

## **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОДАЧІ ПАРОГАЗОВОЇ СУМІШІ ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ ПОЖЕЖІ НА ОБ'ЄКТІ ПІДВИЩЕНОЇ НЕБЕЗПЕКИ**

Запропоновано спрощені математичні залежності для оперативного розрахунку необхідних витрат інертної парогазової суміші при гасінні пожежі на об'єктах підвищеної небезпеки

Ліквідація пожеж на техногенно небезпечних об'єктах супроводжується несприятливими факторами, що утруднюють ефективне застосування традиційних засобів водяного, пінного або порошкового гасіння. До них належать: висока задимленість і температура на підступах до місця пожежі; неможливість безпосереднього гасіння, пов'язана з небезпекою для життя пожежників; велика імовірність вибухів і обвалів на об'єкті, велика швидкість поширення пожежі.

У таких випадках, як правило, застосовують дистанційне об'ємне гасіння пожеж, засноване на заміщенні повітря, що надходить до місця пожежі, газом з низьким вмістом кисню. Як інертні гази, звичайно, використовують азот, диоксид вуглецю або парогазову суміш. При розвинених пожежах, коли необхідно подавати інертний газ з високою інтенсивністю і протягом тривалого часу, краще застосовувати парогазові установки.

Процес одержання парогазової суміші в цих установках полягає у спалюванні вуглекислого палива в потоці повітря, що проходить через установку, з наступним охолодженням продуктів згоряння водою й утвореною парогазовою сумішшю.

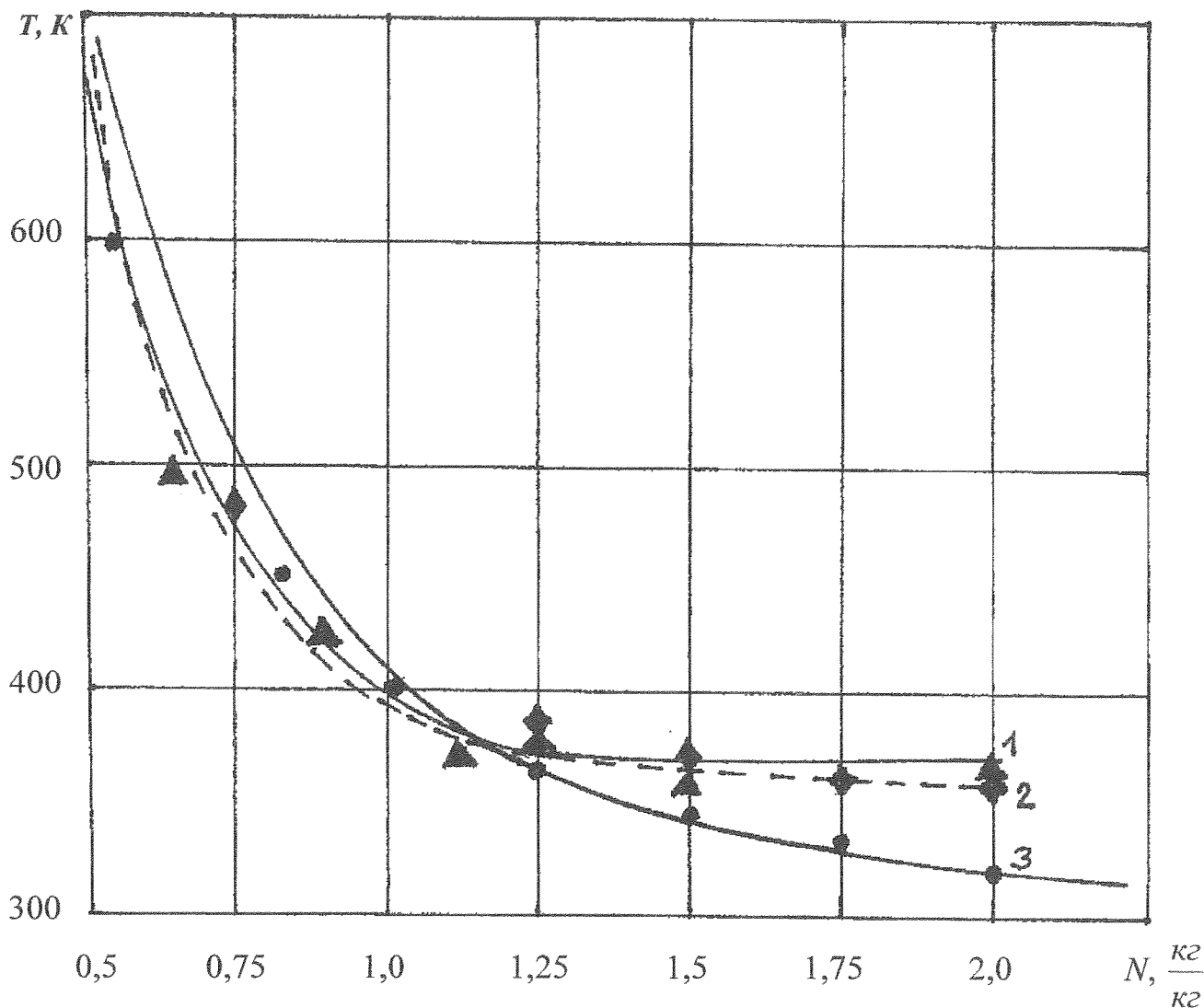
Для ефективної ліквідації горіння і наступної інертизації аварійного приміщення температура парогазової суміші повинна бути в межах від 80°C до 100°C, а об'ємна концентрація кисню не має перевищувати 10 %. Крім того, парогазову суміш необхідно подавати на вогнище з визначеної, безпечної для цього об'єкта, відстані.

Тому камера охолодження газової суміші, що генерує, повинна бути необхідним елементом усіх подібних установок пожежогасіння.

В результаті раніше проведених теоретичних досліджень процесу генерування інертної парогазової суміші в камері охолодження високопродуктивної парогазової установки, розроблена математична модель охолодження суміші дрібнодисперсною водою [1]. Було встановлено, що при заданих габаритних розмірах камери охолодження, продуктивності і напорі, парогазову суміш неможливо охолодити нижче від деякого граничного значення температури за рахунок підвищення витрати води (мал. 1). Крім того, зі збільшенням витрати води втрати тиску в камері, можливо, перевищать напір установки і відбудеться її запирання.

Розроблена математична модель дає можливість визначити параметри процесу генерування парогазової суміші в камері охолодження: витрати води, температуру і тиск парогазової суміші [2]. Однак, для встановлення взаємозв'язку цих параметрів у вигляді, зручному для виконання оперативних інженерних розрахунків при пожежі, необхідно отримати прості математичні залежності між втратами тиску в тракці камери охолодження, температурою парогазової суміші, напором установки, витратами газу й охолодженої води. Такі залежності можуть бути отримані тільки на основі експериментальних досліджень цього процесу.

У результаті теоретичних досліджень встановлено, що найбільший вплив на інтенсивність тепломасообміну в камері охолодження робить дисперсність охолодженої рідини (води) і кількість пари в потоці (паровміст).



- 1 – розрахункова залежність при  $M=1,2$ ;
- ▲ – експериментальні дані;
- 2 – розрахункова залежність при  $M=0,7$ ;
- ◆ – експериментальні дані;
- 3 – розрахункова залежність при  $M=1,0$ ;
- – експериментальні дані.

Рис.1. Залежність температури парогазової суміші  $T$  на виході з камери охолодження від критерію  $M$  і  $N$

Середній діаметр крапель, що утворяться в результаті аеродинамічного дроблення рідини в потоці газу, залежить від швидкості і початкової температури газу. Тому як параметр, що характеризує дисперсність краплі води в камері охолодження, приймемо відношення кінетичної енергії газу до його ентальпії:

$$\frac{W_z^2}{2C_{pz} \cdot T} = \frac{k-1}{2} \cdot \frac{W_z}{a^2} = \frac{k-1}{2} M^2, \quad (1)$$

де  $C_{pz}$  – питома теплоємність вихлопних газів, кДж/(кг·К);  
 $T$  – температура газу, К;  
 $k$  – коефіцієнт адіабати газової суміші;

$M = \frac{W_z}{a}$  – число Маха, відношення швидкості вихлопних газів ( $W_z$ ) до місцевої швидкості звуку ( $a$ ).

Паровміст газового потоку характеризується кількістю рідини, що знаходиться в пароподібному стані в даній масі газу. Кількість пари можна визначити як різницю між кількістю води, поданої в потік газу, і кількістю води, відведеної з камери охолодження (води, яка не випарувалась). При незмінних геометричних розмірах сопла установки і камери охолодження склад і температура газів на вході в камеру не змінюються. Тому паровміст можна характеризувати тільки витратою поданої води, а як критерій вибрати відношення витрати води до витрати газу

$$N = G_g/G_z, \quad (2)$$

де  $G_g, G_z$  – масові витрати води і газу відповідно, кг/с.

У такому випадку процес охолодження характеризується двома безрозмірними параметрами – числом Маха  $M$  і критерієм  $N$ .

Ці незалежні перемінні є безрозмірними величинами, тому апроксимуючу функцію представимо у виді безрозмірної температури  $\bar{T}$

$$\bar{T} = \frac{T_\kappa}{T_\mu} = b \cdot M^c \cdot N^d, \quad (3)$$

де  $b, c, d$  – коефіцієнти;

$T_\mu, T_\kappa$  – температури газу на вході і на виході з камери охолодження відповідно, К.

Для визначення коефіцієнтів  $b, c, d$  були проведені експериментальні дослідження на лабораторній установці, що моделює процеси в камері охолодження установки АГВГ-100, у ході яких визначалася витрата охолодженої води для охолодження при заданому значенні продуктивності і температури парогазової суміші.

Результати експериментальних і раніше проведених теоретичних досліджень [2] представлені на рис. 1.

Порівняння розрахункових і експериментальних значень температури парогазової суміші підтверджує вірогідність розробленої математичної моделі, що описує процес охолодження газів, що генеруються дисперсною водою. Середньоквадратичне абсолютне відхилення розрахункових і експериментальних значень температури становить 17,6 °С.

Для одержання залежності, що дозволяє виконати оперативні інженерні розрахунки без застосування ЕОМ за експериментальними даними, були визначені коефіцієнти регресії рівняння (3). Емпіричне рівняння для визначення температури парогазової суміші має вигляд:

$$\bar{T} = \frac{T_\kappa}{T_\mu} = 0,198 \cdot N^{-0,932} \cdot M^{-0,28} \quad (4)$$

Теоретично витрату води для охолодження 1 кг газу до необхідної температури ( $T=373\text{K}$ ) можна визначити з рівняння теплового балансу

$$H_T \cdot \eta_T \cdot G_T = G_e [c_{pв}(T-T_{60}) + r + c_{pn}(T-T_{60})], \quad (5)$$

де  $H_T$  – нижча теплотворна здатність палива, використаного в установці (гас),  $H_T = 43300$  кДж/кг;

$\eta_T$  – коефіцієнт повноти згорання палива,  $\eta_T = 0,98$ ;

$G_T$  – кількість палива, необхідна для одержання 1 кг газу при коефіцієнті надлишку палива  $\alpha_0 = 1,1$ ;  $G_T = 0,058$  кг;

$G_e$  – кількість води, необхідна для охолодження 1 кг газу, кг;

$c_{pв}, c_{pn}$  – середні в інтервалі температури ( $T_n \div T_k$ ) питомі ізобарні теплоємності води і пари відповідно,  $c_{pв} = 4218$  Дж/(кг·К),  $c_{pn} = 1900$  Дж/(кг·К);

$r$  – теплота паротворення,  $r = 22 \cdot 10^5$  Дж/кг;

$T_{60}$  – початкова температура води для охолодження,  $T_{60} = 293$  К.

З рівняння (5) випливає: якщо уся вода, що надходить у камеру охолодження, випаровується, то для охолодження 1 кг газів, що генеруються в установці до  $T=373$  К необхідно  $G_e = 0,98$  кг води.

Отже, абсолютна витрата води, необхідної для охолодження парогазової суміші, що генерується дорівнює

$$G_{60} = 0,98N, \quad (6)$$

при цьому параметр  $N$  визначається з рівняння (4).

Задаючи масову витрату ( $G_2$ ) газової суміші, її початковою ( $T_n$ ) і кінцевою ( $T_k$ ) температурами і розрахувавши швидкість газу і число Маха за формулами

$$W_2 = G_2 / (\rho_2 \cdot S_{к0}), \quad M = \frac{W_2}{19,5\sqrt{T_n}}, \quad (7)$$

де  $\rho_2$  – щільність газу, кг/м<sup>3</sup>;

$S_{к0}$  – площа перетину камери охолодження, м<sup>2</sup>,

з емпіричної залежності (4) знаходимо відносну, а за залежністю (6) – абсолютну витрату води для охолодження.

Отримані залежності (4), (6), (7) дозволяють в оперативних умовах без застосування ЕОМ, оцінивши обстановку на аварійному об'єкті, розрахувати необхідні для потреб пожежогасіння витрати парогазової суміші, палива й води для охолодження.

Наприклад, потрібно визначити витрату води  $G_{60}$  для охолодження  $G_2 = 10$  кг/з газів, які генеруються установкою АГВГ-100 для гасіння пожежі, від температури  $T_n = 2050$  К до  $T_k = 373$  К при швидкості газу у вхідному перетині камери охолодження  $W_2 = 350$  м/с.

Розрахуємо число Маха за формулою (7)

$$M = \frac{350}{19,5\sqrt{2050}} = 0,396.$$

З рівняння (4) визначимо параметр  $N$ :

$$N = \exp \left[ -\frac{1}{0,932} \ln \left( \frac{373 \cdot 0,396^{0,28}}{0,198 \cdot 2050} \right) \right] = 1,44.$$

З рівняння (5) випливає, що витрата води, яка випарувалася, на 1 кг газів, що генеруються становить  $G_v = 0,98$  кг. Отже, для умов розглянутого прикладу загальна необхідна витрата води становить

$$G_{во} = N \cdot G_v \cdot G_z = 1,44 \cdot 0,98 \cdot 10 = 14,11 \text{ кг/с.}$$

Необхідна об'ємна витрата парогазової суміші визначається з таких міркувань.

Дистанційне активне об'ємне гасіння парогазом на об'єктах підвищеної небезпеки здійснюють, насамперед, з метою створення вибухобезпечної атмосфери, заміщуючи визначену частину або все повітря, що надходить на аварійний об'єкт, парогазовою сумішшю з низьким вмістом кисню. У початковий період інертизації з моменту подачі парогазу на пожежний об'єкт і доти, поки атмосфера в ньому стане вибухобезпечною (вміст кисню менший ніж гранично припустиме значення, зумовлене видом палаючих матеріалів), сумарна кількість парогазової суміші і повітря, що надходять до місця горіння, повинна бути такою, щоб забезпечувати мінімально необхідну за газовим фактором інтенсивність провітрювання, тобто повинна виконуватися умова:

$$Q_v + Q_{уст} > Q_n, \quad (8)$$

де  $Q_v$  – кількість повітря, що надходить на аварійний об'єкт через вікна і прорізи з урахуванням витоків,  $\text{м}^3/\text{з}$ ;

$Q_{уст}$  – подача парогазової суміші по вентиляційному трубопроводу, забезпечувана установкою,  $\text{м}^3/\text{з}$ ;

$Q_n$  – мінімально необхідна інтенсивність провітрювання аварійного об'єкта для запобігання утворення на об'єкті вибухонебезпечних локальних скупчень горючих речовин, обумовлена розрахунком,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Якщо установка забезпечує повне заміщення повітря парогазовою сумішшю, то

$$Q_{уст} > 1,25 \cdot Q_n. \quad (9)$$

Умова (9) записана з урахуванням того, що на шляху руху від установки до місця горіння обсяг парогазової суміші внаслідок часткової конденсації пари знижується (у середньому до 20 %).

Таким чином, установка забезпечує створення вибухобезпечної атмосфери на аварійному об'єкті, якщо подавання парогазової суміші відповідає умові:

$$Q_{уст} > 1,25 \cdot Q_n \frac{21 - c_{\min}}{21 - c_{уст}}, \quad (10)$$

де  $Q_{уст}$  – подача парогазової суміші, забезпечувана установкою,  $\text{м}^3/\text{з}$ ;

$c_{\min}$  – нижня концентраційна межа вибухання газів, які горять, %;

$c_{уст}$  – об'ємна частка кисню в парогазовій суміші на виході з трубопроводу установки, %.

Наприклад, якщо на аварійному об'єкті можливий вибух вуглекислотних сумішей (вміст кисню не повинен перевищувати 12 %), а на виході з трубопроводу зміст кисню в парогазі становить  $c_{уст} = 5,0$  %, а необхідне для інертизації атмосфери подавання парогазу повинно становити

$$Q_{уст} = 1,25 \cdot Q_n \frac{21 - 12}{21 - 5} = 0,703 \cdot Q_n.$$

Придушення горіння досягається подальшим зниженням кисню на аварійному об'єкті ( $c_{min} < 8\%$ ), при цьому подавання парогазової суміші повинна бути збільшена до

$$Q_{уст_2} = 1,25 \cdot Q_n \frac{21-8}{21-5} = 1,016 \cdot Q_n.$$

При збільшенні концентрації кисню в парогазі на виході того трубопроводу до  $c_{уст} = 8,0\%$  інтенсивність подання зростає до

$$Q_{уст_3} = 1,25 \cdot Q_n \frac{21-8}{21-8} = 1,25 \cdot Q_n,$$

тобто в  $\frac{1,25}{1,016} = 1,23$  рази (на 23 %).

Для визначення напору парогазової суміші  $P$  приймається критерій

$$P > P_{тр} + \Delta P_{ко}, \quad (11)$$

де  $P_{тр}$  – протитиск із боку вентиляційного стояка, по якому парогаз подається на вогнище пожежі, Па;

$\Delta P_{ко}$  – втрати тиску в камері охолодження, Па.

Для визначення втрат тиску в камері охолодження було проведено імітаційне моделювання, на ЕОМ процесів у камері охолодження. Апроксимуючий поліном має вигляд

$$\Delta P_{ко} = 0,654 \cdot 10^{-2} \cdot G_T^2 - 0,291 \cdot 10^{-1} \cdot G_{ж}^2 + 0,845 \cdot 10^{-2} \cdot G_{ж}^2 - 0,0272 - 0,2P. \quad (12)$$

Втрати тиску у вентиляційному стояку визначалися обробкою експериментальних даних

$$P_{тр} = n, \quad (13)$$

де  $n = 300$  Па/м – емпіричний розмірний коефіцієнт;

$L$  – довжина вентиляційного стояка (діаметром 600 мм).

Таким чином, отримано зручні для інженерних розрахунків залежності для визначення параметрів роботи установки АГВГ-100. Виходячи з обстановки на аварійному об'єкті, визначається безпечна відстань  $L$  від об'єкта до установки, а також необхідна об'ємна витрата парогазової суміші (за формулою (10)). За формулою (12) розраховуються витрата води для охолодження і втрати тиску в камері охолодження. З урахуванням протитиску у вентиляційному стояку, обумовленому формулою (13), виходячи з умови (11), розраховується необхідний тиск установки.

## ЛІТЕРАТУРА

1 Лозинський Р.Я. Стаціонарні процеси взаємодії газових і водяних струменів у камері охолодження. // Збірник наукових 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.Н., Мамаєв В.В., Ковалишин В.В. // Науковий вісник УкрНДІПБ. - К.: УкрНДІПБ, 2003. - №2(8). - С. 22-27.