

*Р.Я.Лозинський (Львівський інститут пожежної безпеки МНС України),  
І.Ф.Дікенштейн (Науково-дослідний інститут гірничорятувальної справи «Респіратор»,  
м. Донецьк)*

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОХОЛОДЖЕННЯ ПАРОГАЗОВОЇ СУМІШІ ДРІБНОРОЗПИЛЕНОЮ ВОДОЮ

Наведено результати досліджень процесу охолодження парогазової суміші при проведенні багатофакторних експериментів.

Пожежі на небезпечних об'єктах супроводжуються низкою непривабливих факторів, що утруднюють їх ліквідацію. До них належать: висока задимленість і температура на підходах до місця пожежі, імовірність вибухів і обвалів на об'єкті, велика швидкість поширення пожежі на ін.

У таких випадках найбільш ефективним є застосування дистанційного об'ємного гасіння пожеж за допомогою парогазової суміші, що утворюється при охолодження водою вихлопних газів у турбореактивних двигунів пожежних автомобілів.

Ефективність цього застосування підтверджена вітчизняними та закордонними дослідженнями. Більш, ніж 80 % розвинених пожеж було успішно ліквідовано з максимальним часом застосування турбореактивного двигуна рівним 18 хв. Результати цих досліджень показали, що для ефективної ліквідації горіння і наступної інертизації аварійного приміщення температура парогазової суміші не повинна перевищувати 100 °С. Тому необхідним елементом подібних установок пожежогасіння повинна бути камера охолодження.

Проведені теоретичні дослідження показали, що найбільш ефективним охолодження газової суміші, що генерується турбореактивним двигуном є дрібнодисперсна вода [1].

Була розроблена математична модель, що дає можливість визначити параметри процесу охолодження газової суміші в камері охолодження: витрати води, температуру і тиск парогазової суміші [2].

Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі були проведені експериментальні дослідження: визначення ефективності охолодження продуктів згорання в камері охолодження розпиленою водою; визначення температури, тиску і складу парогазової суміші на виході з камери згорання; визначення необхідної витрати води на охолодження продуктів згорання; визначення необхідних геометричних розмірів камери охолодження, а також способів підведення і розпилення води в камері.

Встановлено, що найбільший вплив на інтенсивність теплообміну в камері охолодження має дисперсність охолоджуючої рідини і кількість пари в потоці (паровміст) [3].

Середній діаметр крапель рідини, що вилітають з форсунки, визначається її параметрами і тиском на вході у форсунку. Подальше дроблення крапель залежить від параметрів газового потоку. Тому, як параметр, що визначає дисперсність крапель охолоджуючої рідини, візьмемо відношення кінетичної енергії газового потоку  $T = \frac{mW^2}{2}$  до його ентальпії  $H = mc_p T$ :

$$\frac{mW^2}{2mc_p T} = \frac{\kappa - 1}{2} \frac{W^2}{a^2} = \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \quad (1)$$

де  $m$  – масова витрата газу, кг/с;

$c_{p_2}$  – масова ізобарна теплоємність газів, Дж/(кг·К);

$\kappa$  – показник адіабати газової суміші;

$W$  – швидкість продуктів згоряння, м/с;

$a$  – місцева швидкість звуку, м/с;

$M$  – число Маха.

Параметр, що характеризує вплив паровмісту на теплообмін в камері охолодження, можна визначити як відношення витрати охолоджуючої рідини  $G_{ж}$  до витрати рідини  $G_{п}$ , що випарувалася:

$$N = \frac{G_{ж}}{G_{п}}, \quad (2)$$

де  $G_{ж}$  – витрати охолоджувальної рідини, кг/с;

$G_{п}$  – витрати рідини, що випарувалася, кг/с.

Таким чином, незалежними змінними, що визначають температуру газового потоку в камері охолодження, є безрозмірні параметри  $M$  і  $N$ .

При збереженні постійним співвідношення між витратою повітря і витратою палива в камері згоряння установки число Маха визначатиметься тільки витратою газу на вході в камеру охолодження. Параметр  $N$  також характеризується тільки витратою поданої на охолодження рідини. У такому разі в експерименті достатньо варіювати тільки два фактори: витрату газу і витрату охолоджуючої рідини в камері охолодження.

Якщо на натурі і в моделі дотримується рівність температури, швидкості і складу газової суміші, а також використовуються однакові форсунки для води, то в результаті аеродинамічної розпиленості рідини досягається подібність дисперсного складу рідкої фази. Оскільки середній діаметр крапель рідини є визначальним геометричним розміром двофазної системи газ-рідина, то цим забезпечується автотодельність режимів за критеріями Рейнольдса, Прандтля і Пекле:

$$Re = \frac{d_k u \rho}{\mu} = idem; \quad Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} = idem; \quad Pe = \frac{\Delta P}{\rho W^2} = idem, \quad (3)$$

де  $d_k$  – середній діаметр крапель рідини, м;

$u$  – швидкість крапель в парогазовій суміші, м/с;

$\rho$  – густина крапель рідини в парогазовій суміші, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

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

$c_p$  – ізобарна теплоємність води, Дж/(кг·К).

Таким чином, виділена з потоку на натурі елементарна струминка парогазової суміші, що характеризується діаметрами розподілених в ній крапель рідини, які рухаються з деякою швидкістю  $u$  відносно газу, в геометричному, гідродинамічному і тепловому відношенні адекватна такій же струминці, отриманій на лабораторній установці. Отже, залежності, які отримані для умов адіабатичної течії за результатами експериментів на моделі, можуть бути застосовані для опису процесів, що протікають в подібних режимах і на натурі.

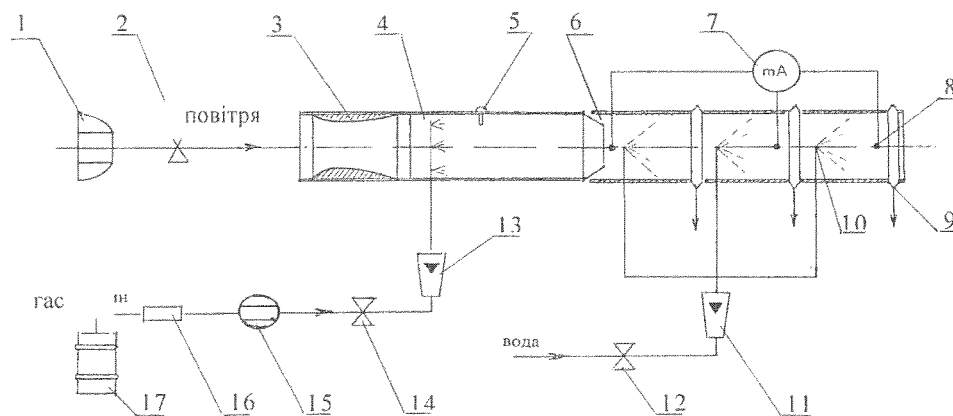
З урахуванням вищевикладеного була створена експериментальна установка, що моделює процес охолодження газового потоку диспергованою водою.

Установка (рис.1) виконана на базі компресора 1 типу ЗІФ-ШВ-5, має камеру згоряння 4 з системою подачі палива і камеру охолодження 6 з водозбірниками для води, що не випарувалася. Камера охолодження 6 складається з трьох роз'ємних секцій завдовжки  $L=1$  м і діаметром  $D = 0,1$  м кожна.

В трьох секціях камери охолодження (на вході в першу секцію і на виході з кожної секції) встановлені хромель-капельові термопари 8, підключені до самописного потенціометра

7 типу ЕПП-09-М2. Спаї термопар поміщалися в лабіринті сепаратора з мідної фольги, що виключають контакт з краплинною рідиною.

Як водорозбризувачі в лабораторній установці застосовувалися полідефлекторні (гвинтові) розпилювальні форсунки 10. Витікаючий під напором з насадки струмінь води потрапляє в конічно звужений внутрішній канал розпилювача, при цьому гострі краї верхніх граней, що створюють гвинтову лінію, поступово відсікають тонкі плівки рідини, створюючи суцільний заповнений факел диспергованої води.



1 – компресор; 2 – вентиль; 3 – сопло Вентурі; 4 – камера згоряння; 5 – запальна свічка; 6 – камера охолодження; 7 – потенціометр; 8 – термопара; 9 – водозбірник; 10 – розпилювальна форсунка; 11 – ротаметр; 12 – вентиль; 13 – ротаметр; 14 – вентиль; 15 – насос; 16 – фільтр; 17 – емність з паливом.

Рис. 1. Схема лабораторної установки:

Подача води в камеру охолодження 6 здійснювалася по трубопроводу до запірного вентиля 12, ротаметру 11 і розпилювальних форсунках 10.

Регулювання режиму роботи лабораторної установки проводилося зміною кількості повітря (вентилем 2) і палива (вентилем 14), що поступає в камеру згоряння 4 установки. Контроль витрати повітря виконувався за результатами вимірювань статичного і динамічного тиску за допомогою сопла Вентурі 3 з диференціальним манометром типу УС-350. Витрата палива контролювалася за показами ротаметра 13 типа РС-3. Витрата води на охолодження регулювалася вентилем, а її вимірювання виконувалося за допомогою ротаметра типа РС-5. Кількість води, що не випарувалася, визначалася за допомогою місцевих посудин у водозбірниках 9 камери охолодження 6. Відведення води і конденсату з водозбірника здійснювалося за допомогою газодинамічного конденсатовідвідника.

Для вимірювання об'ємної частки кисню в парогазовій суміші на виході з камери охолодження використовувався газоаналізатор кисню типа МН-5130. Для вимірювання повного і статичного тиску парогазової суміші по тракту камери охолодження використовувалися приймачі повного і статичного тиску (трубка Піто) і мікроманометри типа ММН-250.

При зміні кількості повітря, що поступає в камеру згоряння, одночасно змінювали і кількість палива так, щоб співвідношення витрат залишалось постійним

$$\frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{п}}} = 16,28, \quad (4)$$

де  $G_{\text{в}}$  – витрата повітря, кг/с;  
 $G_{\text{п}}$  – витрата палива, кг/с.

Це відповідало реальним режимам роботи пожежного автомобіля АГВГ-100 з коефіцієнтом надлишку повітря  $\alpha_0 = 1,1$ , а отже, забезпечувало тотожність температури і складу продуктів згоряння на моделі і в натурі.

З камери згоряння через звужувальне сопло діаметром 0,025 м продукти згоряння під тиском 0,12-0,15 МПа поступали в камеру охолодження із швидкістю 200-500 м/с.

В результаті випробування лабораторної установки була визначена область найстійкішої її роботи. Вона відповідала режимам, при яких в камеру згоряння 4 поступило від 0,19 до 0,4 кг/с повітря.

При коефіцієнті надлишку повітря  $\alpha_0 = 1,1$  кількість продуктів згоряння складала від 0,21 до 0,42 кг/с. Однак при максимальній витраті газу (0,42 кг/с) подача мінімальної кількості води (0,2 кг/с) явно не забезпечує охолодження парогазової суміші до необхідних температур, тому проведення експериментів з таким співвідношенням витрат і газу недоцільне.

З другого боку, при максимальній витраті води (0,4-0,41 кг/с) і мінімальній витраті газу (0,21 кг/с), коли  $G_{ж}/G_{г} > 2$ , втрати тиску в камері охолодження установки явно перевищать напір повітроподавальної установки (компресора).

Така несумісність регульованих факторів суперечить одній з основних передумов планового експерименту. Тому діапазон регулювання витрати газової суміші було представлено у вигляді двох інтервалів 0,2-0,35 кг/с і 0,35-0,42 кг/с. Для кожного інтервалу поставлений повний факторний експеримент з вирівнюванням витрати газу на двох, а витрати води на трьох рівнях (ПФЕ 2·3).

Рівні варіювання факторів для I і II серії експериментів приведені в таблиці 1, а матриця плану експерименту ПФЕ 2·3, складена відповідно до роботи [4] - в таблиці 2.

Таблиця 1. Рівні варіювання факторів

Символ фактора	Найменування фактора	I серія			II серія		
		-1	0	+1	-1	0	+1
$G_{г}$	Витрата газу, кг/с	0,21	0,25	0,30	0,35	0,40	0,42
$G_{ж}$	Витрата води, кг/с	0,20	0,23	0,28	0,33	0,38	0,40

Таблиця 2. Матриця повного факторного експерименту ПФЕ 2·3

Символ фактора	Номер експерименту					
	1	2	3	4	5	6
$G_{г}$	+1	-1	+1	-1	+1	-1
$G_{охл.ж}$	+1	+1	0	0	-1	-1

При коефіцієнті надлишку повітря рівному  $\alpha_0 = 1,1$ , встановленому в кожному експерименті, витраті газу відповідають параметри, значення яких приведені в таблиці 3.

Таблиця 3. Значення режимних параметрів в точках плану

Найменування параметрів	Значення параметрів			
Витрата газу, $G_r$ , кг/с	0,21	0,3	0,35	0,42
Витрата повітря, $G_v$ , кг/с, $G_E = G_r \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_o L}\right)$	0,19	0,28	0,33	0,39
Витрата палива, $G_r$ , кг/с, $G_T = \frac{G_r}{(1 + \alpha_o L)}$	0,0125	0,0178	0,0208	0,035
Швидкість газу, $W = G_r \cdot R_r \cdot \frac{T_r}{FP}$	350	497	580	696
Число Маха, $M = \frac{W}{a} = \frac{W}{19,5 \sqrt{T_r}}$	0,65	0,93	1,09	1,3

Кожний експеримент проводився в такому порядку. На початку газодинамічний тракт лабораторної установки продувався повітрям від компресора 1 (рис. 1). За допомогою вентиля 2 за показами диференціального манометра і тарувального графіка сопла Вентурі 3 встановлювали таку кількість повітря, яка відповідала заданому таблицею 3 значенню витрати газу в експерименті.

Потім включали насос 15, який з ємності 17 через фільтр 16 подавав паливо в камеру згоряння 4. Запалювання палива здійснювалося від свічки запалення 5. За допомогою вентиля 14 за показами ротаметра 13 відповідно до його тарувального графіка встановлювали задану таблицею 3 витрату палива, що відповідає даній витраті повітря. Це забезпечувало отримання газової суміші, склад і температура якої відповідали вихлопним газам установки АГВГ-100.

Воду для охолодження продуктів згоряння подавали від водопровідної мережі. Витрату води для заданого умовами експерименту витрати газу встановлювали відповідно до таблиць 1 і 2. Регулювання витрати води проводили вентиляем 12 за показами ротаметра 11. Зняття показів потенціометра 7 проводили після того, як стабілізувалося надходження води, що не випарувалася, з водозбірника 9 і вирівнювалися значення температур в контрольному і замірному перерізах.

З метою перевірки відтворності результатів вимірювань в кожній точці факторного простору було проведено по 3 досліди. Результати вимірювань параметрів в експериментах приведені в табл. 4.

Перевірка за критерієм Бартлета показала однорідність дисперсії змінених значень температури парогазової суміші в дослідах

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_i)^2, \quad (5)$$

де  $m$  – число повторних дослідів в  $i$ -ому експерименті;

$T_{ij}$  – зміна значення температури парогазової суміші, К;

$\bar{T}_i$  – середнє арифметичне значення температури в  $i$ -у експерименті, К.

Обчислене значення дисперсії відтворності результатів вимірювання температур по  $n=12$  експериментам дорівнювало

$$\sigma_{\text{експ}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sigma_j^2 = 10,5^2 \quad (6)$$

Таблиця 4. Результати вимірювань параметрів в експериментах

Витрата повітря, кг/с	Витрата палива, кг/с	Повний тиск, МПа	Витрата води, кг/с	Кількість води, що не випарувалась, кг/с	Температура парогазової суміші на виході із секцій, К		
					I	II	III
0,19	0,0125	0,123	0,2	0,033	675	440	350
				0,031	678	444	356
				0,038	670	438	348
0,19	0,0125	0,123	0,23	0,078	607	400	315
				0,068	602	398	312
				0,077	604	395	310
0,19	0,0125	0,0123	0,28	0,118	574	374	300
				0,126	580	380	310
				0,121	570	372	298
0,28	0,0178	0,141	0,2	0	690	460	370
				0,008	685	453	362
				0,006	692	461	372
0,28	0,0178	0,141	0,23	0,055	665	430	340
				0,0448	670	432	341
				0,0495	660	428	339
0,28	0,0178	0,141	0,28	0,0325	650	425	330
				0,03	658	430	334
				0,0333	647	422	328
0,33	0,0208	0,147	0,33	0,0957	640	410	325
				0,103	643	408	327
				0,099	638	402	320
0,33	0,0208	0,147	0,38	0,0857	620	408	310
				0,009	618	406	308
				0,086	615	403	303
0,33	0,0208	0,147	0,4	0,097	625	410	315
				0,106	630	415	318
				0,116	622	407	309
0,39	0,035	0,154	0,33	0,042	635	425	328
				0,045	630	420	332
				0,042	642	430	325
0,39	0,035	0,154	0,38	0,048	620	415	310
				0,052	615	412	308
				0,047	619	416	314
0,39	0,035	0,154	0,4	0,066	610	405	305
				0,063	618	410	310
				0,077	607	403	300

Для перевірки достовірності розробленої математичної моделі процесу охолодження продуктів згоряння були виконані на ЕОМ розрахунки температури парогазової суміші на виході з камери охолодження при вхідних параметрах процесу, відповідних кожному з проведених експериментів.

Результати розрахунку і експериментальні дані приведені в табл. 5.

Таблиця 5. Розрахункові і експериментальні значення температури парогазової суміші

Номер експерименту, n	Витрата газу $G_{г}$ , кг/с	Швидкість газу, $W_{г}$ , м/с	Витрата води $G_{ж}$ , кг/с	Температура, К			Коефіцієнт $N = \frac{G_{ж}}{G_{п}}$
				розрахункова по математичній моделі	експериментальне значення $\bar{T}_i$	розрахункова по емпіричній залежності [3]	
<b>I серія експериментів</b>							
1	0,30	560	0,33	423	405	413	1,28
2	0,25	487	0,28	412	394	382	1,78
3	0,13	560	0,33	461	444	446	1,17
4	0,15	487	0,28	430	412	418	1,46
5	0,30	560	0,3	539	531	519	1,02
6	0,15	487	0,28	466	459	453	1,23
<b>II серія експериментів</b>							
1	0,42	696	0,47	400	389	382	1,17
2	0,40	650	0,42	307	375	362	1,43
3	0,42	696	0,47	425	404	402	1,06
4	0,40	650	0,42	396	301	380	1,29
5	0,42	696	0,47	493	483	471	1,03
6	0,40	650	0,42	435	425	411	1,13

Статистична перевірка адекватності полягала у визначенні співвідношення між дисперсією відтворності (6) і залишковою дисперсією, що розраховується по формулі

$$\sigma_{ост}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - T_{ip})^2 = 15,6^2 \quad (7)$$

Відповідно до F-критерію Фішера [5] залишкову дисперсію і дисперсію відтворності можна вважати статично рівними, а розроблену математичну модель, яка адекватно представляє результати експерименту при виконанні умови

$$\frac{\sigma_{ост}^2}{\sigma_{експ}^2} = \frac{15,6^2}{10,5^2} = 2,2 < F_{\tau} \quad (8)$$

де  $F_m$  – табличне значення F-критерію Фішера для заданої довірчої імовірності і певних чисел ступенів свободи.

Для проведеного експерименту число ступенів свободи  $\nu_1 = n - 1 = 11$ ; при прийнятій довірчій імовірності 0,95  $F_T = 2,64$  і, отже, умова (8) виконується.

В результаті проведених експериментальних досліджень була підтверджена достовірність розробленої теоретичної моделі, що описує процес охолодження продуктів згоряння диспергованою водою в камері охолодження. Середньоквадратичне абсолютне відхилення розрахункових і експериментальних значень температури складає 17,6 °С.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лозинський Р.Я. Стационарні процеси взаємодії газових і водяних струменів у камері охолодження // Зб. наук. праць Севастопольського військово-морського інституту ім. П.С. Нахімова.- Севастополь, СВМІ, 2004.- № 2(5).- С. 183-186.
2. Дослідження процесів охолодження і вологонасичення високотемпературних газових струменів в обмежених каналах / Лозинський Р.Я., Зінченко І.М., Мамасв В.В., Ковалишин В.В. // Науковий вісник УкрНДІПБ.- К.: УкрНИИПБ. 2003.- № 2(8).- С. 22-27.
3. Лозинський Р.Я. Визначення параметрів подачі парогазової суміші для ліквідації пожежі на об'єктах підвищеної небезпеки // Пожежна безпека: Зб. наук. праць/ ЛІПБ МНС України.- 2004.- № 5.- С. 39-44.
4. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей.- М.: Металлургия, 1982.- 346 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных/ Пер. с англ.- М.: Мир, 1980.- 610 с.