання горючого матеріалу, $F(m^2) =$	16,83
8) Кількість кроків до максимуму, $n_l =$	65
9) Показник швидкості випаровування води, $\gamma =$	0,06
10) Дольова участь усіх засобів, $\delta =$	0,10
11) питома теплота випаровування, $r =$	5,42
12) критерій теплоємності повітря, $A =$	0,021
13) критерій теплової енергії пожежі, $B =$	757,21
14) число Стантона, $St =$	5,38
15) число Фур'є, $Fo =$	0,00093
16) Частка свіжого повітря при рециркуляції або без, $Q_1/Q =$	0,10
17) Частка кисню, що надходить в струмінь повітря, $C_1/C_o =$	1,00
18) Частка непридатної поверхні при подачі порошку, $\varepsilon =$	0,00
19) Частка непридатної поверхні при подачі води, $\varepsilon =$	0,00
20) Відносна вологовміст кисть при подачі води, $U =$	0,00
21) Частка непридатної поверхні при подачі піни, $\varepsilon =$	0,62
22) Витрата води в піні, $G_{ж}$ (кг/с) =	0,96
23) Відносна вологовміст кисть при подачі піни, $U =$	2,48

За допомогою таблиці 7.3 можна вибрати конкретний засіб гасіння пожежі, вказати в Excel початок і кінець гасіння, а також вказати режим гасіння і, проставляючи після цього в графі проти відповідного засобу пожежогасіння «1», тут же отримати в наочному графічному вигляді результати розрахунку, за якими можна судити про ефективність гасіння пожежі.

Таблиця 7.3

Вибір засобу пожежогасіння:	
1) Рециркуляція пожежних газів (так – 1, ні – 0):	1
підсоси повітря при рециркуляції, $Q_1/Q =$	0,10
2) Подача пари або інертного газу (так – 1, ні – 0):	0
концентрація кисню в парогазовій суміші, $C_1\% =$	5,0

Продовження таблиці 7.3

Вибір засобу пожежогасіння:	
3) Подача порошку (так – 1, ні – 0):	0
витрата порошку, G_{no} (кг/с) =	0,10
4) Подача диспергованої води (так – 1, ні – 0):	0
витрата води, G_w (кг/с) =	1,70
5) Подача піни (так – 1; немає – 0):	1
кратність піни перед осередком пожежі, K =	500

Нижче в наочному вигляді наведені приклади застосування того чи іншого засобу пожежогасіння та результати розрахунку параметрів гасіння пожеж.

Приклад 1. Розрахунок параметрів гасіння пожежі шляхом рециркуляції продуктів згоряння в кабельному тунелі

Задамо для розрахунку такі умови аналогічно [167]:

- довжина ізолюваного відсіку $L = 40$ м;
- площа поперечного перерізу ізолюваного відсіку $S = 2 \cdot 2 = 4$ м²;
- максимальна температура пожежних газів в ізолюваному відсіку кабельного тунелю $T^m = 700$ °C;
- початкова температура повітря $T_0 = 20$ °C;
- темп зростання температури при пожежі $\Delta T = 40$ °C/хв;
- пожежне навантаження, приведене до стандартної деревини, $q = 35$ кг/м²;
- витрата повітря, виходячи з темпу зростання температури в осередку в малорухомому середовищі [86], приймається рівною $Q = 0,4 - 0,6$ м³/с.

Кабельна продукція представлена широкою номенклатурою і розміщується в два ряди на полицях по обидві сторони тунелю [86]. Тому при висоті тунелю $h = 2$ м можна наближено прийняти ширину укладання горючого матеріалу по обидві сторони $b = 2 \cdot 1,5 = 3$ м.

Виходячи з прийнятих вихідних даних, на ЕОМ були визначені похідні дані для подальших ітераційних розрахунків динаміки в часі кисню і температури при пожежі в ізольованому кабельному тунелі без застосування засобів пожежогасіння, а потім із застосуванням рециркуляції пожежних газів при відносному підсосі повітря всього 10%, чого уникнути неможливо. При цьому для моделювання рециркуляції на ЕОМ досить в графі «рециркуляція» таблиці 7.2 проставити «1» замість нуля. Результати чисельних розрахунків в графічному вигляді при рециркуляції пожежних газів наведені на рис. 7.5.

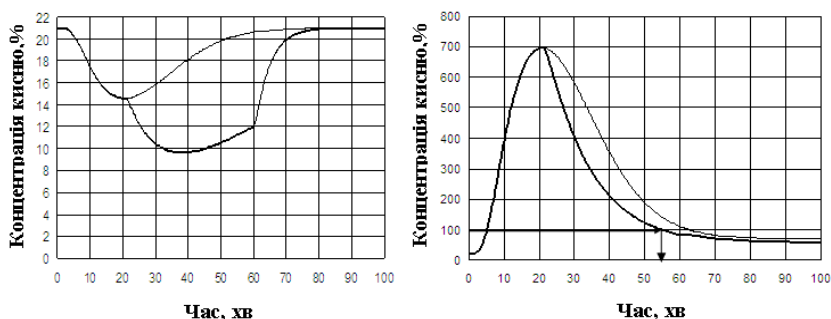


Рисунок 7.5. – Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізольованому відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при рециркуляції продуктів згоряння (жирні лінії) протягом 40 хвилин

Як показують результати розрахунків, рециркуляція пожежних газів протягом 40 хвилин, починаючи з 21-ї хвилини, не дає помітних результатів незважаючи на те, що концентрація кисню на короткий час знижувалася до 9%.

Так, час загасання пожежі зменшується всього на 10 хвилин. Це пояснюється великим об'ємом ізольованого відсіку $4 \cdot 40 = 160 \text{ м}^2$ при довжині зони горіння, як встановлено, $l_m = 5,6 \text{ м}$ і швидкості повітря $u = 0,15 \text{ м/с}$. Тому рециркуляцію пожежних газів доцільно здійснювати спільно з іншими засобами пожежогасіння.

Приклад 2. Розрахунок параметрів гасіння пожежі шляхом подачі в ізольований відсік тунелю парогазової суміші або інертного газу.

Вихідні дані для розрахунку розвитку пожежі приймалися ті ж, що і в попередньому прикладі № 1. Для подачі парогазової суміші або інертного газу з концентрацією кисню $C_1 = 5\%$ достатньо при моделюванні на ЕОМ в графі таблиці 7.2 проставити «1» замість «0».

Результати чисельних розрахунків в графічному вигляді при подачі парогазової суміші наведені на рис. 7.6

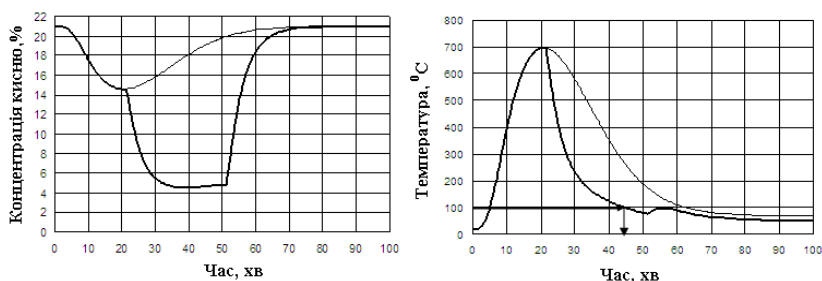


Рисунок 7.6. – Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізольованому відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при подачі парогазової суміші або інертного газу (жирні лінії) протягом 30 хвилин з концентрацією кисню 5%

Як видно за даними розрахунку (рис. 7.6), подача парогазової суміші або інертного газу протягом 30 хвилин призводить вже через 10 хвилин до зниження в осередку

пожежі концентрації кисню до 5%, після чого починається, по суті, охолодження палаючої поверхні. Температура при цьому знижується до 100 °С через 25 хвилин, однак не слід припиняти подачу інертних газів, тому що навіть через 30 хвилин після подачі газів спостерігається деякий незначний скачок температури від 90 °С до 100 °С.

Приклад 3. Розрахунок параметрів гасіння пожежі вогнегасним порошком в кабельному тунелі.

Вихідні дані для розрахунку розвитку пожежі приймалися ті ж, що і в прикладі № 1. Для подачі вогнегасного порошку достатньо при моделюванні на ЕОМ в відповідній графі таблиці 7.2 проставити «1» замість «0», попередньо прийнявши початок і кінець гасіння пожежі при відповідній витраті порошку.

Результати чисельних розрахунків в графічному вигляді при подачі вогнегасного порошку наведені на рис. 7.7.

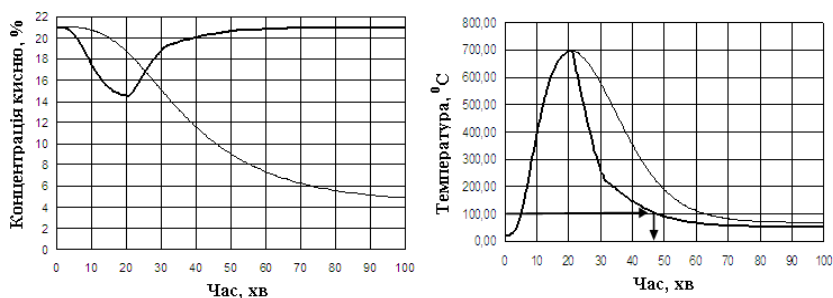


Рисунок.7.7. – Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при подачі вогнегасного порошку (жирні лінії) з витратою 0,1 кг / с протягом 10 хвилин

Ще одні результати чисельних розрахунків в графічному вигляді наведено на рис. 7.8 при рециркуляції пожежних газів і подачі вогнегасного порошку одночасно.

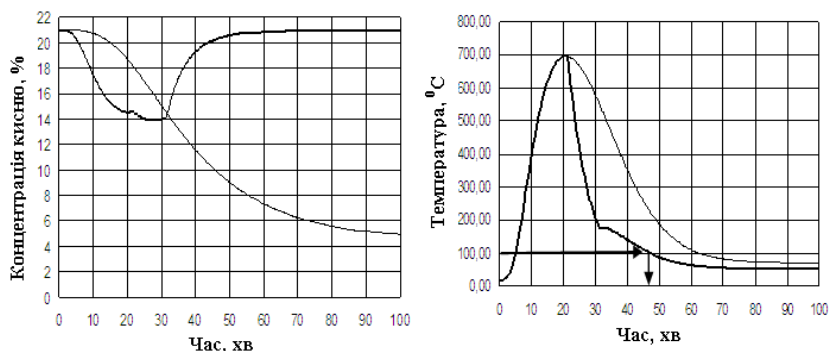


Рисунок 7.8.– Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при рециркуляції і подачі вогнегасного порошку з витратою 0,1 кг/с одночасно (жирні лінії) протягом 10 хвилин

Порівняння результатів розрахунку (рис. 7.7 і рис.7.8) показує, що застосування рециркуляції пожежних газів одночасно з подачею порошку має незначний вплив на прискорення гасіння пожежі. Так, при подачі тільки порошку температура знижується до 200 °С на 32-й хвилині, а додаткова рециркуляція пожежних газів дозволяє знизити температуру до цієї ж позначки на 30-й хвилині.

Загальна кількість порошку при його витраті $G_2 = 0,1$ кг/с дорівнюватиме $M = 0,1 \cdot 600 = 60$ кг. Його подача для економії повинна здійснюватися безпосередньо на осередок пожежі по сигналу сповісвачів, встановлених уздовж відсіку [86].

Приклад 4. Розрахунок параметрів гасіння пожежі дисперговою водою в кабельному тунелі

Вихідні дані для розрахунку розвитку пожежі приймалися ті ж, що і в прикладі № 1. Для подачі диспергової води достатньо при моделюванні на ЕОМ у відповідній графі таблиці 7.2 проставити «1» замість «0», попередньо прийнявши

– витрата одного зрошувача $G_2 = 1,7$ кг/с;

– діаметр крапель рідини $d_k = 1$ мм.

Результати чисельних розрахунків в графічному вигляді при подачі диспергованої води наведено на рис. 7.9.

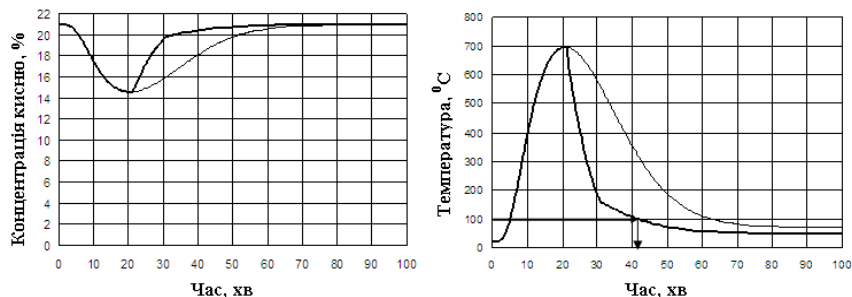


Рисунок.7.9. – Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при подачі диспергованої води протягом 10 хвилин

Як видно за даними розрахунку (рис. 7.9), подача диспергованої води протягом всього 10 хвилин призводить до швидкого зниження температури в осередку пожежі і вже через 9 хвилин вона досягає 200°C , а через 20 хвилин температура зменшується до 100°C , а концентрація кисню майже повністю відновлюється.

Приклад 5. Розрахунок параметрів гасіння пожежі піною на основі продуктів згоряння у відсіку кабельного тунелю.

Вихідні дані для розрахунку розвитку пожежі приймалися ті ж, що і в прикладі № 1. Для подачі піни на основі продуктів згоряння достатньо при моделюванні на ЕОМ у відповідній графі таблиці 7.2 проставити «1» замість «0», попередньо прийнявши:

- кратність піни $K = 1000$;
- діаметр крапель рідини $d_k = 0,1$ мм при руйнуванні піни при діаметрі бульбашок піни $d_n = 1$ мм;

При розрахунках приймається витрата піни рівною витраті повітря.

Результати чисельних розрахунків в графічному вигляді при подачі піни на основі продуктів згоряння наведені на рис. 7.10.

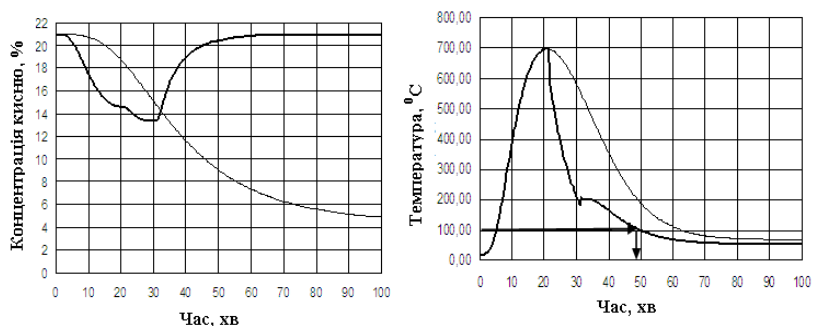


Рисунок 7.10. – Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогасіння (тонкі лінії) і при подачі піни на основі продуктів згоряння протягом 10 хвилин

Аналіз отриманих результатів розрахунку показує (рис. 7.10), що піна є ефективним засобом гасіння пожеж, як на основі продуктів згоряння, так і без них. Продукти згоряння лише в незначному ступені скорочують терміни гасіння пожежі.

Наведені приклади розрахунку із застосування різних засобів пожежогасіння дозволяють або безпосередньо використовувати їх при визначенні параметрів гасіння конкретної пожежі, або використовувати розроблену універсальну методику комп'ютерного розрахунку на ЕОМ в Excel будь-якого варіанта з будь-якими вихідними параметрами.

7.4. Технічні засоби гасіння пожеж в замкнутих об'ємах на об'єктах великої протяжності та нормативно правова база для їх застосування

Так, вибираючи з норм характеристику зрошувача ДВ, що встановлюється на сухотрубі кабельного тунелю, з витратою $1,7 \text{ кг/м}^3$, визначаємо загальну витрату води на один зрошувач $M = 1,7 \cdot 600 = 1020 \text{ кг}$. В роботі [167] вказується, що при

довжині тунелю 150 м необхідно 38 зрошувачів. Це означає, що відстань між зрошувачами вибирається рівною 4 м. При довжині відсіку кабельного тунелю 40 м необхідно 10 зрошувачів.

У зв'язку з цим пропонується спосіб розпилення води по обидві сторони тунелю з її подачею безпосередньо на бічні стінки, як зазначено на рис. 7.11.

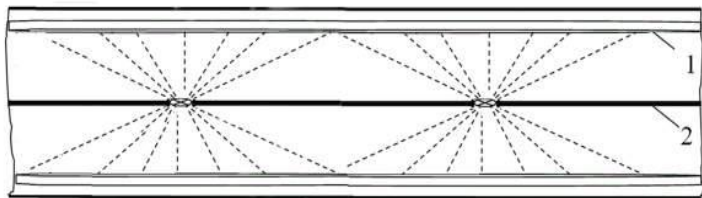


Рисунок 7.11. – Технологічна схема способу розпилення води по обидві сторони на бічні стінки кабельного тунелю (вид зверху, 1 – кабельна продукція, 2 – трубопровід)

Перевага запропонованого способу полягає в тому, що в цьому випадку в два рази збільшується зона зрошення з 4 м до 8 м і економиться загальна кількість води завдяки її подачі тільки на кабельну продукцію. В результаті у відсіку кабельного тунелю завдовжки 40 м можна встановлювати лише 5 зрошувачів типу ДВ. На цей спринклер подали патент на винахід.

Для зменшення ще більше витрати води її можна подавати, як показують розрахунки, всього 5 хвилин (рис.7.12).

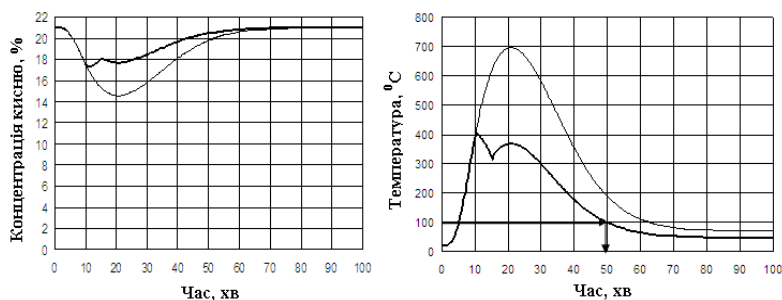


Рисунок. 7.12. – Динаміка в часі концентрації кисню і температури в ізолюваному відсіку тунелю при розвитку пожежі без застосування засобів пожежогашіння (тонкі лінії) і при подачі диспергованої води (жирні лінії) протягом 5 хвилин

При подачі води за такий короткий час температура не піднімається вище 400 °С і потім знижується через 40 хвилин від початку подачі до 100 °С. У такому разі загальна витрата води на гасіння пожежі буде дорівнює $M = 1,7 \cdot 300 \cdot 5 = 2550$ кг. Таким чином, для гасіння пожежі, а не для охолодження продуктів згорання за вогнищем, як у ряді робіт [124, 128, 204-206], потрібна одна автоцистерна АЦ -20 місткістю для води 2850 кг [200].

Для установок пожежогасіння розроблена водопінна речовина. Водопінна вогнегасна речовина складається з робочого розчину піноутворювача загального призначення для гасіння пожеж на основі динатрієвих солей моноефірів сульфоянтарної кислоти і вищих жирних спиртів, в яку додають оптимальну кількість карбаміду і гідрофосфат амонію, чим досягають покращення його показників якості. Наявність у водопінній вогнегасній речовині карбаміду і гідрофосфату амонію призводить до його стабілізації (зниження швидкості процесів гідролізу ПАР), зниження корозійної активності, підвищення вогнегасної ефективності піни, а також подовження терміну зберігання розчинів. Конкретні рецептури вказані в патенті [273, 274]. Водопінна вогнегасна речовина на основі піноутворювача загального призначення, що містить нормальні вторинні або первинні алкілсульфати натрію фракції $C_6 - C_{16}$, карбамід, поліетиленгліколь з молекулярною масою 400-5000, хромат карбаміду і воду, використовується як заряд до водопінних вогнегасників і стаціонарних систем пінного пожежогасіння, яка відрізняється тим, що вона складається зі стабілізатора та інгібітора корозії гідрофосфату амонію і оптимального вмісту карбаміду. На основі експериментальних досліджень показано, що додавання цієї речовини до робочих розчинів піноутворювачів у кількості від 5% до 15% призводить до підвищення вогнегасної ефективності на 25-80 % причому вміст карбаміду недоцільно підвищувати більше ніж на 15%.

Цей склад забезпечив можливість зберігання водопінних вогнегасних речовин (зарядів водопінних вогнегасників і стаціонарних систем пінного пожежогасіння) в стальних резервуарах, не захищених антикорозійним покриттям, а також при його наявності, що містить ушкодження, протягом нормованого проміжку часу між перезаряджаннями технічних засобів (не менше 12 міс.) із відповідністю їх встановленим вимогам за вогнегасною ефективністю, а також зниженням імовірності замерзання за низьких температур (близько $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) [191].

Ряд інших рецептур викладено в патентах [192-194] на основі піноутворювача AFFF спеціального призначення для гасіння пожеж класу А та В. На основі експериментальних досліджень показано, що додавання піноутворювача у кількості від 0,2 до 0,6% та KNO_3 від 10 до 18% призводить до підвищення вогнегасної ефективності речовини на 30-80%, причому вміст їх недоцільно підвищувати більше, за вказані межі.

На підприємстві «Універсальна бурова установка» (м. Дрогобич) змонтована установка з гасіння кабельного тунелю інертною піною в основу якої покладені патенти на винахід та корисну модель [146, 185, 201].

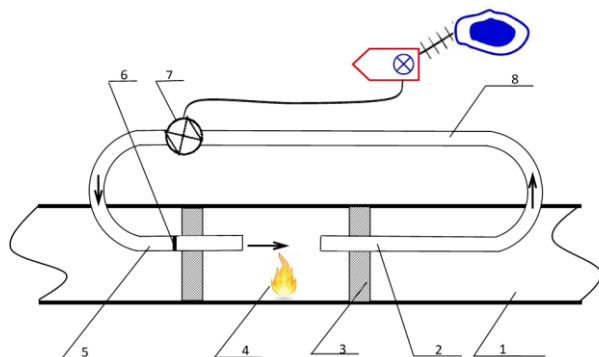


Рисунок 7.13. – Спосіб гасіння пожежі в ізольованій ділянці тунелю (в закритому об'ємі) інертною піною

На рис. 7.13 зображена схема способу гасіння в замкнених об'ємах інертною піною, де 1 – кабельний тунель; 2 – всмоктувальна частина трубопроводу; 3 – перемичка; 4 – вогнище; 5 – нагнітальна частина трубопроводу; 6 – пакет сіток для отримання інертної піни; 7 – вентилятор (димовсмоктувач) завдяки дії якого подається інертна піна в ізолювану ділянку; 8 – металевий повітропровід, що виконує функції рекуперативного теплообмінника.

З обох сторін кабельного тунелю (шахти, підвалу) 1, де виникла пожежа 4, встановлюємо брезентові перемички 3, чим зменшуємо об'єм для розповсюдження летких продуктів згорання, вмикаємо вентилятор (димовсмоктувач) 7, і леткі продукти згорання потрапляють в всмоктувальну частину трубопроводу 2, далі рухаються по металевому трубопроводу, який виконує роль рекуперативного теплообмінника 8, де охолоджуються потоком повітря, потрапляють в димовсмоктувач 7, з якого розчин піноутворювача та інертні гази подаються на пакет сіток 6, де утворюється інертна піна, далі в напірний трубопровід 5. В разі руйнування піни в зону горіння потрапляють збіднені на кисень леткі продукти згорання, що не підтримують процесу горіння. Піна високої або середньої кратності ($K > 100$) витісняє кисень з зони горіння та охолоджує зону горіння, температура в зоні горіння зменшується, що зменшує швидкість підготовки до горіння горючих матеріалів. Швидкому просуванню піни сприяє розрідження в об'ємі, яке створює вентилятор (димовсмоктувач) зі сторони всмоктувального трубопроводу. Для подачі та генерування піни використовується ПГУ-120 вдосконаленої конструкції, та димовсмоктувач відповідної потужності. ПГУ-120 дає $2\text{ м}^3/\text{с}$ піни.

Використовують ПГУ при об'ємному гасінні (рис. 7.15).

Для отримання піни високої кратності ($K = 200 - 1000$) за допомогою димовсмоктувача, в його комплект входить

піногенераторна установка ПГУ-120 (120 – продуктивність по розчину – л/хв). Використовують ПГУ при об’ємному гасінні.



Рисунок 7.14. – Загальний вигляд ПГУ-120 для ДП-7 та ДП-10:
1– трубопровід із розпилювачем та сіткою; 2–перкалевий рукав

Вона складається з: перкалевого рукава; сітки; з’єднувальної головки $d=51$ мм; трубопроводу; розпилювача; захисних ґраток; маслянки.

Принцип дії ПГУ такий же як і ГПС-200, 600, 2000. ПМП отримують в результаті змішування 3-х компонентів: води, піноутворювача і повітря. Для отримання піни використовується 6% розчин ПУ з водою, при цьому дозатор пінозмішувача ПЗ-5 на насосі автоцистерни ставлять на поділку 1.

Під’єднують до напірного патрубку ДП-10 ПГУ. З’єднують ПГУ з ПН (пожежним насосом) напірним пожежним рукавом $d=51$ мм, під’єднують пожежні напірні рукава до гідротурбіни і подають воду для її приводу. Початковий тиск води на роботу гідротурбіни не повинен перевищувати 4 кгс/см^2 , а тиск перед ПГУ – $2...3 \text{ кгс/см}^2$. Від пожежного автомобіля по напірному рукаву, з’єднаному з головкою ПГУ-120, 6 – 12% розчин піноутворювача по трубопроводу потрапляє до розпилювача, де розпилюється і надходить на тканинну сітку. Потім повітря від працюючого димовсмоктувача видуває на сітці бульбашки піни високої кратності, яка по перкалевому рукаву димовсмоктувача подається до місця пожежі.

Режим роботи ПГУ вважається нормальним, якщо піна на виході з рукава заповнює його повністю, або не менше ніж на 2/3 його діаметра (перерізу).

При транспортуванні піни в приміщення зі складним плануванням, або при подачі її на висоту контроль за роботою ПГУ треба виконувати візуально. Якщо при цьому виходить розчин із рукава, то треба збільшити тиск води на вході в турбіну димовсмоктувача. Якщо ж рукав заповнюється піною менше ніж на половину його перерізу, то треба зменшити тиск на вході в турбіну. Оптимальне отримання піни високої кратності, як правило, можливе при плюсових температурах навколишнього середовища. Металеві всмоктуючі рукава, які виконують роль рекуперативного теплообмінника, підбираються за характеристиками димовсмоктувача, вентилятора. В разі необхідності може використовуватись димовсмоктувач пожежний з електроприводом Буран ДПЕ-30 ($Q=30000 \text{ м}^3/\text{год}$, $N_{\text{ав}}=17 \text{ кВт}$, маса 72 кг). Оптимальне розміщення димососу 4-5 метрів від входу в приміщення, де проводиться гасіння. Один пожежний легко і швидко може розвернути потужну вентиляційну систему, яка складається з одного або двох димовсмоктувачів Буран ДПЕ-30. Насос може запускатись дистанційно з пульта (рис. 7.15).



Рисунок 7.15. – Загальний вигляд димовсмоктувача Буран ДПЕ-30

Для гасіння великих об'ємів може використовуватись установка «Буря» або відповідні вентилятори, димовсмоктувачі.

Установка порошково-пінного пожежогасіння «Буря» (далі – ППУ) призначена для дистанційного комбінованого гасіння порошком і піною розвинених підземних пожеж в горизонтальних, похилих і вертикальних виробках, що провітрюються завдяки загальношахтній депресії, або в тупікових виробках, що провітрюються вентиляторами місцевого провітрювання.

Дія ППУ ґрунтується на використанні енергії високонапірного вентилятора місцевого провітрювання ВМЦ- 8 ГОСТ 6825-75.

ППУ (рис. 7.16) складається з високонапірного вентилятора місцевого провітрювання 2, порошкової установки 1, піногенератора 3 з повітророзподілювачем.

Вентилятор 2, піногенератор 3 і скринька для запчастин та приладдя розміщені і закріплені на рамі 5 шахтної вагонетки ВГ- 3,3, до якої приварено металевий кутник 6 для кріплення порошкової установки.

Повітряно-механічна піна утворюється шляхом набризкування водного розчину піноутворювача з розпилювачів колектора на сітку, через яку продувається повітря вентилятором ВМЦ- 8.

Вогнегасний порошок із заводської тари (поліетиленові і паперові мішки) подається в порошкову установку і через повітророзподілювач і піногенератор транспортується повітряним потоком в супутній вентиляційний потік.

Піну і порошок можна подавати також по вентиляційному трубопроводу діаметром 600 мм на відстань до 300 м.

Порошкова установка використовується для прийому і регулювання витрати вогнегасного порошку.

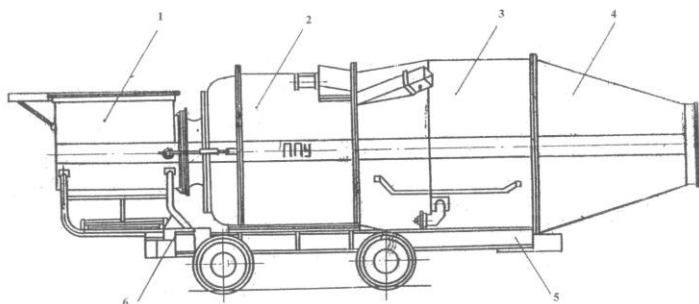


Рисунок 7.16. – Установка порошково-пінна «Буря»

1 – порошкова установка; 2 – вентилятор; 3 – піногенератор;
4 – перехідник; 5 – рама; 6 – металевий кутник

В каналах з висотою більше 2-х метрів можна використати ствол ПЛСК-700 або ствол комбінованої подачі піни низької та середньої кратності. На рис. 7.18 представлено конструктивну схему комбінованої лафетної установки ПЛСК-700-1 (в складі ГПС-600 і одного ствола СПП-4), яка пройшла полігонні випробовування та прийнята на озброєння пожежного потяга залізничної станції Львів (рис. 5.5) [196].

Конструкція складається із рами 4, до якої кріпиться трубопровід 1, підрамник 5 та пара коліс 3. До трубопроводу прикріплено шарнірну основу ствола 2, яка має можливість повертатися у вертикальній площині на величину кута, що дорівнює 75° . Основа приводиться в рух стійкою 6 та фіксується (при потребі) в певному положенні фіксатором стійки. До основи ствола 6 також кріпиться ствол повітряно-пінний СПП-4 (8), до якого прикріплено генератор піни середньої кратності ГПС-600 (7). Розчин води з піноутворювачем подається від пінозмішувача пожежної машини (потяга) двома пожежними рукавами до трубопроводу (1) та відцентрового розпилювача ГПС-600 (7), які з'єднуються з рукавами з допомогою головок муфтових

відповідних діаметрів (9) та (12). Ствол кріпиться до основи з допомогою такої ж муфти (10) та головки цапфової (11) (рис. 7.13; 7.14).

Слід відмітити, що основні конструктивні елементи установки, а саме ствол СПП, генератор ГПС, з'єднувальні головки муфт є стандартними виробами.

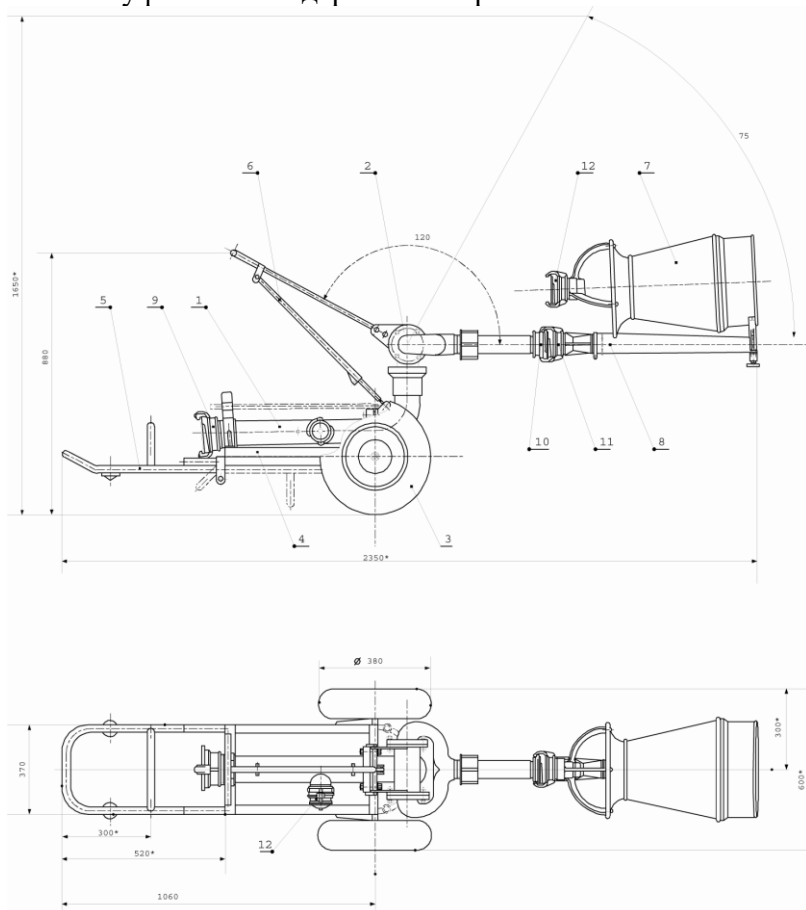


Рисунок 7.17. – Конструктивна схема комбінованої лафетної установки ПЛСК-700-1 (в складі ГПС-600 і одного ствола СПП-4).

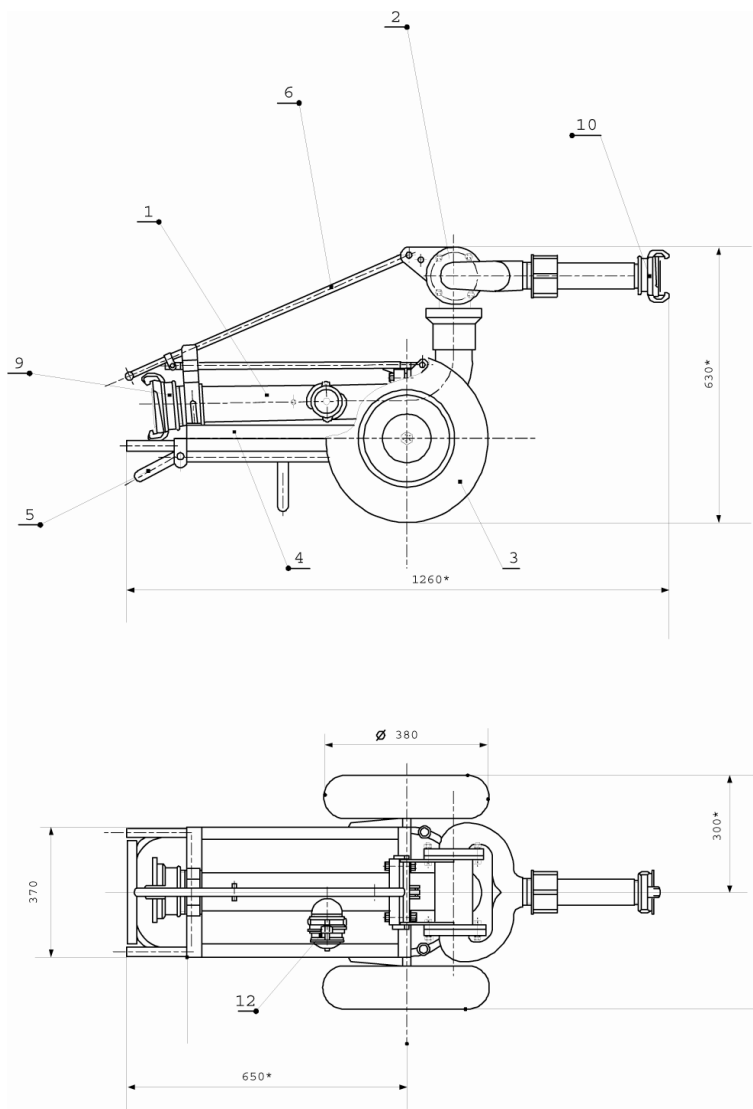


Рисунок 7.18. – Конструктивна схема комбінованої
лафетної установки ПЛСК-700 у складеному стані.

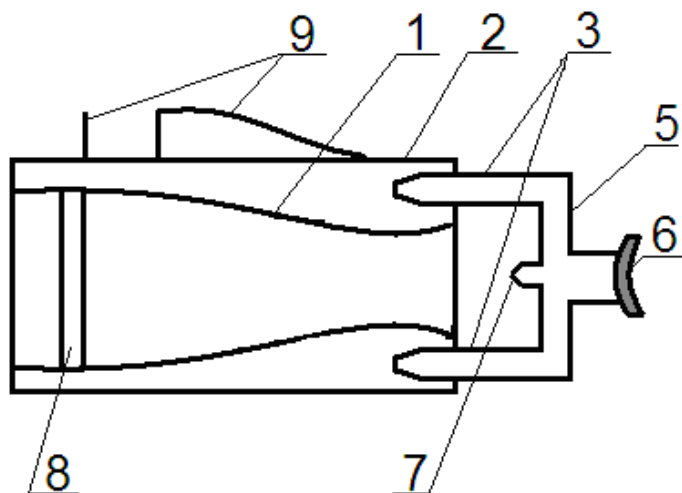


Рисунок 7.19. – Ствол комбінованої подачі піни низької та середньої кратності для гасіння пожеж

Проведені дослідження дали можливість розробити новий ствол з підвищеною дальністю подачі піни (рис. 7.19).

Установка пожежогасіння, що складається з корпусу типу ствола ГПС, з кожуха зі заспокоювачами, двох сопел, трійника зі з'єднувальною муфтовою голівкою для приєднання рукавної лінії, а також установка має на верхній частині кожуха ручку для утримування установки під час її застосування, розпилювача 7 та пакета сіток 8 [197].

Робота установки полягає в одночасній подачі піни низької та середньої кратності. Струмінь піни середньої кратності транспортується струменем піни низької кратності, який виходить зі ствола по зовнішньому периметру, що дає можливість подавати піну на більші відстані без значної фрагментації до моменту їх сумісного падіння. В результаті дії на зону горіння комбінованого струменя спочатку з полум'ям контактує піна низької кратності, яка має підвищений вміст води і знижує температуру полум'я та нагрітих поверхонь.

Типова технологія дистанційного гасіння пожеж парогазовою сумішшю активним способом включає два основні етапи [159, 177]:

- на I етапі проводиться заміщення повітря, що поступає в аварійне приміщення, парогазовою сумішшю з метою запобігання небезпеки вибуху і ліквідації полум'яного горіння;
- на II етапі забезпечується провітрювання аварійного приміщення (зони горіння) парогазовою сумішшю протягом часу, достатнього для охолодження осередку горіння і огорожуючих конструкцій до температури, що виключає рецидив пожежі після припинення подачі газовадної суміші.

Підготовка до інертизації атмосфери аварійного приміщення виконується одночасно з безперервними діями щодо заборони розповсюдження пожежі засобами безпосереднього гасіння [40, 131].

Після прийняття керівником гасіння пожежі рішення про перехід до дистанційного активного гасіння пожежі із застосуванням удосконаленої установки АГВГ-100М [198] повинні бути виконані в мінімальні терміни такі підготовчі заходи:

- не припиняючи активних дій з безпосереднього гасіння і локалізації пожежі доставити на аварійний об'єкт установку АГВГ-100М;
- виходячи з оцінки пожежної обстановки на об'єкті (об'єм аварійного приміщення, температура і тиск в аварійному приміщенні, небезпека вибуху, обвалення і ін.) визначити місце розташування установки АГВГ-100М з метою захисту техніки і персоналу від можливих уражень;
- розробити оперативний план дистанційного активного гасіння інертизацією, який негайно повинен бути прийнятий до виконання у разі виникнення ускладнень при гасінні засобами безпосередньої дії на осередок горіння;
- виконати розрахунки тривалості провітрювання осередку горіння парогазовою сумішшю для запобігання

небезпеки вибухів, припинення полум'яного горіння і охолодження осередку горіння і огорожуючих конструкцій приміщення;

- виконати розрахунок втрат тиску у вентиляційному трубопроводі виходячи з вибраних відстані від установки до осередку пожежі $L_{\text{ТР}}$, діаметра трубопроводу $d_{\text{ТР}}$ і витрати газоводяної суміші $q_{\text{ПГ}}$;

- виконати розрахунок витрати охолоджуючої води в камері охолодження установки;

- виконати розрахунок втрат тиску газоводяної суміші в камері охолодження установки;

- виконати розрахунок сумарної втрати тиску в тракті газоводяної суміші від установки до осередку пожежі;

- перевірити виконання умови (3.18);

- якщо умова не виконується, необхідно підвищити тиск в установці або зменшити відстань до осередку пожежі;

- організувати транспортний ланцюжок із доставки палива до місця розташування установки;

- організувати подачу води в камеру охолодження установки;

- розробити заходи щодо виконання розвідки аварійного об'єкта після завершення інертизації і розрахункового часу охолодження осередку пожежі;

- передбачити варіанти тактичних дій на випадок, якщо протягом розрахункового часу роботи установки не вдасться охолодити осередок горіння і огорожуючі конструкції до безпечної температури, і можливий рецидив пожежі після припинення подачі газоводяної суміші;

- доставити до установки паливо;

- виконати роботи, передбачені регламентом технічної підготовки АГВГ-100М до подачі газоводяної суміші на аварійний об'єкт;

- запустити установку. В першому наближенні можна вважати, що вміст кисню буде знижений до розрахункового

значення ($Ст = 8 \%$) за час, протягом якого установкою буде подано в аварійне приміщення кількість газоводяної суміші, рівну 6 об'ємам приміщення;

- на другому етапі інертизації ставиться задача охолодити осередок горіння і огорожуючі конструкції до температури, що виключає рецидив пожежі після припинення подачі газоводяної суміші. Орієнтовно можна прийняти, що час зниження температури до $100-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 3...5 раз перевищує тривалість активного горіння, а при природному охолодженні – в 15...20 раз;

- на останньому етапі поступово переходять від провітрювання аварійного приміщення парогазовою сумішшю до нормального режиму природного провітрювання, для чого поступово знижують кількість палива в установці так, щоб вміст кисню в парогазовій суміші за час однократного обміну а аварійному приміщенні підвищувався на 2-3 %.

Блок-схема тактико-технологічного застосування установки АГВГ-100М представлена на рис. 7.20, а алгоритм розрахунку параметрів роботи установки АГВГ-100М – на рис. 7.21.

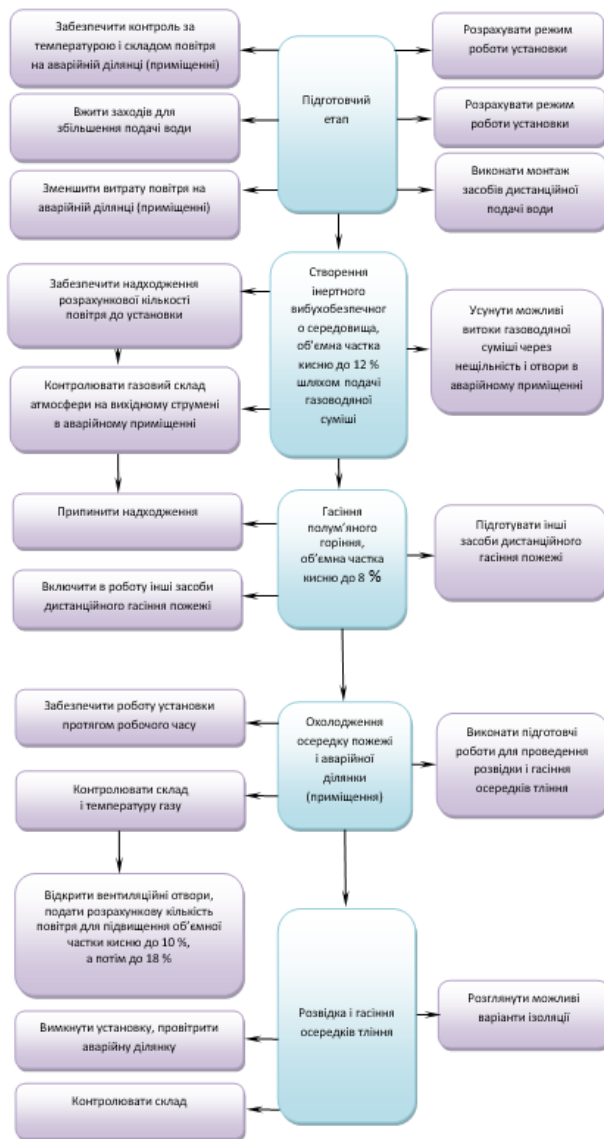


Рисунок.7.20. – Блок схема тактико-технологічного застосування удосконаленої установки для гасіння пожежі парогазовою сумішшю на аварійній ділянці (приміщенні) виробничого об'єкта

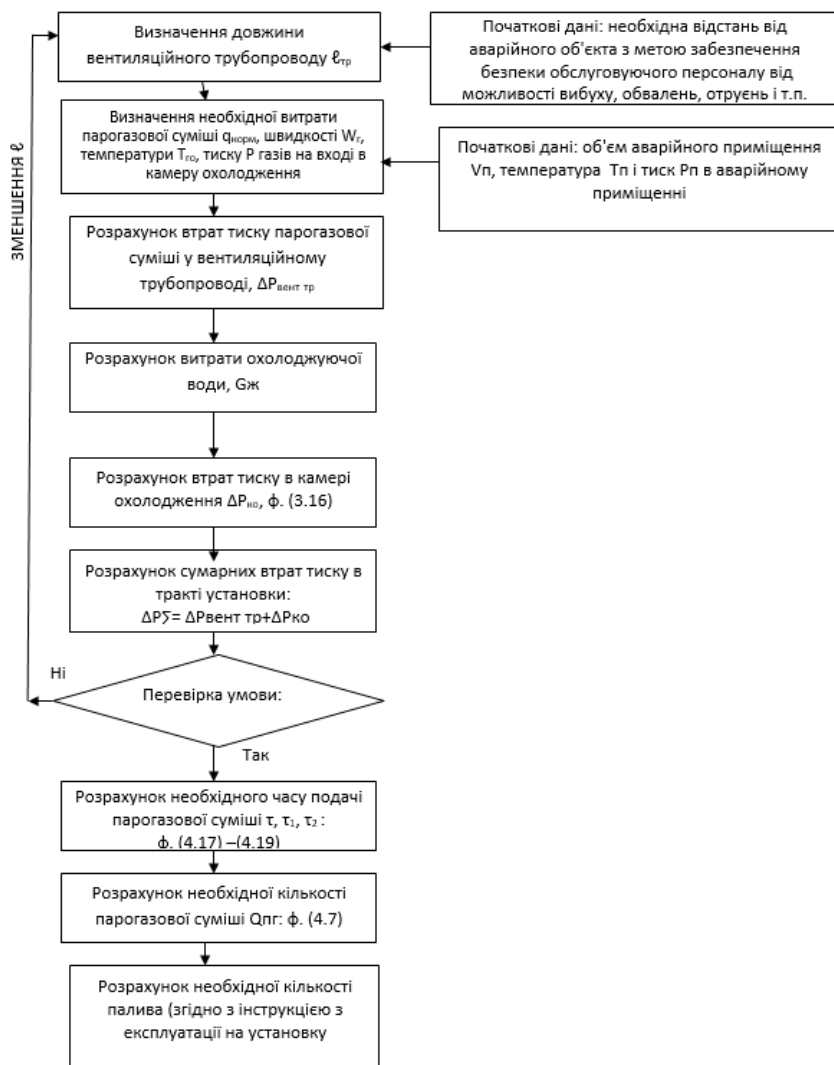


Рисунок 7.21. – Алгоритм розрахунку параметрів роботи удосконаленої установки АГВГ-100 М під час ліквідації пожежі

Методика випробувань передбачала виконання всіх операцій і дій з обслуговування установки, передбачених інструкціями з експлуатацій АГВГ-100, включаючи під'єднання камери охолодження, вентиляційного трубопроводу і систему водопостачання, контрольні виміри витрати тиску і температури газоводяної суміші.

Схема випробувань представлена на рис. 7.22.

Проведені випробування розробленої установки дають підставу зробити наступні висновки:

- установка працює надійно;
- фактичні параметри установки відповідають розрахунковим;

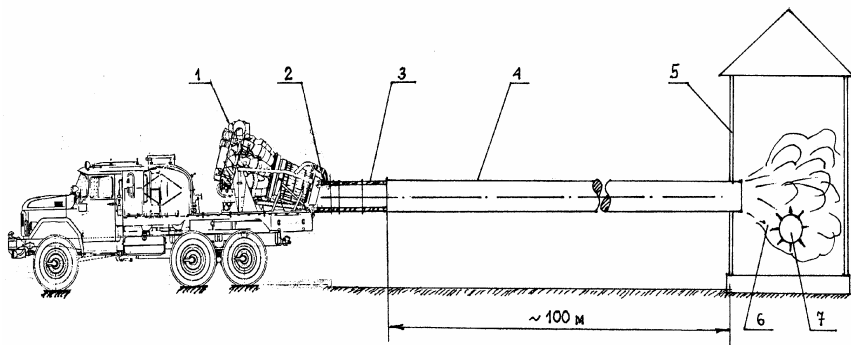


Рисунок 7.22. – Технологічна схема дистанційного гасіння

пожежі парогазовою сумішшю на об'єктах підвищеної небезпеки:

- 1 – двигун газотурбінний; 2 – трубопровід для подачі рідини; 3 – камера охолодження; 4 – труба вентиляційна; 5 – об'єкт підвищеної небезпеки; 6 – газоводяна суміш; 7 – осередок пожежі

Застосування розробленої установки значно знижує економічний збиток від пожежі.

Випробування установки були проведені під час ліквідації макетної пожежі в кабельному тунелі ТЕЦ-2. Загальна протяжність кабельних тунелів – понад 15 км. Вони розділяються на відсіки по 300 м протипожежними

перегородками і мають переріз від 1,6х1,8 м до 2,0х2,0 м. Максимальний об'єм відсіку становить 1500 м³. Кабельна продукція представлена широкою номенклатурою (основна маса кабелів – маслонаповнені марки ААВГ 70 % і ААШВ 30 %. Переріз 3х35-3х240 мм²). Кабелі розміщуються в тунелях в 2 рядах на кабельних полицях, забезпечених асбоцементними піддонами. Середня густина укладки кабелю становить 50 м/м. Переважаюча напруга 10 кВ. Середнє питоме пожежне навантаження, приведене до стандартної деревини, становить 35 кг/м².

Значна протяжність кабельних тунелів не дозволяє повністю захищати їх стаціонарними автоматичними системами пожежогасіння і вимагає використання пересувних засобів пожежогасіння. Гасіння пожеж в кабельних тунелях при сильному задимленні і інтенсивному зростанні температури (до 40 °С·хв-1) обумовлює необхідність виконання великого обсягу робіт, зокрема прокладання рукавних ліній, установки перемичок і димососів, пробиття отворів в стінах і т.д.

Макетну пожежу відтворили в кабельному тунелі цеху підготовки сировини. Загальний об'єм тунелю становив 1500 м³. Гасіння пожежі здійснювалося двома підрозділами пожежної охорони з використанням дослідного зразка установки АГВГ-100М.

Розрахунок тривалості інертизації за наведеною в п. 4.2 методикою показав, що інертне середовище в кабельному тунелі може бути створене за 5-10 хвилин роботи установки. Установка АГВГ-100М була встановлена за 50 м від входу в кабельний тунель. Була змонтована камера охолодження газоводяної суміші з підведенням охолоджуючої води від АЦ, вентиляційний трубопровід з металевих труб діаметром 0,6 м, кінець яких був з'єднаний з входом в тунель.

Установка була запущена в роботу через 20 хвилин після виникнення пожежі і пропрацювала 15 хвилин на режимі з продуктивністю 35-40 м³/с. Внаслідок цього вміст кисню в кабельному тунелі знизився з 18,4 % до 10,5 %, що свідчило про створення інертної атмосфери в тунелі.

Для подальшого зниження концентрації кисню протягом 30 хвилин продовжувалося нагнітання газовойдної суміші в тунель. Всього установка пропрацювала 45 хвилин, внаслідок чого в ізолювану протипожежними дверми ділянку кабельного тунелю було подано 81000 м³ газовойдної суміші, що дозволило знизити концентрацію кисню в тунелі до 4,7 % і ліквідувати полум'яне горіння. Подальша ліквідація пожежі (охолодження нагрітих конструкцій) здійснювалася шляхом подачі води в прокладений в кабельному тунелі сухотруб із зрошувачами типа ДВ і ДР.

Таким чином, позитивними результатами приймальних випробувань установки АГВГ-100М була підтверджена обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і тактико-технічних рекомендацій щодо практичного застосування установки, сформульованих у роботі.

Дослідний зразок установки був успішно впроваджений в підрозділах пожежної охорони МНС України у Львівській області.

Крім того, комплекти конструкторської документації були розіслані по об'єктових пожежних частинах, що мають на озброєнні установки АГВГ-100.

В Україні розроблені правила пожежної безпеки для атомних електростанцій, в яких запроваджено використання розроблених методів та способів гасіння.

Розроблена інструкція (методика) з визначення оптимальних параметрів гасіння в довгих каналах.

Висновки

1. Узагальнено результати математичного моделювання, адекватні численним експериментальним даним з розвитку та гасіння пожеж різними засобами в каналах великої протяжності, і створена універсальна математична модель. Розроблена модель дає можливість у разі застосування того чи іншого засобу пожежогасіння проводити розрахунки параметрів інтенсивності і часу впливу на осередок для його гасіння, а також визначати кількість вогнегасного матеріалу, що витрачається.

2. Розроблено єдиний підхід до математичного моделювання розвитку та гасіння пожеж різними засобами, до яких відносяться: рециркуляція пожежних газів в ізольованому обсязі; інертизація атмосфери ізольованого відсіку каналу шляхом подачі в нього парогазової суміші або інертного газу або і того й іншого одночасно; порошкові засоби пожежогасіння одночасно з рециркуляцією пожежних газів; подача диспергованої води на осередок пожежі; подача піни на основі пожежних газів при їх рециркуляції в замкнутому контурі.

3. Модернізована класична система диференціальних рівнянь тепломасопереносу з її реалізацією на ЕОМ в кінцевих різницях за комбінованою схемою (явної і неявної з однаковою питомою вагою). Використання модулів числа в різних формулах дозволило без умовних переходів безпосередньо проводити розрахунки необхідних параметрів для подальшого моделювання термо-газодинамічних процесів при пожежах.

4. Розроблено алгоритм і програма розрахунку на ЕОМ в Excel динаміки в часі концентрації кисню у осередку пожежі та перед ним, динаміки температури в осередку і в навколишньому масиві.

Усі завдання розрахунку газодинамічних параметрів у протяжних об'єктах при пожежах розбиті на два класи: задачі виникнення і розвитку пожеж без застосування засобів гасіння і з їх застосуванням.

До першого класу віднесено завдання природного розвитку і затухання пожежі. До другого класу віднесено завдання оперативного прогнозу і реагування на ситуацію, що трапилася шляхом застосування того чи іншого засобу пожежогасіння.

5. В результаті розроблених алгоритмів і програми розрахунку термо-газодинамічних параметрів горіння і гасіння пожежі в ізолюваному об'ємі каналу представляється можливість дати в наочному графічному вигляді прогноз на ЕОМ в Excel ефективності застосування того чи іншого засобу пожежогасіння і визначити, як тривалість його застосування, так і кількість матеріалу, що витрачається.

6. Наведено численні приклади реалізації розробленої програми розрахунку на ЕОМ параметрів розвитку і гасіння пожежі в кабельному тунелі різними засобами з використовуваними відомими даними швидкості розвитку пожежі і виходу на максимум температури 700 °С. Отримані результати розрахунку дозволяють заздалегідь оцінити той чи інший засіб пожежогасіння і наочно переконатися в його перевазі чи недоліках.

7. Запропоновано технологічні схеми і способи гасіння пожежі в кабельному тунелі, що відрізняється від відомих способів тим, що подача будь-якого засобу в будь який відсік тунелю здійснюється по трубах з викидом, зокрема, порошку або диспергованої води через розпилювачі в протилежні сторони ізолюваного відсіку каналу і на бічні стінки, що дозволяє скоротити кількість розчину, що витрачається та кількість стояків та розпилювачів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми, полягає у розвитку наукових основ гасіння пожежі в закритих об'ємах великої протяжності шляхом розкриття закономірностей процесів розвитку пожеж та їх гасіння на об'єктах значної протяжності від потужності джерела горіння, концентрації кисню і площі поверхні горіння з урахуванням піролізу твердих горючих матеріалів та розроблення на цій основі високоефективних технологій пожежогасіння.

1. Отримано аналітичні залежності концентрації кисню і температури по довжині каналу в потоці повітря в квазістаціонарному режимі для будь-якого фіксованого часу з моменту виникнення пожежі.

Результати математичного моделювання з використанням запропонованих залежностей показали, що концентрація кисню при зосередженому джерелі піролізу і тепловиділення спочатку різко знижується, а потім виходить на певний рівень, що залежить від потужності джерела. Це викликає різке підвищення температури в потоці повітря до значень, що також залежать від потужності джерела піролізу і тепловиділення. Встановлено, що при розосередженому джерелі (з його збільшенням по довжині) концентрація кисню спочатку майже не змінюється поблизу місця виникнення пожежі, а потім починає різко зменшуватися. Це призводить до зміни температури, яка повільно збільшується і лише біля фронту полум'я різко зростає, що говорить про перехід горіння на режим тління у місці виникнення пожежі.

2. Встановлено адекватність розробленої математичної моделі натурним об'єктам при виникненні і розвитку пожежі за даними експериментальних досліджень горіння твердих матеріалів (дерева) в натурних умовах, з масштабом моделювання 1:1 при довжині пожежного

навантаження від 30 м до 165 м. Результати порівняння теоретичних і експериментальних даних показали, що вони задовільно узгоджуються один з одним і адекватно відображають фізику процесів, котрі відбуваються, вказуючи на нерозривний зв'язок температури з концентрацією кисню в газовому середовищі.

3. Розроблена та виготовлена установка з дослідження процесів горіння в закритих об'ємах та визначення ефективності гасіння різними вогнегасними речовинами пожеж класу А, В. Проведено експериментальні дослідження в лабораторних умовах виникнення і розвитку пожеж в кабельних тунелях із геометричним масштабом моделювання 1:4, що відповідає реальному об'єкту з приведеним діаметром 2 м і довжиною каналу до 10 м при числі Рейнольдса до 10000, що знаходиться в турбулентній області течії газів.

4. Встановлено при експериментальних дослідженнях в лабораторних умовах, що концентрація кисню в зоні горіння може знижатися до 5%, що підтверджується даними дослідження великомасштабних пожеж, а також даними математичного моделювання, вказуючи, тим самим, на нерозривний зв'язок процесів газообміну і теплообміну при пожежах.

5. Вперше використано узагальнений підхід до оцінки впливу різних засобів пожежогасіння в протяжних об'єктах із врахуванням зменшення площі горіння поверхні (порошки) або з одночасним охолодженням пожежних газів при випаровуванні крапель рідини (диспергована вода, піна), а також за рахунок зменшення вмісту кисню в зоні горіння (рециркуляція, парогазові суміші, інертний газ).

6. Уточнено механізм впливу вогнегасних порошоків і диспергової води на вогнище пожежі. У першому випадку, порошок, потрапляючи на вогнище, при високій температурі

розплавляється та спікається, утворюючи тверде склоподібне покриття типу плівки, яке перешкоджає проникненню продуктів піролізу до зони горіння і перериває ланцюгову реакцію горіння за рахунок інгібування активних центрів полум'я. У другому випадку, вода в аерозольному стані випаровується в зоні горіння, знижуючи концентрацію кисню і температуру зменшуючи поверхню горіння в залежності від діаметра капель рідини.

7. Розкрито механізми динаміки піни як реологічної рідини та динаміки руху порошку і диспергованої води в полі сили тяжіння при їх русі від місця подачі до вогнища пожежі, що полягають в тому, що створюється у вертикальній площині неоднорідне двофазне середовище з різкою межею фаз для пінного та газового потоку і розмитою межею для дрібнодисперсної рідини і порошку з максимумом в нижній та мінімумом в верхній точці каналу.

8. Розроблено уніфіковану математичну модель на основі класичних диференціальних рівнянь переносу теплогазообміну, враховуючи окремо та в комплексі п'ять різних засобів пожежогасіння (піна, порошки, диспергована вода, парогазова суміш, рециркуляція пожежних газів). Встановлено адекватність розробленої математичної моделі численними експериментами з дослідження розвитку і гасіння малих та великомасштабних пожеж в каналах різної протяжності при горінні деревини та кабелю.

9. Вперше встановлено закономірності розвитку і гасіння пожеж в протяжних об'єктах різними способами пожежогасіння в залежності від потужності вогнища, концентрації кисню і площі поверхні горіння, що змінюється під дією диспергованої рідини і порошоків із врахуванням піролізу твердих горючих матеріалів.

Отримано аналітичні і числові рішення мережевих задач розвитку і гасіння пожеж різними засобами, що дозволяє вибрати з них конкретний засіб і визначити місце його встановлення, інтенсивність подачі на вогнище, встановити тривалість гасіння і кількість необхідної вогнегасної речовини. Наведено численні приклади реалізації розробленої комп'ютерної програми розрахунку параметрів розвитку і гасіння пожежі в кабельному тунелі різними засобами з використовуваними відомими даними швидкості розвитку пожежі і виходу на максимум температури 700 °С. Отримані результати розрахунку дають змогу заздалегідь оцінити той чи інший засіб пожежогасіння і наочно переконатися в його перевазі чи недоліках.

10. Вперше аналітично обґрунтовано і експериментально підтверджено залежність потужності джерела горіння від концентрації кисню, випаровування рідини і розкладу порошку та математичним моделюванням на ЕОМ отримано наочне уявлення про вплив того чи іншого засобу пожежогасіння на процеси горіння в ізолюваному об'ємі кабельного тунелю або іншого об'єкту, що дозволяє вибрати необхідні параметри гасіння з мінімальними затратами за короткий термін.

11. Запропоновано технологічні схеми та способи гасіння пожежі в ізолюваній ділянці тунелю (рециркуляцією продуктів згоряння, інертизованою піною, диспергованою водою, вогнегасними порошками, комбінованим способом) та спосіб гасіння пожежі в кабельному тунелі, що відрізняється від відомих способів тим, що подача будь-якого засобу в будь який відсік тунелю здійснюється по трубах з визначеною витратою, наприклад, порошку або диспергової води через розпилювачі в протилежні сторони ізолюваного відсіку каналу і на бічні стінки, що дозволяє скоротити вдвічі кількість розпилювачів та

зменшити кількість використаних вогнегасних речовин. Результати досліджень впроваджено при створенні установки пожежогасіння інертною піною в кабельному тунелі ТОВ «Універсальна бурова техніка» м. Дрогобича.

12. Результати роботи використано під час обґрунтування вимог пожежної безпеки, розробленні таких основних галузевих нормативно-правових документів:

– «Відомчі норми технологічного проектування «Визначення категорій приміщень та будівель підприємств залізничного транспорту за вибухопожежною та пожежною небезпекою та переліку об'єктів, що підлягають обладнанню автоматичними установками пожежогасіння та пожежної сигналізації» (НАПБ В.06.011-2012/510);

– «Правила пожежної безпеки при експлуатації атомних електростанцій», де пропонуються до використання розроблені в дисертації методи та способи гасіння (проект погоджено Держтехногенбезпекою та ДП НАЕК «Енергоатом», 2012 р.);

– «Методика розрахунку параметрів гасіння пожежі різними засобами пожежогасіння у протяжних каналах (кабельних тунелях)», (затверджено Держтехногенбезпекою 04.04.2012 р.), що дозволяє дати прогноз на ЕОМ в Excel ефективності застосування засобу пожежогасіння та визначити необхідні параметри гасіння: тривалість застосування, кількість вогнегасної речовини, необхідність комбінованого гасіння, з графічним відображенням процесів гасіння;

– «Методика з визначення оптимальних параметрів гасіння в довгих каналах, технологічних схем отримання інертної газоводяної суміші на мобільних установках типу АГВГ-100» і рекомендації з тактики застосування установок при гасінні пожежі інертними газоводяними сумішами на об'єктах».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інформація про пожежі у кабельних тунелях в Україні за 2014-2023 роки, ІДУЦЗ, 2024
2. Тушение пожаров в кабельных каналах // Brandschutz / Deutsche Feuezwehr-Zeitung. – 1976. – № 12. – Р. 317 – 319.
3. Установки пожаротушения в туннелях. How the west wasn't won / Robisheaux Ed. // Fire Syst. – 1988. – 2, № 4. – С. 8 – 12.
4. Пожежна безпека. Загальні положення :ДСТУ 8828:2019. [Введено в дію 01.01.2020]. – К. ДП УкрНДНЦ – 84 с.
5. Ковалишин В. В. Визначення вогнегасної ефективності інертної піни / В. В. Ковалишин, Т. В. Бойко, Р. Я. Лозинський // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л., 2010. – № 17. – С. 26 – 33.
6. Звіт про НДР «Провести моніторинг стану з пожежами в Україні за 2010 рік та надати науково-методичну допомогу з питань діяльності дослідно-випробувальних лабораторій в областях та м. Київ. – К.:УкрНДПБ МНС України, 2010. – 733 с.
7. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT) – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2014. – 7 с.
8. Протипожежний захист. Вогнегасні речовини. Вимоги до вогнегасних порошків (крім порошків для гасіння пожеж класу D). ДСТУ EN 615:2017. (EN 615:2009, IDT) – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2017.
9. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробувань : ДСТУ 3789-2015. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2015 – 29 с. – (Національний стандарт України).
10. Газові вогнегасні речовини. Номенклатура показників якості. Загальні технічні вимоги. Методи випробувань: ДСТУ 3958-2000. – [Чинний від 2004.04.06]. – К. : Держспоживстандарт України, 2000. – 62 с. – (Національний стандарт України).
11. Піноутворювачі спеціального призначення, що використовуються для гасіння пожеж водонерозчинних і

водорозчинних горючих рідин. Загальні технічні вимоги і методи випробувань: ДСТУ 4041-2001. – [Чинний від 2001.06.27]. – К. : Держспоживстандарт України, 2001. – 52 с. – (Національний стандарт України).

12. Основи теорії розвитку і припинення горіння / [Єлагін Г.І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М.]. – Черкаси : ЧПБ, 2001. – 448 с.

13. Теорія розвитку та припинення горіння. Електронний підручник / [Трегубов Д.Г., Тарахно О.В., Жернокльов К.В. – Х.: УЦЗУ, 2007. – <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10588>.

14. Лавренюк О.І. Теорія горіння та вибуху: навчальний посібник//Лавренюк О.І., Баланюк В.М., Михалічко Б.М. – Львів. : ЛДУ БЖД, 2014. – 130 с.

15. LIU Sanwei, HUANG Fuyong , GONG Liang, DUAN Xiaoli, CHAO Yafeng, DUAN Jianjia, YUE Yishi. Research summary of cable channel fire extinguishing technology. E3S Web of Conferences 233, 04022 (2021)

16. Круковский П. Г. Теплофизический анализ системы «короб-кабель» в условиях стандартного температурного решения по обеспечению их огнестойкости / Круковский П. Г., Рассамкин А. Б., Полубинский А. С. // Промышленная теплотехника. – 2004. – 26, № 5. – С. 41 – 47.

17. Ковалишин В.В. Дослідження з визначення небезпечних факторів пожежі в тунелях Пожарная техника и тактика тушения пожаров. Вісник ЛДУ БЖД. – Львів : ЛДУ БЖД, 2013. – № 8. – С. 141-145

18. Курбатов Б. Е. Исследование динамики тушения закрытых пожаров / Б. Курбатов, Н. Недбайло // Профилактика и тушение пожаров на объектах народного хозяйства: Тезисы докл. Республиканского науч.-техн. семинара. – Севастополь, 1988. – 146 с.

19. Дебров С. В. Дистанционная подача высокочастотной пены по кабельным сооружениям при тушении пожаров: дис.

... канд. техн. наук : 05.26.03 / Сергей Владимирович Дебров. – К., 2004. – 199 с.

20. Игишев В. Г. Опыт применения водовоздушной пены для предупреждения и тушения эндогенных пожаров / В. Г. Игишев // Уголь Украины. – 1976. – №8. – С. 59 – 62.

21. Пашковский П. С. Новая технология предотвращения эндогенных пожаров в выработанных пространствах КМЗ / П. С. Пашковский // Уголь Украины. – 1994. – № 11. – С. 36 – 38.

22. O. Nuianzin, S. Sidnei, P. Zayika, S. Fedchenko, B. Alimov. Determining the Dependence of Fire Parameters in a Cable Tunnel on its Characteristics. 2021, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, № 1, с. 012023

23. Пашковский П. С. Механизм подавления очагов самонагревания угля с помощью газомеханической пены / П. С. Пашковский, Г. А. Гусар // Уголь Украины. – 1994. – № 9. – С. 22 – 23.

24. 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.

25. FIRETRACE. Automatic fire suppression system. Fire Protection for Cable Tunnels. Targeted protection. November 2009.

26. Ковалишин В. В. Дослідження процесів генерування піни потоком парогазової суміші / Ковалишин В. В., Бойко Т. В., Козяр Н. М. // Проблеми зниження ризику виникнення надзвичайних ситуацій в Україні: матер. VIII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників / УкрНДІПБ. – К., 2006. – С. 126 – 129.

27. Ковалишин В. В. Дослідження гасіння пожежі в кабельному тунелі рециркуляцією продуктів горіння / В. В. Ковалишин, С. Ю. Дмитровський // Проблеми зниження ризику виникнення надзвичайних ситуацій в Україні: матер. VIII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників / УкрНДІПБ. – К., 2006. – С. 129 – 132.

28. 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. – P. 37 – 138.

29. K. Ostapov, Y. Senchykhin, V. Avetisian, I. Kirichenko. Increasing the Efficiency of Extinguishing Fires in a Pressurized Space due to the Adhesive Properties of Gel-Forming Fire Extinguishing Compounds. 2023, Applied Mechanics and Materials, с. 77-86.

30. Ковалишин В. В. Аналитические исследования тепломассообменных процессов в закрытых объектах большой длины при возникновении пожаров / Ковалишин В. В., Бойко Т. В., Дмитровский С. Ю. // Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. тез. докл. III Междунар. науч.-практ. конф. / – Минск, 2006. – С. 157 – 159.

31. Ярембаш И. Ф. Компьютерное моделирование динамики температуры в изолированном выемочном участке шахты при рециркуляции пожарных газов / Ярембаш И. Ф., Зинченко И. Н., Ревякин А. В. // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 126 – 131.

32. Козяр М. М. Дослідження процесів генерування піни потоком парогазової суміші / Козяр М. М., Ковалишин В. В., Бойко Т. В. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць / – Л. : ЛДУБЖД, 2006. – № 8. – С. 37 – 40.

33. D Guo, G Zhang, G Zhu, B Jia, P Zhang. Applicability of liquid nitrogen fire extinguishing in urban underground utility tunnel. Case Studies in Thermal Engineering, Volume 21, October 2020, 100657.

34. Греков С. П. Теплофизические процессы в горных выработках при экзогенных пожарах / [Греков С. П., Смоланов С. Н., Почтаренко Н. С., Березовский А. А.]. // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / Донецк : НИИГД, 2000. – С. 39 – 46.

35. Бойко Т. В. Дослідження генерування піни парогазоводяною сумішшю / Бойко Т. В., Ковалишин В. В., Лозинський Р. Я. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л. : ЛДУБЖД, 2007. – № 11. – С. 159 – 164.

36. 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. – Р. 18 – 36.

37. Изменение концентрации кислорода при тушении пожаров в труднодоступных местах инертной пеной / [Богатырев В. Г., Кокотов О. Л., Чарков В. П., Шецер Г. М.]. / ВНИИГД. – Донецк, 1982. – 7 с. Деп. в ЦНИЭуголь 18.06.82, № 2407.

38. Ясінський М. Ф. Математичне моделювання процесу подачі піни / [Ясінський М. Ф., Кузик А. Д., Юзевич В. М., Ясінська Л. М., Ковалишин В. В., Ковалишин О. В.] // Пожежна безпека: Зб. наук. праць / ЛПБ, УкрНДІПБ. – Львів, 2004. – № 5. – С. 52 – 55.

39. Лозинский Р. Я. Исследование процессов охлаждения и влагонасыщения высокотемпературных газовых струй в ограниченных каналах / Лозинский Р. Я., Зинченко И. Н., Мамаев В. В., Ковалишин В. В. // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2003. – № 2 (8). – С. 22 – 27.

40. Бойко Т. В. Особливості процесу генерування піни потоком парогазоводяної суміші / Т. В. Бойко // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / – Донецк : НИИГД, 2006. – Вып. 43. – С. 90 – 96.

41. Дмитриевский С. Ю. Динамика температуры в кабельных туннелях при рециркуляции продуктов горения / С. Дмитриевский, А. Ревякин // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / – Донецк : НИИГД, 2006. – Вып. 43. – С. 79 – 83.

42. Первушин Ю. В. Определение нижнего и верхнего температурного предела газа для устойчивого пенообразования на сетках / Первушин Ю. В., Чарков В. П., Шецер Г. М. //

Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / Донецк : ВНИИГД, 1976. – Вып. 12. – С. 13 – 18.

43. Потетюев С. Ю. Исследование температурного поля очага пожара в тоннеле метрополитена / С. Ю. Потетюев // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. / – Харьков : АПБ Украины, 2000. – Вып. 8. – С. 135 – 141.

44. Косарь А. М. Моделирование движения воздушных потоков в подземных сооружениях метрополитена при пожаре / А. Косарь, П. Пашковский // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2002. – № 2. – С. 38 – 47.

45. Boyan Jia, Yanwei Xia, Zhaoyu Ning, Bin Li, Guowei Zhang, Zhiwei Zhang. Research on the Fire Extinguishing Efficiency of Low-Pressure Water Mist in Urban Underground Utility Tunnel Cable Fires. November 2023 Fire 6(11):433

46 LIU Yan, WU Jian-xing. Experimental Study on Effective Fire-extinguishing Technology for Cable Tunnel Fire[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2008, 18(9).

47.Ковалишин В.В. Динаміка газоводопінних потоків в замкнутому об'ємі каналу при гасінні пожежі/Ковалишин В.В., Бойко Т.В., Кирилів Я.Б. // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2009. – № 15.– С. 16-24.

48. Ковалишин В.В. Насадка для подавання вогнегасної рідини під час гасіння пожеж класів А,В,Е,Ф / Ковалишин В.В., Марич В.М., Сукач Р.Ю. // Патент на корисну модель 155612 Україна: МПК А62С 31/02 № а 2020 01632; заявл. 10.03.2020; опубл. 21.03.2024. Бюл. № 12.

49. 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. – К. : УкрНДІПБ, 2005. – С. 283 – 285.

50. Визначення умов застосування «мембранного» азоту для флегматизування горючих газових середовищ /

[Жартовський В. М., Цапко Ю. В., Соколенко К. І., Откідач Д. М.]. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць / ЛППБ, УкрНДНПБ. – Львів, 2004. – № 5. – С. 17 – 21.

51. Бот В. Тушение подземных пожаров с применением азота в каменноугольной промышленности ФРГ / В. Бот, Р. Мюллер // Глюкауф. – 1979. – № 19. – С. 11 – 16.

52. Пашковский П. С. Параметры подачи газообразного азота в рециркулирующий поток пожарных газов / [Пашковский П. С., Попов Э. А., Шайтан И. А., Яремчук М. А.]. // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. / Донецк : НИИГД, 2002. – С. 16 – 22.

53. Ковалишин В. В. Основи створення та експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання: навчальний посібник / Ковалишин В. В., Кусковець С. Л., Луц В. І. – Львів : Сполом, 2011. – 440 с.

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

55. Пашковский П. С. Предупреждение пожаров в подземных условиях угольных шахт / Пашковский П. С., Петров В. В., Яремчук М. А. // Пожежна безпека-2001: Зб. наук. пр. – Львів : ЛППБ, 2001. – С. 212 – 213.

56. Вогнегасні речовини: навчальний посібник / [Антонов А. В., Боровиков В. О., Орел В. П., Жартовський В. М., Ковалишин В. В.]. – К. : Пожінформтехніка, 2004. – 176 с.

57. Правила експлуатації вогнегасників. НАПБ Б.01.008-2004. Типові норми належності вогнегасників НАПБ Б.03.001-2004 / [А. Антонов, В. Кавецький, О. Гладишев, В. Приймаченко, В. Ковалишин, С. Чернов]. – К. : Охорона, 2004. – 24 с.

58. Технічне обслуговування вогнегасників. Загальні технічні вимоги / [Антонов А. В., Гладишев О. В., Кавецький В. В., Ковалишин В. В., Міщенко С. М., Приймаченко В. В., Чернов С. М.]. – Київ : УкрНДНЦ, 2004. – 14 с.

59. Вплив гідрофосфату амонію на якість зарядів до повітряно-пінних вогнегасників та установок пожежогасіння / [Боровиков В. О., Ковалишин В. В., Антонов А. В., Козяр Н. М.]. // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Л. : ЛПБ, 2004. – № 5. – С. 146 – 155.

60. Відновлення показників якості водних і водопінних вогнегасних речовин – зарядів вогнегасників та систем пожежогасіння / [Козяр Н. М., Боровиков В. О., Антонов А. В., Ковалишин В. В.]. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД, 2007. – № 11. – С. 27 – 37.

61. Дослідження вогнегасних речовин термічними методами аналізу / [Козяр Н. М., Кочубей В. В., Турчин А. І., Ковалишин В. В.]. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л., 2009. – № 15. – С. 7 – 11.

62. Ковалишин В. В. Пінне гасіння : навчальний посібник / Ковалишин В. В., Васильєва О. Е., Козяр Н. М. – Львів : Сполом, 2007. – 168 с.

63. Дмитровський С. Ю. Обґрунтування параметрів гасіння пожеж в кабельному тунелі шляхом рециркуляції продуктів горіння : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Дмитровський Сергій Юрійович. – Л., 2008. – 143 с.

64. Грушовінчук О.В. Визначення вогнегасної ефективності механічної піни різної кратності / Грушовінчук О.В., Ковалишин В.В., Сорочич М.П. // Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні: матер. X Міжнар. наук.-техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 263-265.

65. Грушовінчук О.В. Обоснование параметров генераторов пены эжекционного типа повышенной огнетушащей эффективности / Грушовінчук О.В., Ковалишин В.В. // Safety & Fire Technique [Безопасность и пожарная техника Polska, Jozefov: CNOBP-PIB, BiTP Vol.38 Issue2, 2015. – P. 125-132.

66. Нуянзін О.М. Пожежі в кабельних тунелях прямокутного перерізу / Матеріали міжнародної науково-

практичної конференції молодих учених / Нуянзін О. М., Володіна В. В. // «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту». - Харків, НУЦЗ України, 2019. - С. 19-20.

67. Zhao Y., Zhu G., Gao Y. Experimental Study on Smoke Temperature Distribution under Different Power Conditions in Utility Tunnel //Case Studies in Thermal Engineering. - 2018.

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

69 Ji J. et al. Influence of aspect ratio of tunnel on smoke temperature distribution under ceiling in near field of fire source //Applied Thermal Engineering. - 2016. - Т. 106. - С. 1094-1102.

70. Modic J. Fire simulation in road tunnels //Tunnelling and underground space technology. - 2003. - Т. 18. - №. 5. - С. 525-530.

71. Греков С. П. Сопряженная задача тепломассопереноса при экзогенном пожаре в горной выработке / Греков С. П., Березовський А. А., Смоланов С. Н. // Пожежна безпека-2001: 36. наук. пр. – Львів : ЛПБ, 2001. – С. 372 – 373.

72. Teske O. Стационарные установки пожаротушения в кабельных каналах / O. Teske // Stationare Loschanlagen in Kabelkanalen / Elek. Prakt. – 1982. – 36. – № 12. – Р. 190 – 191.

73. Пат., Япония, кл. 95В 262, (А62 С 37/02). Автоматическая огнетушащая установка для подземных электрических коммуникаций / Синохара Кэйдзи, Наои Тадао. – № 50-25759; заявл. 14.01.70; № 45-3707.

74. Система пожаротушения для кабельных тоннелей // Sprinkler system inbles in eheck // Consult. Eng. (Gr/ Brit), 1981, 45, № 4. – Р. 30 - 31.

75. Автоматическая система пожаротушения для подземных кабелей // Showa Wire and Cable Rev, 1978. – 28, № 2. – 159.

76. Підгайний А. Проблеми пінного пожежогасіння та шляхи їх розв'язання / А. Підгайний, В. Підгайний // Пожежна безпека. – 2005. – № 7. – С. 39 - 42.

77. Поведение кабеля при пожаре // Das Verhalten von Kabeln im Brandfall / S. Richter // Draht. – 1992. – 43. – № 1–2. – P. 39 – 42.

78. Пожарная защита кабельных линий // Brandschutzmaßnahmen in Kabelkanalen // Steir. Feuerwehrbl. – 1979. – 28. – № 12. – P. 7.

79. Быстрое тушение пожаров с помощью аэрозолей // Schnell loschen mit Aerosol // Die Wochenzeitung für das technische Management. – 2000. – № 34. – P. 18.

80. А.с. 230127 ЧССР, МКИ В 62 С 3/16. Устройство для тушения электрических кабелей // Stabilni zarizeni k pozaru electricckych vodicu kabeļu: / J. Zavrel, M. Chladek (ЧССР). – № 9230-82 ; заявл. 16.12.82 ; опубл. 01.05.86.

81. Огнестойкая канальная система. Kanalsystem trotz dem Brand. DE: Elektro- und Gebäudetechn. – 2002. – № 24. – С. 50. Нем.

82. Ізолюючі апарати: навчальний посібник / В. В. Ковалишин, С. М. Чернов. – Львів : Сполом, 2002. – 194 с.

83. Противопожарная защита трубопроводов и кабелей. Brandschutz, schneller als das Feuer. Flusssiggas. – 2004. – № 50. – С. 54. Нем.

84. Заявка 2881055 Франция, МПК А62С 3/16. Способ защиты кабельных каналов. Dispositif de cloisonnement de reseaux de cables et/on de canalizations pour eviter la propagation du feu: Service methode conseil, Imoleon Xavier, Saussez Daniel. – № 0550187 ; заявл. 21.01.2005 ; опубл. 28.07.2006.

85. Новак С. В. Дослідження вогнестійкості кабельних ліній / [С. В. Новак, І. О. Харченко, В. В. Коваленко, А. В. Довбиш, М. О. Спіридончев] // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2005. – № 1. – С. 52 – 57.

86. 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.

93. Огнезащитный заполнитель для прокладки электрических кабелей. Brandschutzschaum für Kabelabschottungen. Sanit. – und Heizungstechn. – 2005. – 70, № 8. – С. 17.

87. Самохвалов Е. П. Разработка в области повышения огнезащитности древесины / Е. Самохвалов, Е. Пиотровская // Пожежна безпека-2001: Зб. наук. пр. – Львів : ЛПІБ, – 2001. – С. 370 – 371.

88. Ковалишин В. В. Дослідження залежності кратності повітряно-механічної піни від розміру вічка сітки піногенератора / Ковалишин В. В., Грушовичук О. В., Луц В. І. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів : ЛДУБЖД, 2010. – № 16. – С. 54 – 58.

89. НАПБ В.01.034-2005/111 (ГКД 34.03.303-2005) «Правила пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та в організаціях енергетичної галузі України»

90. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл.//, 1990. – 424 с.

91. Madorsky S. L. Thermal Degradation of Organic Polymers, 1964 / Interscience, John Wiley, New York.

92. Tewarson A. Heat release in fires. Fire and materials, 1980, 4, 185 – 191.

93. Krause Jr., Gann R.G. Rate of heat release measurement using oxygen consumption. J. Fire and Flammability, 1980, 12, 117 – 130.

94. Константинов С.М. Технічна термодинаміка – Київ: Політехніка, 2001 – 368с.

95. Лабай В.Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 1998. – 260 с.

96. Топчиенко Б. И. Расчёт температуры пожарных газов при их рециркуляции в пожарном участке / Б. Топчиенко, И. Зинченко // Разраб. месторождений полезных ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1984. – Вып. 68. – С. 95 – 100.

97. Величко Л.Д. Термодинаміка та теплопередача в пожежній справі / Величко Л.Д., Лозинський Р.Я., Семерак М.М.// – Львів. Сполом, 2011. – 504 с.

98. Константинов С.М. Збірник задач з технічної термодинаміки/ Константинов С.М., Луцик Р.В. // – Київ: «Політехніка», 2002. -380 с.

99. Дмитровский С.Ю. Розрахунок витрати газоповітряних суміші в замкнутому контурі / Дмитровский С.Ю., Ковалишин В.В., Лозинський Р.Я. // Сб. наук. праць. – Львів : ЛПБ, 2005. – №7. – С. 135 – 140.

100. Бабуха Г. Л. Механика и теплообмен полидисперсных потоков газовзвеси / Г. Л. Бабуха, М. И. Рабинович. – Киев : Наук. думка, 1968. – 220 с.

101. Броунштейн Б. И. Вычисление пульсационных скоростей и коэффициентов тепло- и массопередачи для твёрдых частиц в турбулентном потоке / Б. Броунштейн, О. Тодес // Тр. Одесск. ун-та. сер. физ. наук, 1962. – т. 152, №8. – С. 85 – 90.

102. Кравецкий Л. И. Об неизотермическом испарении полидисперсной системы капель распылённой жидкости / Кравецкий Л. И., Павлицев М. И., Хинкис П. А., Редуцкая О. М. // Теплофизика и теплотехника.– К. : Наукова думка, 1977. – вып.33. – С. 96 – 100.

103. Добрянский Ю. Н. Расчёт тепловлажностных режимов подземных объектов на ЭВМ / Ю. Н. Добрянский. – Киев : Наук. думка, 1991. – 112 с.

104. Кремнев О. А. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях / О. Кремнев, В. Журавленко. – Киев : Наук. думка, 1986. – 344 с.

105. Возняк Л.С. Чисельні методи / Возняк Л.С., Шарин С.В. – Івано-Франківськ.: Плай, 2001. – 64 с.

106. Шкіль М.І.Математичний аналіз. Ч1 / М.І. Шкіль. – К. : Вища школа, 1994. – 423 с.

107. Яворський Б.М. Довідник з фізики./ Б.М. Яворський, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев – К. : Навчальна книга - Богдан, 2007. – 1040 с.

108. Кушнарєв А. М. Подача высокодиспергированных водяных потоков для тушения пожара в горной выработке / [Кушнарєв А. М., Гринь Г. В., Гавриш Ю. В., Бычкова Л. З.]. // Горноспасательная техника и противоаварийная защита шахт: Сб. науч. трудов / ВНИИГД. – Донецк, 1988. – С. 64 – 68.

109. Tchen C.- M. Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid. The Hague, 1947.

110. Householder M.K. Turbulent diffusion and Schmidt number of particles / M.K. Householder, V.W. Goldshmidt // - Proc. ASCE, 95, Dec., 1969, EM6. – P. 1345 – 1367.

111. Soo S.L. Experimental determination of statistical properties of two-phase turbulent motion / S.L. Soo, H. K. Igrig, A.E. El Kouh // Trans. ASME, Ser. D, 1960. – 82, №3. – P. 609 – 621.

112. Михайлова Н. А. Перенос твёрдых частиц турбулентными потоками воды / Н. А. Михайлова. – Л. : Гидрометеиздат, 1966.

113. Fuchs N. A. Mechanics of aerosols / N.A. Fuchs // Oxford: Pergamon Press, 1964.

114. Статут ДВГРС по організації і веденню гірничорятувальних робіт. – Київ, 1997. – 447 с.

115. Король А. А. Обоснование параметров подачи огнетушащих порошков при дистанционном тушении подземных пожаров: дис... канд. техн. наук : 21.06.02 / Анатолий Олексійович Король. – Макеевка, 2005. – 170 с.

116. Король А. А. Дистанционное тушение подземных пожаров тонкодисперсным порошком / А. А. Король // Пожежна безпека: Збірник наукових праць. – Львів : Сполом, 2001. – С. 213 – 215.

117. Пашковский П. С. Математическая модель переноса тонкодисперсного огнетушащего порошка в проветриваемой горной выработке / П. С. Пашковский, А. А. Король // Київ : УкрНДІПБ МНС України, 2002. – №1 (5). – С. 43 – 48.

118. Король А. А. Движение тонкодисперсных порошков в горных выработках / А. А. Король // Горноспасательное дело: Сб. науч тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2002. – С. 37 – 48.

119. Король А. А. Тушение пожаров тонкодисперсными порошками / А. А. Король. – Уголь Украины. – 2003. – С. 42 – 43.

120. Король А. А. Расходно-временные параметры дистанционного тушения подземных пожаров огнетушащим порошком / А. А. Король // Горноспасательное дело: Сб. науч тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2003. – С. 71 – 76.

121. Пашковский П. С. Распределение огнетушащего порошка в горной выработке / Пашковский П. С., Зинченко И. Н., Король А. А. // Пожарная безопасность 2003: Материалы VI научно-практической конференции. – Харьков: Академия пожарной безопасности Украины, 2003. – С. 144 – 146.

122. Чарков В. П. Комбинированное тушение подземных пожаров порошком и пеной / Чарков В. П., Король А. А., Засевский В. П. // В кн.: Ведение горноспасательных работ и предупреждение аварий: Сб. науч. тр. / ВНИИГД. – Донецк, 1984. – С. 73 – 79.

123. Chow W. On the Evaporation Effect of a Sprinkler Water Spray // Fire Technology. - 1989. Vol. 25, November. - P. 364 – 373.

124. Ющенко Ю. Н. Параметры локализации подземных пожаров / Ю. Н. Ющенко, А. Ю. Коляда // Горноспасательное дело: Сб. науч тр. / НИИГД "Респиратор". – Донецк, 2010. – С. 89 – 95.

125. Автофлегматизация газовоздушных смесей при тушении подземных пожаров / Костенко В. К., Булгаков Ю. Ф., Костенко Т. В., Завьялова Е. Л. // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 57 – 62.

126. Макаренко В. Л. Создание высокопроизводительных генераторов для инертизации рудничной атмосферы аварийных участков: автореф. дисс. На соискание науч. степени канд.техн.наук. / В. Л. Макаренко. – Макеевка-Донбасс, 1984. – 18 с.

127. Йо Судзуки Исследование горения электрического кабеля внутри вентиляционного канала / Судзуки Йо, Ханэ Йосинари // Касай. – 1978. – 28. – 12. – С. 22 – 30.

128. 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.

129. Копыстинский О. Р. Воздухораспределение в изолированном кабельного туннеля при рециркуляции пожарных газов / О. Р. Копыстинский, С. Ю. Дмитриевский // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр./ НИИГД – Донецк, 2004. – С. 133 – 137.

130. Булгаков Ю. Ф. Автоматические системы пожаротушения и сигнализации для добычных комплексов разрезов / Булгаков Ю. Ф., Чарков В. П., Радышев В. И. // Уголь Украины. – 1992. – № 11. – С. 36 – 38.

131. Профилактика кабельных пожаров – Preventing fires in cable groupings / Jergenstn J. R., Havton P. // Power. – 1978. – 122, №8. – Р. 46 – 49.

132. 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.

133. Тищенко О. М. Гасіння енергоустановок тонкорозпиленою водою / Тищенко О. М., Баракін О. Г., Зажом В. М. // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан,

проблеми і перспективи: Матер. VII Всеукр. наук.-практ. конф. рятувальників. – К. : УкрНДІПБ, 2005. – С. 269 – 271.

134. Woolberd F. Risk management: preventing and controlling cable fibers = Комплексная противопожарная защита кабельных коммуникаций / F Woolberd // Fire Surv. – 1989. – V. 18. – № 3. – Р. 24 – 28.

135. 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 / УкрНДІПБ. – К. : 2005. – С. 202 – 204.

136. 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.

137. 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 / УкрНДІПБ. – К., 2005. – С. 228 – 229.

138. 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.

139. 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.

140. Пат. 63726 Польща, МПК Е 21 F 5/00, Кл. 5d, 5/00. Sposib qasnenia podzemnych pozarow Kopalnianych I urzadzenie

do stosowania tego sposobu / A. Kukuczka = Спосіб гасіння підземних пожеж шахт та пристрій для реалізації цього способу. заявл. 30.08.69; опубл. 10.01.72.

141. 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 пожежних газів. опубл. 02.01.73.

142. Пат. 23065 Україна, МПК А 62 с 39/00 Спосіб гасіння пожежі в ізольованій ділянці туннелю (в закритому об'ємі) рециркуляцією продуктів горіння / Ковалишин В. В., Дмитровський С. Ю. / заявл. 13.11.2006; опубл. 10.05.2007.

143. Kukuczka F. Likwidacja pól pożarowych metoda recyrkulacji = Ліквідація осередків пожежі на ізольованій ділянці методом рециркуляції пожежних газів: 6 Miedzynar. konf. automat. qorn. – Katowice, 1980. – Ref. m. 4. – Р. 93 – 105.

144. Клименко Ю. В. Опыт тушения пожара на шахте им. Г. Г. Капустина с применением рециркуляции пожарных газов / Клименко Ю. В., Болбат И. Е., Топчиенко Б. И. // Пути развития горноспасательного дела: тр. науч.-практ. конф. / Донецк : НПО «Респиратор», 1997. – С. 105 – 106.

145. Горб В. Ю. Экспериментальные исследования генерирования пены потоком парогазовой смеси / Горб В. Ю., Толкачев О. Э., Шкодских В. И. // ВНИИГД. – Донецк, 1985. – 9 с. – Рус. – Деп. в ЦНИЭИуголь 22.03.85, № 3300.

146. Satoh R. / Numerical Study of Large Fires in Tunnels = Численные исследования крупных пожаров в тоннелях / K. Satoh, S. Mijazaki // Report of Fire Research Institute of Japan. – 1989. – № 68. – Р. 19 – 34.

147. Охлаждение пенным потоком нагретых пожаром боковых пород горной выработки / [Щецер Г. М., Чарков В. П., Ивченко А. И., Петровский В. Б.]. // Горноспасательное дело – Донецк : ВНИИГД, 1974. – С. 22 – 23.

148. Підгайний А. Проблеми пінного пожежогасіння та шляхи їх розв'язання / А. Підгайний, В. Підгайний // Пожежна безпека. – 2005. – № 7. – С. 39 – 42.

149. M. Krasnyansky. Remote extinguishing of large fires with powder aerosols. Fire and Materials: An International Journal, 2006 - Wiley Online Library

150. Булгаков Ю.Ф. Тушение пожаров в угольных шахтах / Булгаков Ю. Ф. – Донецк : НИИГД. – 2001. – 280 с.

151. Кокотов О. Л. Охлаждение горных пород воздушно-механической пеной / Кокотов О. Л., Чарков В. П., Шецер Г. М. // Методы и средства ведения горноспасательных работ. – Донецк : ВНИИГД, 1980. – С. 50 – 54.

152. Жукова Н. Е. Стабилизация пен гидрофильными аэросилами / Жукова Н. Е., Шецер Г. М., Синявский В. Б. // Методы и средства ведения горноспасательных работ. – Донецк : ВНИИГД, 1980. – С. 79 – 82.

153. Жукова Н. Е. Исследование физико-механических свойств пены на основе парогазовой смеси / Жукова Н. Е., Шкодских В. И., Чарков В. П. // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. – Донецк : ВНИИГД, 1986. – С. 86 – 90.

154. Козлюк А. И. Исследование процесса устойчивого пенообразования в атмосфере продуктов сгорания / Козлюк А. И., Жукова Н. Е., Первушин Ю. В. // Ведение горноспасательных работ и предупреждение аварий: Сб. науч. тр. – Донецк : ВНИИГД, 1984. – С. 113 – 117.

155. Ковалишин В.В. Пінне гасіння / В.В.Ковалишин, О.Е. Васільєва, Н.М. Козяр // – Львів : Сполом, 2008. – 168 с.

156. Ковалишин В. В. Исследование воздухораспределения в изолированном участке кабельного туннеля при рециркуляции пожарных газов / Ковалишин В. В., Дворянин И. В., Дмитровский С. Ю. // Материалы докладов междунар. научн.-практ. конф.: «Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации «ЧС-2006». – Гомель : ГИИ, 2006. – С. 194 – 197.

157. Рожков А. П. «Пожежна безпека»: Навчальний посібник / А. П. Рожков. – Київ : Пожінформтехніка, 1999. – 256 с.

158. Воробйов О.І. Системи пожежогасіння. Навчальний посібник / О.І. Воробйов// – Львів. : Сполом, 2008. – 152 с.

159. Патент № 23065 «Спосіб гасіння пожежі в ізольованій ділянці тунелю (в закритому об'ємі) рециркуляцією продуктів горіння»).

160. Ball J., Pietrzak L. Investigation to improve the Effectiveness of Water in the suppression of compartment Fires// Fire Research. – 1978/ - Vol/ 1., № 4 – 5. P. 291 – 300.

161. Исследование профилактических мероприятий по предотвращению пожаров на шахтах. Ч. 5. Зависимость между необходимыми расходами воды и скоростями вентиляционных струй в зоне водяного обрызгивания / Т. Komaі, Т. Suzuki, М. Kinochita // Saiko Hoan, Mining and Safety. – 1982. – 28, № 7. – Р. 337 – 346.

162. Ковалишин В. В. Моделювання виникнення і розвитку пожеж в закритих об'ємах великої протяжності / В. В. Ковалишин // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л., 2011. – № 18. – С. 21 – 26.

163. Ковалишин В. В. Математична модель поширення полум'я по вертикальній поверхні горючого матеріалу і її використання в протипожежному нормуванні / Ковалишин В. В., Кузик А. Д., Чернов С. М. // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів : ЛПІБ, 2004. – № 5. – С. 12 – 17.

164. Ковалишин В. В. Експериментальне дослідження небезпечних факторів пожежі на початковій стадії / В. В. Ковалишин, С. М. Чернов // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Харків, 2005. – № 7 (47). – С. 77 – 84.

165. Ковалишин В. В. Квазістаціонарні процеси тепломасопереносу під час пожеж у протяжних каналах / В. В. Ковалишин // Науковий вісник. – К. : УкрНДІПБ. – 2011. – № 1 (23). – С. 82 – 86.

166. Математичне моделювання великомасштабних пожеж в протяжних каналах і порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними / [Ковалишин В. В., Улинець Е. М., Пашковський П. С., Зінченко І. М.]. // Пожежна безпека: теорія і практика: матеріали міжнар наук.-практ. конф. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – № 8. – С. 33 – 38.

167. Пашковський П.С.. Эндогенные пожары в угольных шахтах /П.С. Пашковський// Ноулидж. – Донецк, 2013. – 792 с.

168. Ковалишин В. В. Експериментальне дослідження небезпечних факторів на початковій стадії розвитку пожежі / В. В. Ковалишин, С. М. Чернов // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи: Матеріали 7 Всеукраїнської наук.-практ. конф. рятувальників. – Київ : УкрНДІПБ, 2005. – С. 75 – 77.

169. Ковалишин В. В. Аналітичні дослідження тепломасообмінних процесів у закритих об'ємах великої довжини при виникненні пожеж / В. В. Ковалишин, Т. В. Бойко // Запобігти, врятувати, допомогти: Матеріали 10 наук.-практ. конф. курсантів та студентів. – Харків : АЦЗУ, 2006. – С. 208 – 209.

170. Ковалишин В. В. Моделювання процесів конвективно-дифузійного переносу теплоти та димових газів під час пожеж у кабельних тунелях / В. В. Ковалишин, С. Ю. Дмитровський. – Науковий вісник УкрНДІПБ, 2008. – № 1 (17). – С. 21 – 26.

171. Застосування та вибір посудин для дослідження летких продуктів згорання / [Ковалишин В. В., Кріса І. Я., Дмитровський С. Ю., Мельницький В. М.]. // Вісник ЛДУБЖД: Зб. наук. праць. – Л., 2010. – № 4.– Ч. І. – С. 129 – 135.

172. Мочернюк Д. Ю. Физическое моделирование инженерных процессов / Д. Ю. Мочернюк. – Львов : Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1987. – 160 с.

173. Ковалишин В. В. Моделювання характеру впливу вогнегасного порошку на осередок пожежі спільно з рециркуляцією продуктів горіння / В. В. Ковалишин //

Проблемы пожарной безопасности. – Х. : НУГЗУ, 2011. – Вып. 30. – С. 113 – 122.

174. Ковалишин В. В. Математична модель переносу і осадження вогнегасних порошків в каналах великої протяжності при гасінні пожеж / В. В. Ковалишин, П. С. Пашковський // Вісті Донецького гірничого інституту: Зб. наук. пр. – 2011. – №2. – С. 90 – 96.

175. Моделювання характеру впливу на осередок пожежі вогнегасного порошку сукупно з рециркуляцією продуктів горіння / [Ковалишин В. В., Улинець Е. М., Кирилів Я. Б., Сорочич М. П.]. // Пожежна безпека-2011: Матер. Міжнар. наук.-практ. конф., 17 – 18 листопада 2011. – Харків : АПБУ, 2011. – С. 63 – 64.

176. Ковалишин В. В. Математична модель турбулентного переносу диспергованої води до осередку пожежі в технологічних каналах великої довжини / В. В. Ковалишин // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2011. – № 19. – С. 49 – 54.

177. P. Marke. Cable tunnels—an integrated fire detection/suppression system for rapid extinguishment. Published: August 1991. Volume 27, pages 219–233.

178. Копистинський О. Р. Гасіння пожежі в кабельному тунелі / О. Р. Копистинський, В. В. Ковалишин // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Л. : ЛПБ, 2004, – № 4. – С. 72 – 75.

179. Ковалишин В. В. Моделювання впливу парогазових потоків на пожежу в каналах великої довжини / В. В. Ковалишин // Науковий вісник. – К. : УкрНДІПБ. – 2011. – №2 (24). – С. 191 – 199.

180. Ковалишин В. В. Експериментальна перевірка адекватності математичної моделі гасіння пожежі парогазовою сумішшю/ В. В. Ковалишин // Вісник ЛДУБЖД. – Львів : ЛДУ БЖД, 2011. – № 5. – С. 188 – 193.

181. Пат. 10547, 7 А 62С3/02. Установка газоводяного гасіння пожежі на базі турбореактивного двигуна: /

Лозинський Р. Я., Ковалишин В. В., Дмитровський С. Ю.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № 200504537; заявл. 16.05.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 2 с.

182. Дмитровський С. Ю. Дослідження повітророзподілу димових газів на ділянці кабельного тунелю при пожежі / Дмитровський С. Ю., Ковалишин В. В., Лозинський Р. Я. // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Львів : ЛДУ БЖД, 2006. – № 8. – С. 7 – 11.

183. Особливості транспортування парогазової суміші для дистанційного гасіння пожежі / [Бойко Т. В., Ковалишин В. В., Лозинський Р. Я., Сембай І. М.] // Промислова гідраліка і пневматика: Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінницький державний аграрний університет, 2006. – № 3 (13). – С. 6 – 7.

184. Ковалишин В. В. Параметри гасіння пожеж в ізольованих каналах піною на основі продуктів згорання / Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б., Бойко Т. В. // Матеріали 13 Всеукраїнської наук.-практ. конф. рятувальників, 20 – 21 вересня 2011 р., – Київ, 2011. – С. 279 – 283.

185. Пат. № 95300 України, МПК (2011.01) A62C 3/00. Спосіб гасіння пожежі в ізольованій ділянці тунелю (в закритому об'ємі) інертною піною / Ковалишин В. В.; Бойко Т. В.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № и 2009 00946; заявл. 09.02.09. опубл. 25.07.11, Бюл. № 14.

186. Ковалишин В. В. Исследование по генерированию пены потоком парогазоводяной смеси / Ковалишин В. В., Бойко Т. В., Козяр Н. М. // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации «ЧС-2006»: Материалы докладов международной научно-практической конференции. – Гомель : ГИИ, 2006. – С. 208 – 211.

187. Ковалишин В. В. Зміна температури у відсіках кабельних тунелів у ході застосування рециркуляції продуктів

горіння для гасіння пожеж / В. В. Ковалишин, С. Ю. Дмитровський // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів : ЛДУ БЖД, 2007. – № 10. – С. 7 – 11.

188. Ковалишин В. В. Моделювання процесів впливу продуктів горіння на осередок пожежі у замкнутому контурі / Ковалишин В. В., Бойко Т. В., Зінченко І. М. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л., 2009. – № 14. – С. 166 – 171.

189. Ковалишин В. В. Динаміка газово-пінних потоків в замкнутому об'ємі каналу при гасінні пожежі / В. В. Ковалишин, Я. Б. Кирилів, Т. В. Бойко // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Л., 2009. – № 15. – С. 16 – 24.

190. Пат. № 92679 МПК (2009) А62D 1/00. Водопінна вогнегасна речовина на основі піноутворювача загального призначення / Антонов А. В., Ковалишин В. В., Козяр Н. М.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № а 2009 04435; заявл. 05.05.09. опубл. 25.11.10, Бюл. № 22.

191. Пат. № 50370 МПК А62D1/02 (2006.01). Водна вогнегасна речовина для гасіння пожеж класів "А" та "В" на основі піноутворювача загального та спеціального призначення / Антонов А. В., Ковалишин В. В., Турчин А. І., Козяр Н. М.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № а 2009 11291; заявл. 06.11.09. опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.

192. Пат. № 43403 МПК А62D1/02 (2009.01). Водопінна вогнегасна речовина на основі фторсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача / Ковалишин В. В., Турчин А. І., Антонов А. В., Козяр Н. М.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № и 2009 03835; заявл. 21.04.09; опубл. 10.08.09, Бюл. № 15.

193. Пат. № 96797 Україна МПК А62D1/02 (2006.01). Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленними струменями пожеж класів "А" та "В" за ГОСТ 27331-87 / Антонов А. В., Ковалишин В. В., Турчин А. І., Вайсман М. Н.,

Козяр Н. М.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № а 2009 11271; заявл. 06.11.09. опубл. 12.12.11, Бюл. № 23.

194. Пат. № 52969 МПК А62D1/02 (2006.01). Водна вогнегасна речовина для гасіння тонкорозпиленими струменями пожеж класів "А" та "В" за ГОСТом 27331-87 з використанням від –30 до +50 °С / Антонов А. В., Ковалишин В. В., Турчин А. І., Козяр Н. М.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № и 2009 11293; заявл. 06.11.09. опубл. 27.09.10, Бюл. № 18.

195. Пат. 10083 Україна, 7 А62С2/00. Установка для гасіння цистерн з горючими та легкозаймистими рідинами / Луц В. І., Ковалишин В. В.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № 2004 0907639; заявл. 20.09.2004; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11. – 3 с.

196. Пат. № 89274 МПК (2009) А62С 39/00. Ствол комбінованої подачі піни низької та середньої кратності для гасіння пожеж / Ковалишин В. В., Луц В. І., Грушовінчук О. В.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № а 200805136; заявл. 21.04.08. опубл. 11.01.10, Бюл. № 1.

197. Ковалишин В. В. Тактико-технічні дії пожежно-рятувальних підрозділів при дистанційному гасінні пожежі пароговастою сумішшю / Ковалишин В. В., Лозинський Р. Я., Кирилів Я. Б. // Пожежна безпека: Зб. наук. праць. – Львів : ЛДУБЖД, 2009. – № 14. – С. 7 – 12.

198. Лозинський Р. Я. Обґрунтування параметрів установки для дистанційного гасіння пожеж газоводяною сумішшю: дис. ... канд. техн. наук : 21.06.02 / Лозинський Роман Якович. – К., 2005. – 170 с.

199. Насоси, компресори та вентилятори в пожежній техніці : навчальний посібник / [Мандрус В. І., Юзків Т. Б., Назарчук С. П., Ковалишин В. В.]. – Львів, 2006. – 348 с.

200. Пат. № 55428 МПК (2009) А62С 35/00. Пристрій для осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях / Ковалишин В. В., Луц В. І., Мельник П.; заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – №u201007782; заявл. 21.06.10. опубл. 10.12.10, Бюл. № 23.

201. Установка визначення ефективності гасіння різними вогнегасними речовинами в закритих об'ємах класу «А», «В», «Е» / Ковалишин В.В.; Пат. № 104 901 Україна, МПК (2013.01); заявник і патентовласник Львівський держ. у-т безпеки життєдіяльності. – № а 2012 02282; заявл. 27.02.2012; опубл. 25.03.14, Бюл. №6.

202. Ющенко Ю. Н. Нормативный расход воды для локализации подземного пожара / Ю. Н. Ющенко // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД . – Донецк , 1999. – С. 21-26.

203. Кушнарєв А. М. Исследование интенсивности орошения и тушения конвейерной ленты у приводных барабанов / А. М. Кушнарєв, К. И. Поздняков, К. И. Лапин, Л. В. Бычкова // Ведение горноспасательных работ и предупреждение аварий : сб. науч. тр. НИИГД . – Донецк, 1984. – С. 85-90.

204. Ющенко Ю. Н. Эффективность водяных завес при тушении пожаров / Ю. Н. Ющенко, К. И. Поздняков // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД . – Донецк, 1997. – С. 35-37.

205. Ющенко Ю. Н. Тушение экзогенных пожаров распыленной водой / Ю. Н. Ющенко, К. И. Лапин // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 40-45.

206. Пашковский П. С. Многофункциональный пожарный ствол СШПМ-50 / П. С. Пашковский, С. Г. Филимонов, В. А. Ломако // Горноспасательное дело : сб. науч. тр. НИИГД . – Донецк, 2002. – С. 8-16.

207. Кудинов Ю. В. О скорости пламени в горных выработках на ранней стадии развития взрывов метановоздушной смеси / Ю. В. Кудинов // Способы средства создания безопасности и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка, 2008. – № 1 (27). – С. 96 – 102.

208. Рыжов В. С. Способ определения температуры в очаге изолированного пожара / В. С. Рыжов, Б. И. Топчиенко, И. Е. Болбат // Уголь Украины. – 1992. – № 11. – С. 20 – 21.

209. Топчиенко Б. И. Использование азота для создания рециркуляции продуктов горения в изолированном пожарном участке / Б. И. Топчиенко, М. А. Яремчук, И. Н. Красновский // Безопасность труда пром-ти. – 1992. – № 7. – С. 28 – 30.

Наукове видання

**Василь КОВАЛИШИН
Роман ЛОЗИНСЬКИЙ
Тарас БОЙКО
Володимир КОВАЛИШИН
Володимир МАРИЧ
Роман ПЕЛЕХ**

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ НА ОБ'ЄКТАХ ЗНАЧНОЇ ПРОТЯЖНОСТІ

Монографія

Літературний редактор

Галина ПАДИК

Комп'ютерна верстка

Маріанна КЛИМУС

Друк

Назарій ПЕТРОЛЮК

Підписано до друку 07.04.2025 р.
Формат 60х84/16. Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Ум. Друк. арк. 19,2

Друк ЛДУБЖД
79007, Україна, м. Львів, вул. Клепарівська, 35
Тел. /факс: (032)233-24-79
E-mail: vnrd@ldubgd.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №7249 від 09.02.2021 р.