

*В.В. Ковалишин, канд. техн. наук, доцент,
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖІ ПАРОГАЗОВОЮ СУМІШШЮ

Наведені результати експериментальних досліджень впливу парогазової суміші безпосередньо на осередок пожежі в лабораторних умовах в камері з визначення ефективності гасіння. Експериментальні дослідження в лабораторних умовах гасіння пожеж парою в суміші з повітрям підтвердили адекватність математичної моделі натурному об'єкту. Встановлено, що до гасіння пожежі концентрація кисню у вогнищі зменшується на 2 %, а при подачі пари в осередок пожежі зменшується до 10 %, припиняючи полум'яне горіння.

Не дивлячись на зниження температури у вогнищі до 100 – 200 °С, вона довгий час, як і розраховано за допомогою математичної моделі, утримується на вказаному рівні і лише через 1,5 години стає менше 100 °С, завдяки довгому охолодженню стінок камери і металевих провідників.

Ключові слова: адекватність, парогазова суміш, концентрація кисню, інертний газ.

Постановка завдання. Суміші повітря з парою або з 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 при русі інертного газу з повітрям відсутні їхні втрати по довжині каналу, то при русі 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 перевищити вогнегасну концентрацію 10%, і гасіння пожежі стане неефективним.

Незважаючи на наявність [1-8] при створенні газогенеруючих модулів багатьох оригінальних технічних рішень, залишаються до кінця невивченими питання теоретичного плану щодо динаміки високотемпературних потоків з їх насиченням вологою і охолодженням, з використанням парогазових сумішей з різним вмістом кисню для гасіння пожеж на об'єктах підвищеної небезпеки.

Ставиться завдання дослідження процесів переносу насичених вологою високотемпературних потоків інертного газу в довгих каналах, їх впливу на осередок пожежі з урахуванням ряду факторів, які раніше не бралися до уваги. Такими факторами є: 1) наявність в потоці повітря двокомпонентної безперервної фази (газ + пара), 2) утворення, хоча і несуттєве, крапель рідини при конденсації пари в повітрі і конденсації пари на холодних стінках каналу, 3) наявність теплообміну із зовнішнім середовищем, коли процес стає не адіабатичним.

Мета роботи. Експериментально перевірити адекватність математичної моделі гасіння пожежі парогазовою сумішшю, з визначенням подальшої можливості використання її при створенні нормативних документів з гасіння пожеж парогазовими потоками.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження транспортування парогазової суміші до осередку пожежі в довгих каналах проводилися в полігонних умовах [1]. Завданнями експериментальних досліджень транспорту парогазової суміші були:

- визначення втрат пари по 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 для 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. 1.

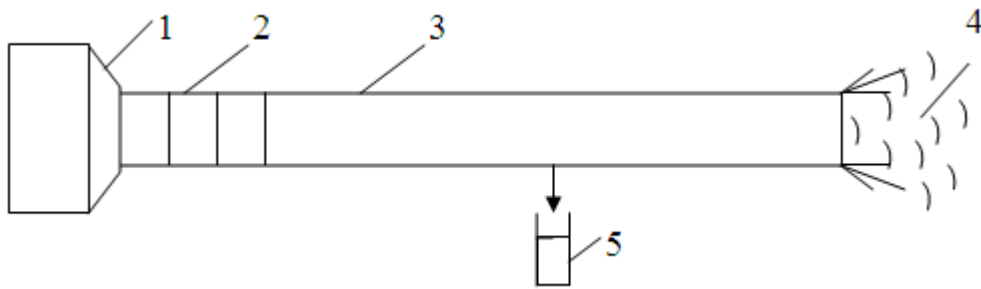


Рис. 1. Схема експериментальної установки транспортування парогазової суміші:
 1 – установка АГВГ-100, 2 – трисекційна камера охолодження водою,
 3 – вентиляційний трубопровід, 4 – вихід парогазової суміші, 5 – водозбірник

Через кожні 10 м у вентиляційному трубопроводі проводилися вимірювання швидкості руху парогазової суміші трубками Піто, там же встановлювалися газоаналізори кисню і термопари для визначення температури потоку суміші.

При зіткненні парогазової суміші, що рухається з високою температурою, з холодними стінками каналу, частина пари конденсується на стінках і збирається в нижній частині каналу, що дає можливість збирати конденсат у водозбірник. Оскільки конденсація пари відбувається по всьому об'єму парогазової суміші, то прихована теплота конденсації нагріває суміш, і її температура повинна підвищуватися. У табл. 1 наведені результати вимірювань параметрів парогазової суміші в різних розрізах каналу.

Таблиця 1

Результати вимірювань параметрів парогазової суміші по довжині каналу

Відстань, м	Температура з конденсацією, К	Температура без конденсації, К	Розхід 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. 1), температура парогазової суміші без конденсації пари весь час знижується по довжині каналу, хоча і незначно, 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. Тому встановити закономірність зміни температури по довжині каналу дуже важко. Отже для розрахунку концентрації кисню з достатнім ступенем точності можна приймати початкову температуру.

У той же час, як показують дані спостережень (табл. 1), витрата парогазової суміші весь час знижується через конденсацію пари, а концентрація кисню неухильно підвищується.

Для встановлення адекватності розробленої математичної моделі [8]

$$\bar{Z}_\infty = \frac{e\bar{T}_c \Pi / (\rho_2 S) + \bar{Z}_0 Q / V_1}{e\bar{T}_c \Pi / (\rho_2 S) + Q / V_1},$$

де $V_1 = SL$ – ізольований об’єм, м^3 ;
 S – площа перерізу каналу, м^2 ;
 Π – периметр поперечного перерізу каналу, м ;
 ρ – густина парогазової суміші, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 e – емпірична константа швидкості конденсації пари на стінках каналу відповідно до параметрів, $\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$;
 \bar{Z}_0 – відносна концентрація кисню;
 Q – розхід повітря при гасінні, $\text{м}^3/\text{с}$;
 \bar{Z}_∞ – гранична концентрація кисню в парогазовій суміші;
 T_c – середня температура парогазової суміші;

Отримана аналітична залежність очікуваної концентрації кисню була приведена до виду

$$\bar{Z}_\infty = \frac{e\bar{T}_c\Pi L / G + \bar{Z}_0}{e\bar{T}_c\Pi L / G + 1}. \quad (2)$$

Тут прийнято $G = \rho_2 Q$ – витрата ($\text{кг}/\text{с}$) парогазової суміші, оскільки повітря в ній незначна кількість.

На рис. 2 представлені результати порівняння аналітичної залежності (2) з експериментальними даними (табл. 1), які підтверджують адекватність математичної моделі натурному об’єкту.

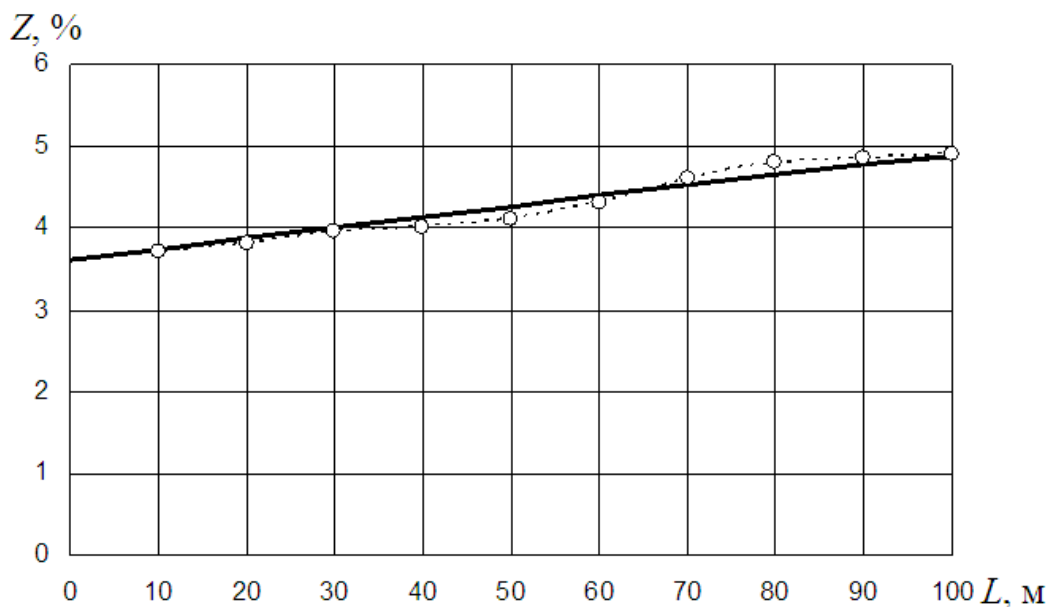


Рис. 2. Розрахункові (суцільна лінія) і експериментальні (кружечки) дані залежності концентрації кисню від довжини каналу

Обробка розрахункових та експериментальних даних з похибкою не більше 3-х відсотків показала, що емпірична константа швидкості випаровування $e = 0,062 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ [8]. Це дозволяє з достатнім ступенем точності робити прогноз очікуваної концентрації кисню перед осередком пожежі у потоці, в який надходить парогазова суміш.

Експериментальні дослідження впливу парогазової суміші безпосередньо на осередок пожежі проводилися в лабораторних умовах в камері [9]. Для отримання пари використовувався парогенератор, представлений на рис. 3.

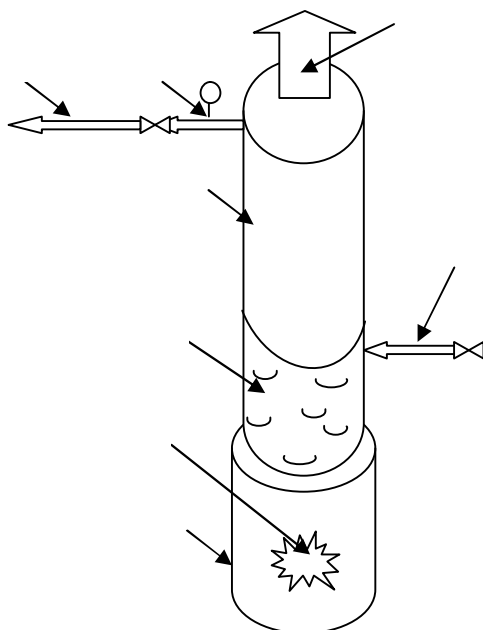


Рис. 3. *Схема парогенератора:*

1 – камера згорання, 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 водою парогенератора

При проведенні першого досліду без рециркуляції було використано 4,84 кг горючої ізоляції (гумова + пластикова ізоляція масло-наповненого кабелю) з металевими провідниками кабелю.

Площа отворів для підсмоктування (припливу) повітря становила $F_{\text{отв.}} = 0,0358 \text{ м}^2$. Об'єм камери (модуля) [9] становить $0,5 \text{ м}^3$.

Тривалість розпалювання 2 хвилини. Після усунення джерела запалювання, на 6 хвилині від початку досліду, температура досягла $740\text{--}750 \text{ }^\circ\text{C}$.

На момент подачі пари відключалась витяжна вентиляція, без проведення герметизації камери.

На 6-ій хвилині з початку горіння подали пару. Тривалість подачі становила – 4,5 хв. Після подачі пари з розходом $4,9 - 6,2 \text{ л/с}$ (розхід – $4\text{--}5 \text{ гр/с}$ води, під тиском $3,5\text{--}3,0 \text{ кг/см}^2$, що відповідало температурі води $\sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$) горіння кабелів припинялось, але внаслідок осипання зугленої маси гумової ізоляції на дні камери тривало її тління, на окремих ділянках короточасне полум'яне горіння. Маса залишків ізоляції, що не вигоріла, становила $1,3 \text{ кг}$. Динаміка температури показана на рис. 4.

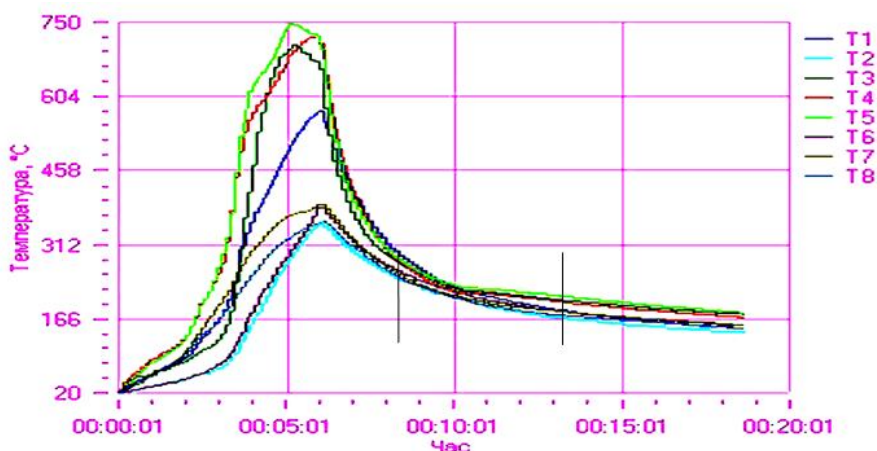


Рис. 4. *Динаміка температури в осередку пожежі при її гасінні парою в першому експерименті протягом 4,5 хв*

На рис. 5 наведено результати чисельного моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю для умов першого експерименту.

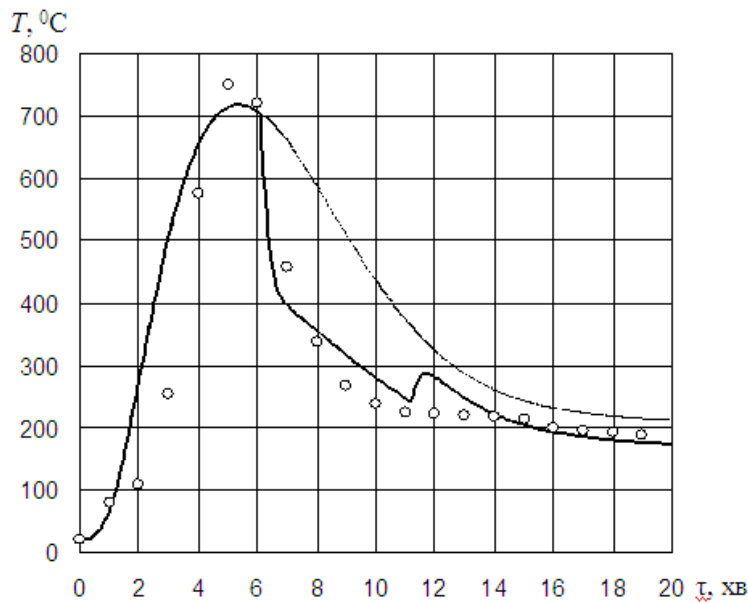


Рис. 5. Результати моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю (тонка лінія – без пари, жирна лінія – з застосуванням пари, кружечки – експериментальні дані)

Порівняння розрахункових і експериментальних даних [8, 10] показує, що вони задовільно узгоджуються один з одним при наступних вихідних даних ($A = 0,02$; $B = 500$; $St = 3,5$; $Fo = a_2 \Delta \tau / \Delta r^2 = 0,0005$; Fo – число Фур'є нагріву і охолодження навколишнього масиву; St – критерій Стантона теплообміну потоку повітря з навколишнім масивом; A – критерій теплоємності повітря; B – критерій теплової енергії пожежі).

На рис. 6 наведено результати моделювання динаміки в часі концентрацій кисню для умов першого експерименту.

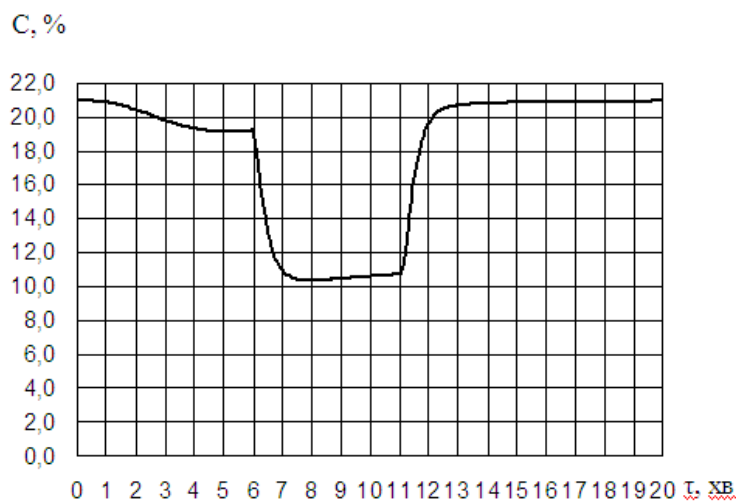


Рис. 6. Динаміка в часі концентрації кисню для умов першого експерименту при розвитку та гасінні пожежі парогазовою сумішшю

Порівняння даних моделювання з експериментальними даними показує, що до гасіння пожежі концентрація кисню знижувалася з 21 до 19%, а при гасінні пожежі парогазовою суміш-

шю зниження кисню тривало до 10%, що відповідає концентрації кисню в суміші. Припинення подачі пари приводить до швидкого повернення концентрації до початкового рівня.

У другому експерименті було використано (гумова, маслонаповненого кабелю пластикова ізоляція) горючої ізоляції 4,39 кг, з металевими провідниками кабелю. Площа отворів для підсмоктування повітря – $F_{отв} = 0,03585 \text{ м}^2$.

При тих же умовах запалювання та початку подачі пари, що у першому експерименті, температура досягала 760-770 °С.

В даному досліді, на момент подачі пари, працювала витяжна вентиляція і в цих умовах виникали вибухові спалахи продуктів неповного згорання, внаслідок підсмоктування кисню повітря та високої температури в зоні горіння. Динаміка температури у другому експерименті показана на рис. 7.

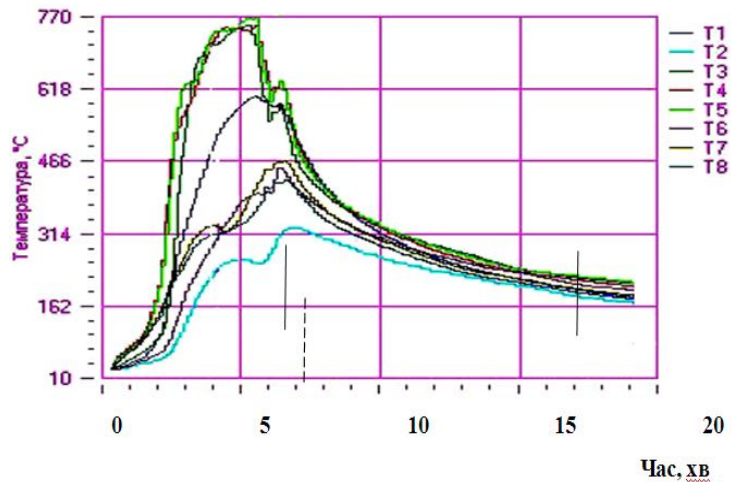


Рис. 7. Графік температур дослідів гасіння парою на 6-й хв. протягом 10-ти хв
 || – період подачі пари; | – момент відключення витяжної вентиляції

Після припинення швидкого надходження свіжого повітря, і заповнення камери парою із швидкістю 4,9-6,2 л/с (4-5 гр/с води) протягом 10 хв відбувся процес локалізації горіння та поступове зниження температури до 180-186 °С.

Упродовж 10 хвилин подачі пари відбувалося охолодження камери і температура зменшилася нижче 200 °С. Зниження температури до 100 °С відбувалось за 90 хв від початку гасіння.

На рис. 8 наведено результати моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю для умов другого експерименту.

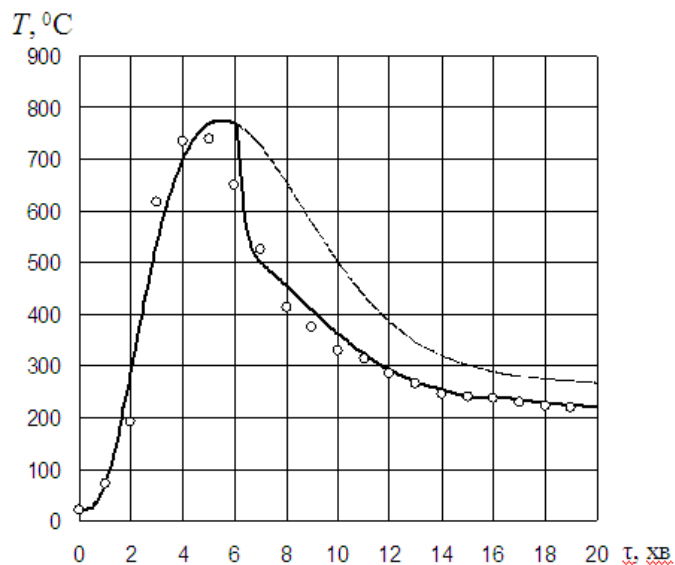


Рис. 8. Результати моделювання розвитку та гасіння пожежі парогазовою сумішшю (тонка лінія – без пари, жирна лінія – з застосуванням пари, кружечки – експериментальні дані)

Порівняння розрахункових і експериментальних даних показує, що вони задовільно узгоджуються один з одним при наступних вихідних даних: $A = 0,02$; $B = 500$; $St = 3,5$; $Fo = 0,0006$, які майже не відрізняються від даних для першого експерименту.

На рис. 9 наведено результати моделювання динаміки в часі концентрацій кисню для умов другого експерименту.

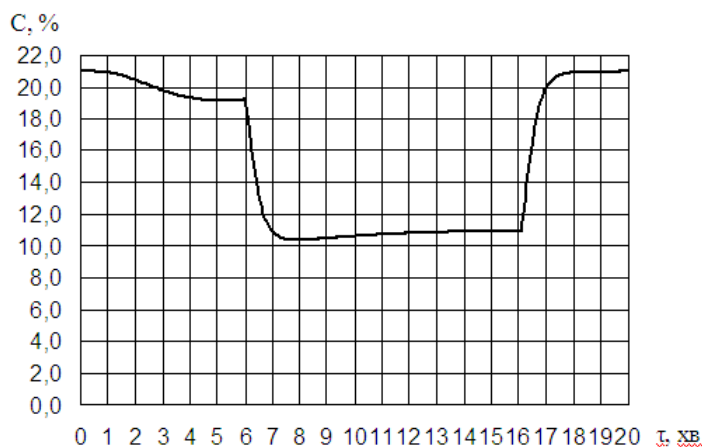


Рис. 9. Динаміка в часі концентрацій кисню для умов другого експерименту при розвитку і гасінні пожежі парогазовою сумішшю

Порівняння даних моделювання з експериментальними даними показує, що незважаючи на тривале гасіння пожежі парогазовою сумішшю, залишаються ті ж показники для концентрації кисню. До гасіння пожежі концентрація кисню знижувалася з 21 до 19%, а при гасінні пожежі парогазовою сумішшю зниження кисню тривало до 10%, що відповідає концентрації кисню в суміші. Припинення подачі пари приводить також до швидкого повернення концентрації на початковий рівень.

Висновки. Таким чином, встановлена залежність концентрації кисню в продуктах згоряння від температури в камері і тривалості горіння. Чим вища температура горіння, тим менша концентрація кисню. Після подачі пари в камеру припиняється полум'яне горіння, відбувається стрибок в сторону збільшення концентрації кисню з подальшим поступовим її наближенням до вмісту в чистому повітрі, по мірі охолодження вмісту камери.

Проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах гасіння пожеж паром в суміші з повітрям підтвердили адекватність математичної моделі натурному об'єкту. Встановлено, що до гасіння пожежі концентрація кисню знижується всього на 2%, а при подачі пари на вогнище знижується до 10%, з припиненням полум'яного горіння. Незважаючи на зниження температури в осередку пожежі до 100 – 200 °С, вона ще довго, як і в математичній моделі, утримується на зазначеному рівні і лише через 1,5 години стає менше 100 °С, що пояснюється тривалим охолодженням стінок камери і алюмінієвих провідників.

Отримані результати дають можливість використовувати математичні моделі, з певною допустимістю, для розробки нормативних документів з гасіння пожеж парогазовими потоками.

Список літератури:

1. Ковалишин В. В. Тактико-технічні дії пожежно-рятувальних підрозділів при дистанційному гасінні пожежі парогазовою сумішшю / В. В. Ковалишин, Р.Я. Лозинський, Я. Б. Кирилів // Пожежна безпека: Зб. наук. праць / ЛДУ БЖД МНС України. – 2009. – № 14. – С. 7-12.

2. Дейч М. Е. Двухфазные течения в элементах теплотехнического оборудования / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.

3. Дейч М. Е. Течение перегретого и влажного пара в регулирующих клапанах паровых турбин / М. Е. Дейч // Теплоэнергетика, 1979, №4. – С. 27-31.
4. Дейч М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. – М.: Энергия, 1968. – 424 с.
5. Дейч М. Е. Обобщенная модель турбулентности для анализа процессов образования конденсированной фазы в турбулентных потоках / М. Е. Дейч, Л. И. Селезнев // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1974. – №3. – С. 123-129.
6. Селезнев Л. И. Скорость образования ядер конденсации в двухкомпонентных метастабильных средах / Л. И. Селезнев // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1979. – №3. – С. 173-176.
7. Селезнев Л. И. Расчёт двухфазного закрученного потока в расширяющемся канале / Л. И. Селезнев, С. Т. Цвигун // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1981. – №5. – С. 123-129.
8. Ковалишин В. В. Моделювання впливу парогазових потоків на пожежу в каналах великої довжини / В. В. Ковалишин // Журнал «Науковий вісник УкрНДПБ». – К., 2011. – № 2(24). – С. 167-174.
9. Ковалишин В. В. Моделювання характеру впливу вогнегасного порошку на осередок пожежі спільно з рециркуляцією продуктів горіння / В. В. Ковалишин // Проблеми пожежної безпеки. – Х., 2011. – №30. – С. 113-122.
10. Ковалишин В. В. Єдиний підхід до математичного моделювання розвитку і гасіння пожеж різними засобами / В. В. Ковалишин // Пожежна безпека: теорія і практика : Зб. наук. праць. – Черкаси, 2011. – № 9.

В.В. Ковалишин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСЬЮ

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия парогазовой смеси непосредственно на очаг пожара в лабораторных условиях в камере по определению эффективности тушения. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях тушения пожаров паром в смеси с воздухом, подтвердили адекватность математической модели натурному объекту. Установлено, что до тушения пожара концентрация кислорода снижается всего на 2 %, а при подаче пара на очаг снижается до 10 %, прерывая пламенное горение. Однако, несмотря на снижение температуры в очаге до 100 – 200 °С, она еще длительно, как и в математической модели, удерживается на указанном уровне и лишь спустя 1,5 часа становится менее 100 °С, что объясняется длительным охлаждением стенок камеры и металлических проводников.

V.V. Kovalyshyn

MATHEMATICAL MODEL OF STEAM-GAS-MIXTURE FIREFIGHTING EXPERIMENTAL ADEQUACY VERIFICATION

The article deals with the experimental studies of gas-vapor mixture impact on the fires. The studies were held in the chamber for determination of firefighting efficiency. The adequacy of the mathematical model was confirmed during the studies. It is established that the burning process causes 2% reduce of the concentration of oxygen in the fire, while using the steam causes the 10% decrease, which allows stopping the fire.

Despite the decrease in the fire temperature to 100-200 C, it maintains at that level for a long time and only after 1.5 hours decreases to less than 100 C because of the long-time cooling of chamber walls and metal conductors.

Key words: adequacy, steam-gas mixture, the concentration of oxygen, inert gas.