

*І.В. Паснак, ад'юнкт, ЛДУ БЖД,  
О.Е. Васильєва, к.т.н., доцент, ЛДУ БЖД,  
І.О. Мовчан, к.т.н., нач. факультету, ЛДУ БЖД*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМБІНОВАНОГО ВОДОПІННОГО СТВОЛА**

(представлено д-ром техн. наук Абрамовим Ю.О.)

Наведено результати експериментальних досліджень ствола комбінованої подачі суцільного струменя води та повітряно-механічної піни низької кратності, проведені на основі методу повнофакторного експерименту. Отримано емпіричну залежність для визначення довжини суцільного струменя вогнегасної речовини та знайдено оптимальні тактико-технічні параметри роботи ствола. Встановлено, що застосування запропонованого ствола дозволяє скоротити час ліквідування пожежі при необхідності зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода». Зокрема, час гасіння системи модельних вогнищ 6А – 21В – 6А запропонованим стволом комбінованої подачі скорочується в середньому на 27 % у порівнянні з часом гасіння існуючими «класичними» стволами.

**Ключові слова:** пожежний ствол, зміна типу вогнегасної речовини, повнофакторний експеримент, час гасіння пожежі.

**Постановка проблеми.** Провівши аналіз тактико-технічних характеристик ручних (переносних) стволів, які в залежності від свого призначення, можуть подавати на гасіння пожеж як струмінь води, так і струмінь повітряно-механічної піни низької кратності встановлено, що вони мають ряд суттєвих недоліків, пов'язаних з низькими параметрами при потребі зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода» [1]. Водночас ствол РСКУ-50А, який має найкращі показники, є високовартісним.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій.** Для вирішення цієї проблеми була розроблена конструкція комбінованого водопінного ствола [2] (рис. 1, 2), особливістю якого є можливість переходу від подачі суцільного струменя води до подачі повітряно-механічної піни низької кратності та навпаки з забезпеченням кращих параметрів у порівнянні з стволами, наведеними в [1].

Для визначення оптимальних тактико-технічних параметрів роботи ствола та його ефективності під час гасіння пожеж за необхідності зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода» була поставлена задача провести його експериментальні дослідження.

Відповідно до сформованих задач необхідно провести такі дос-

лідження:

- провести експериментальне дослідження ствола комбінованої подачі води та повітряно-механічної піни низької кратності для визначення його тактико-технічних характеристик;

- здійснити експериментальні порівняльні дослідження часу ліквідації пожежі запропонованим стволом та існуючими стволами (РС-70, СПП-4) при необхідності зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода».

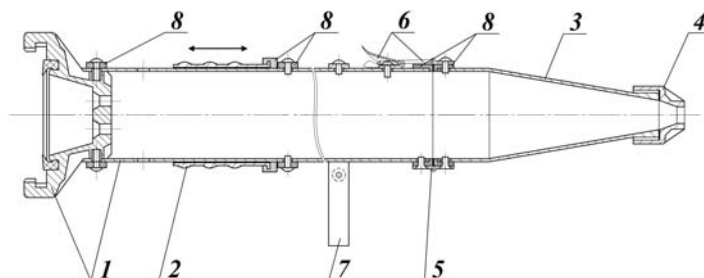


Рис. 1 – Ствол комбінований водопінний СКВП (положення для подачі суцільного струменя води): 1 – корпус (ствол повітряно-пінний типу СПП); 2 – трубчаста заглушка; 3 – конусоподібна частина; 4 – змінна насадка; 5 – рухомий шарнір; 6 – кріплення для з'єднання корпусу та конусоподібної частини; 7 – підтримуючий хомут; 8 – ущільнювачі.

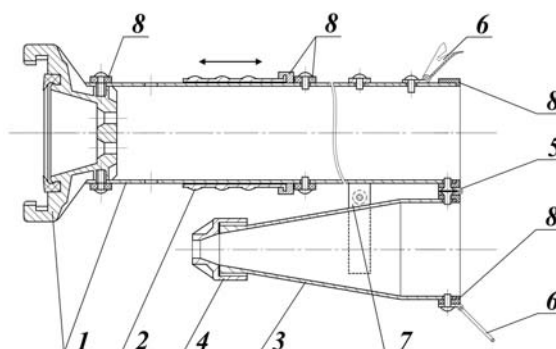


Рис. 2 – Ствол комбінований водопінний СКВП (положення для подачі повітряно-механічної піни низької кратності): 1 – корпус (ствол повітряно-пінний типу СПП); 2 – трубчаста заглушка; 3 – конусоподібна частина; 4 – змінна насадка; 5 – рухомий шарнір; 6 – кріплення для з'єднання корпусу та конусоподібної частини; 7 – підтримуючий хомут; 8 – ущільнювачі.

**Постановка задачі та її рішення.** На першому етапі експериментальних досліджень визначаємо залежність довжини  $L$  суцільного струменя води в залежності від тиску  $P$  вогнегасної речовини (води), діаметра  $d$  насадка ствола та кута  $\alpha$  його нахилу на основі методу повнофакторного експерименту типу  $2^3$ . Даний тип експерименту передбачає врахування трьох факторів, хоча загальновідомо, що на довжину суцільного струменя впливає ще і ряд інших чинників. Для того, щоб внести елемент випадковості впливу цих факторів на результат експерименту, встановлюємо випадкову послідовність проведення дослідів у часі. Це необхідно для обґрунтованого використання

апарату математичної статистики. Тому експериментальні дослідження згідно [6] проводились у такій послідовності відповідно до план-матриці експериментальних досліджень: 5, 2, 3, 8, 8, 5, 1, 7, 4, 6, 3, 2, 6, 4, 1, 7. Значення параметрів приймаємо в допустимих межах згідно стандартів та вимог.

Проведемо кодування факторів, перевівши натуральні величини в безрозмірні (табл. 1).

**Таблиця 1 – Рівні зміни факторів**

Рівень факторів		P, кПа		d, мм		α, °	
Назва	Кодоване значення	$\tilde{X}_1 = P$	$\ln \tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2 = d$	$\ln \tilde{X}_2$	$\tilde{X}_3 = \alpha$	$\ln \tilde{X}_3$
Верхній	+1	600	6,3969	25	3,2189	45	3,8066
Основний	0	400	–	19	–	25	–
Нижній	-1	200	5,2983	13	2,5649	5	1,6094

Використавши табл. 1, побудуємо матрицю планування та результатів повнофакторного експерименту типу  $2^3$ , де відображуємо результати досліджень, кожне з яких проведено двічі.

**Таблиця 2 – План-матриця експериментальних досліджень**

№ дослідю	Фактори						Результати дослідів		
	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		X <sub>3</sub>		L <sub>1, м</sub>	L <sub>2, м</sub>	$\bar{L}, м$
	код	P, кПа	код	d, мм	код	α, °			
1	+1	600	+1	25	+1	45	20	20,5	20,25
2	-1	200	+1	25	+1	45	12	11	11,5
3	+1	600	-1	13	+1	45	30	29	29,5
4	-1	200	-1	13	+1	45	17	16,5	16,75
5	+1	600	+1	25	-1	5	17	18	17,5
6	-1	200	+1	25	-1	5	7,5	8	7,75
7	+1	600	-1	13	-1	5	25	25,5	25,25
8	-1	200	-1	13	-1	5	10,5	11	10,75

Перетворимо незалежні змінні  $\tilde{X}_i$  (табл. 1) в безрозмірні величини за залежністю [3]:

$$X_i = \frac{2 \cdot (\ln \tilde{X}_i - \ln \tilde{X}_{i\max})}{\ln \tilde{X}_{i\max} - \ln \tilde{X}_{i\min}} + 1 \tag{2}$$

Звідси маємо:

$$\begin{aligned} X_1 &= 1,8205 \cdot \ln P - 10,6455 \\ X_2 &= 3,0581 \cdot \ln d - 8,8437 \\ X_3 &= 0,9102 \cdot \ln \alpha - 2,4650 \end{aligned} \tag{3}$$

Запишемо рівняння в кодових змінних з введенням членів, які

враховують взаємодію факторів:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

Визначаємо коефіцієнти для моделі (4) з врахуванням експериментально отриманих значень:

$$b_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{in} \ln \bar{L}_i \quad (5)$$

де  $X_{in}$  – код фактора;  $\bar{L}$  – середнє значення результатів експериментальних досліджень за певних значень факторів;  $N$  – кількість дослідів.

За результатами експериментальних досліджень були отримані значення коефіцієнтів рівняння регресії (4):  $b_0=2,7709$ ;  $b_1=0,3500$ ;  $b_2=-0,1808$ ;  $b_3=0,1425$ ;  $b_{12}=-0,0050$ ;  $b_{13}=-0,0671$ ;  $b_{23}=-0,0073$ ;  $b_{123}=0,0049$ .

При однаковій кількості паралельних дослідів  $r$  (в нашому випадку  $r = 2$ ) на кожному поєднанні рівнів факторів відтворюваність перевіряється за критерієм Кохрена [5]:

$$G = \frac{S_{pi \max}^2}{S_{\delta}^2} \leq G_{(0,05; N; f_r)} \quad (6)$$

де  $S_{pi \max}^2$  – найбільше значення дисперсії розсіювання  $S_{pi}^2$ ;  $N$  – кількість дослідів (в нашому випадку  $N=8$ );  $f_r$  – кількість ступенів вільності кожної оцінки (в нашому випадку  $f_r=r-1=2-1=1$ );  $G_{(0,05; N; f_r)}$  – табличне значення критерію Кохрена [5].

Дисперсія розсіюваності визначається за залежністю  $S_{\delta}^2 = \sum_{i=1}^{16} S_{pi}^2$ ,

де  $S_{pi}^2$  – дисперсія розсіюваності на кожному досліді;  $S_{pi} = \ln L_{i(1,2)} - \ln \bar{L}_i$ . В нашому випадку за результатами експериментальних досліджень  $S_{\delta}^2 = 0,010127$ . Тоді критерій Кохрена буде дорівнювати

$$G = \frac{S_{pi \max}^2}{S_{\delta}^2} = \frac{0,001971}{0,010127} = 0,194628 < G_{(0,05; 8; 1)} = 0,680$$

Отже, згідно [5], для нашого випадку відтворюваність дослідів забезпечується.

Оцінку значущості коефіцієнтів регресії здійснюємо за допомогою критерію Стюдента [3-5]. Коефіцієнт вважається значущим,

якщо виконується нерівність з урахуванням половини довжини довірчого інтервалу:

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t_{(0,05;f)} S(b_i) \quad (7)$$

де  $t_{(0,05;f)}$  – критичне значення критерію Стюдента для  $f=N(r-1)$  (для нашого випадку маємо  $f=8(2-1)=4$ ,  $\alpha=0,05$ ; згідно [5]  $f=2,31$ ).

$$S(b_i) = \pm \sqrt{\frac{S_p^2}{N \cdot r}} = \pm \sqrt{\frac{0,010127}{8 \cdot 2}} = \pm 0,025158$$

Отже, половина довжини довірчого інтервалу:

$$\Delta b_i = 2,31 \cdot 0,025158 = 0,058115$$

Встановлено, що значущими коефіцієнтами моделі є  $|b_0|=2,7709$ ;  $|b_1|=0,3500$ ;  $|b_2|=0,1808$ ;  $|b_3|=0,1425$ ;  $|b_{13}|=0,0671$ , а коефіцієнти  $|b_{12}|=0,0050$ ;  $|b_{23}|=0,0073$ ;  $|b_{123}|=0,0049$  – незначущими.

З врахуванням значущих коефіцієнтів, модель (4) набуде вигляду:

$$\hat{Y} = 2,7709 + 0,35X_1 - 0,1808X_2 + 0,1425X_3 - 0,0671X_1X_3 \quad (8)$$

Перевірку адекватності моделі здійснюємо за критерієм Фішера. Стверджувати, що модель є адекватна, можна у випадку, коли виконується нерівність [3]:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_e^2} \leq F_{(0,05;f_1;f_2)} \quad (9)$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності, визначається за залежністю

$$S_{ad}^2 = \frac{r}{N-m} \sum_{i=1}^N (\ln \bar{L}_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (10)$$

де  $\hat{Y}_i$  – розрахункове значення параметра згідно залежності (8) після підстановки значень (-1) та (+1) згідно план-матриці експериментальних досліджень;  $F_{(0,05;f_1;f_2)}$  - критичне значення критерію Фішера при  $\alpha=0,05$ ;  $f_1=N-m$ ;  $f_2=N(r-1)$ .

В нашому випадку маємо  $f_1=8-5=3$  ( $m$  – число членів апроксимуючого полінома, в даному випадку  $m=5$ ),  $f_2=8(2-1)=8$ , отож, згідно табли-

чних значень [5]  $F_{кр}=4,07$ .  $S_{\epsilon}^2$  – дисперсія відтворюваності

$$S_{\epsilon}^2 = \frac{S_p^2}{N(r-1)} = \frac{0,010127}{8(2-1)} = 0,0012658$$

За рівнянням (8) знаходимо значення параметра  $\hat{Y}_i$ . Маємо  $\hat{Y}_1 = 3,0155$ ;  $\hat{Y}_2 = 2,4497$ ;  $\hat{Y}_3 = 3,3771$ ;  $\hat{Y}_4 = 2,8113$ ;  $\hat{Y}_5 = 2,8647$ ;  $\hat{Y}_6 = 2,0305$ ;  $\hat{Y}_7 = 3,2263$ ;  $\hat{Y}_8 = 2,3921$ .

За залежністю (10) знаходимо дисперсію адекватності моделі:

$$S_{\hat{a}\hat{a}}^2 = \frac{2}{8-5} \cdot 0,000817 = 0,0005446$$

Знаходимо розрахункове значення критерію Фішера за залежністю (9):

$$F = \frac{0,0005446}{0,0012658} = 0,4302417 < F_{(0,005;3;8)} = 4,07$$

Отже, модель (8) є адекватною.

Для того, щоб встановити точність опису експериментальних даних рівнянням регресії, визначаємо коефіцієнт множинної кореляції за залежністю:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln \bar{L}_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (\ln \bar{L}_i - \bar{L}^*)^2}} \quad (11)$$

де  $\bar{L}^*$  – середнє значення функції  $\ln \bar{L}_i$ .

Здійснивши необхідні розрахунки, знаходимо коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{0,000817}{1,4408924}} = 0,9997164$$

Як бачимо, коефіцієнт  $R$  наближається до 1, а, отже, рівняння (8) майже повністю описує результати експериментальних досліджень.

Для здійснення переходу до моделі в натуральних змінних підставимо (3) в (8) та проведемо обрахунок. В результаті отримаємо кінцеву модель процесу впливу конструктивного виконання та технологічних чинників запропонованого ствола комбінованої подачі води та повітряно-механічної піни низької кратності на довжину суцільного струменя води  $L$

$$L = 0,2304 \cdot P^{0,9383} \cdot d^{-0,5529} \cdot \alpha^{(0,7799-0,1112 \cdot \ln P)} \quad (12)$$

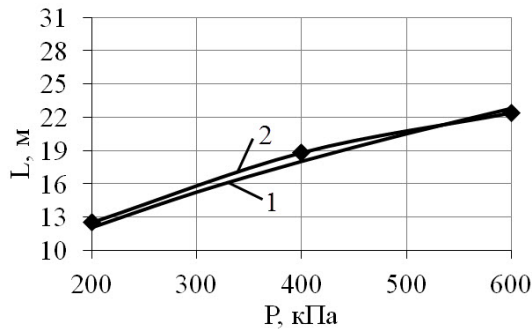
Як видно з залежності (12), основними чинниками, котрі впливають на довжину суцільного струменя води  $L$  експериментального взірця ствола комбінованої подачі суцільного струменя води та повітряно-механічної піни низької кратності, є тиск  $P$  вогнегасної речовини (води), діаметр  $d$  насадка ствола та кут  $\alpha$  його нахилу. Розглянемо, як безпосередньо впливає кожен з цих чинників на довжину суцільного струменя води  $L$ .

Діаметри насадок приймаємо з врахуванням стандартів. Для встановлення адекватності математичної моделі при використанні середніх значень ( $P=400$  кПа,  $d=19$  мм,  $\alpha=25^\circ$ ) були виконані контрольні дослідження. На підставі отриманих результатів будемо графічні залежності довжини суцільного струменя води та здійснюємо порівняння результатів з контрольними експериментальними випробуваннями.

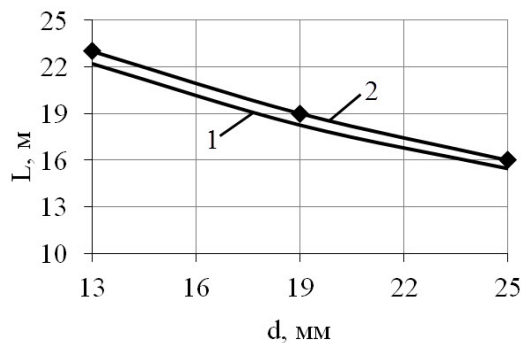
Відносну похибку досліду визначаємо за залежністю:

$$\delta = \frac{L_{к.д.} - L_{мод.}}{L_{к.д.}} \cdot 100\% \quad (13)$$

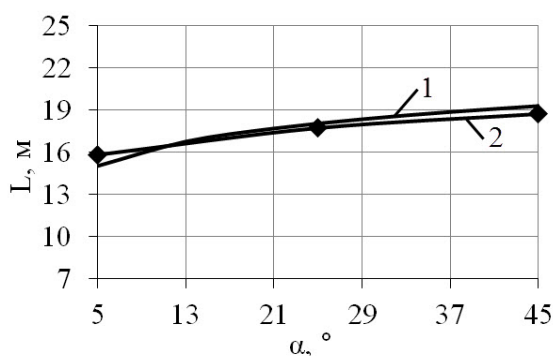
де  $L_{к.д.}$  – отримане значення довжини суцільного струменя під час контрольного експериментального дослідження;  $L_{мод.}$  – довжина струменя за моделлю.



**Рис. 3 – Залежність довжини суцільного струменя води  $L$  від тиску  $P$  при середньому значенні діаметра насадки  $d=19$  мм;  $\alpha=\text{const}$  ( $25^\circ$ ): 1 – за моделлю; 2 – контрольне експериментальне дослідження**



**Рис. 4 – Залежність довжини суцільного струменя води  $L$  від діаметра насадки  $d$  при середньому куті нахилу  $\alpha=25^\circ$ ;  $P=\text{const}$  (400 кПа): 1 – за моделлю; 2 – контрольне експериментальне дослідження**



**Рис. 5 – Залежність довжини суцільного струменя води  $L$  від  $\alpha$  при середньому значенні тиску  $P=400$  кПа;  $d=\text{const}$  (19 мм): 1 – за моделлю; 2 – контрольне експериментальне дослідження**

Порівнявши результати графічних залежностей та здійснивши розрахунок відносної похибки досліду було встановлено, що модель процесу впливу конструктивного виконання та технологічних чинників запропонованого ствола комбінованої подачі води та повітряно-механічної піни низької кратності на довжину суцільного струменя води відносно результатів контрольних експериментальних досліджень має похибку в межах від 1,69% до 4,99%.

Проаналізувавши графічні залежності встановлено, що при збільшенні тиску з 200 кПа до 600 кПа (в 3 рази) довжина суцільного струменя ствола комбінованої подачі збільшується в 1,96 раз. При збільшенні діаметра насадки від 13 мм до 25 мм (в 1,92 рази) довжина суцільного струменя зменшується в 1,44 рази. Зміна кута нахилу від  $5^\circ$  до  $45^\circ$  (в 9 раз) призводить до збільшення довжини суцільного струменя в 1,52 рази. Отже, бачимо, що найбільше на довжину суцільного струменя ствола комбінованої подачі впливає тиск вогнегасної речовини.

На підставі математичної моделі було визначено оптимальні значення технічних параметрів роботи комбінованого водопінного ствола, які наведені в табл. 3.

**Таблиця 3 – Тактико-технічні характеристики запропонованого ствола**

Технічні характеристики	Режим подачі ПМП	Режим подачі води (насадка $d=13$ мм)
Робочий тиск, кПа	600	600
Розхід води, л/с	5,64	4,5
Розхід піноутворювача, л/с	0,36	–
Кратність піни	8	–
Довжина струменя, м	27	29,5

На другому етапі проводимо експериментальне дослідження часу ліквідування пожежі запропонованим стволом комбінованої подачі при необхідності зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода» на підставі порівняння з способом гасіння існуючими стволами. Результати експериментальних досліджень часу гасіння



системи модельних вогнищ 6А – 21В – 6А дослідним взірцем ствола комбінованої подачі вогнегасної речовини показали, що  $\tau_{\text{сер.}}=118,6$  с. Водночас встановлено, що при послідовному застосуванні стволів типу РС-70, СПП-4 та РС-70  $\tau_{\text{сер.}}=150,2$  с. Кожне експериментальне дослідження часу ліквідування пожежі проводилось 10 разів.

Порівнявши результати експериментальних досліджень встановлено, що застосування ствола комбінованої подачі компактного струменя води та повітряно-механічної піни низької кратності дозволяє скоротити час ліквідування пожежі при необхідності зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода». Зокрема, час гасіння системи модельних вогнищ 6А – 21В – 6А запропонованим стволом комбінованої подачі скорочується в середньому на 27 % у порівнянні з часом гасіння існуючими «класичними» стволами. Така різниця в часі зумовлюється, головним чином, затримками процесу ліквідування пожежі у зв'язку з заміною пристрою подачі вогнегасної речовини (пожежних стволів).

**Висновки.** 1. Отримано адекватну емпіричну залежність для визначення довжини суцільного струменя вогнегасної речовини від тиску  $P$ , діаметра  $d$  насадка ствола, кута  $\alpha$  його нахилу та знайдено оптимальні тактико-технічні параметри роботи запропонованого ствола. Результати контрольних досліджень показали, що найбільша відносна похибка моделі в межах від 1,69% до 4,99%, що є допустимим для досліджень даного характеру.

2. Математична модель повністю описує досліджуваний процес, оскільки коефіцієнт множинної кореляції  $R=0,9997164$  наближається до 1.

3. Встановлено, що найбільший вплив на довжину суцільного струменя ствола комбінованої подачі має тиск вогнегасної речовини. При збільшенні тиску з 200 кПа до 600 кПа (в 3 рази) довжина суцільного струменя ствола комбінованої подачі збільшується в 1,96 раз. При збільшенні діаметра насадки від 13 мм до 25 мм (в 1,92 рази) довжина суцільного струменя зменшується в 1,44 рази. Зміна кута нахилу від  $5^\circ$  до  $45^\circ$  (в 9 раз) призводить до збільшення довжини суцільного струменя в 1,52 рази.

4. Встановлено, що застосування ствола комбінованої подачі компактного струменя води та повітряно-механічної піни низької кратності дозволяє скоротити час ліквідування пожежі при необхідності зміни типу вогнегасної речовини «вода – повітряно-механічна піна – вода». Зокрема, час гасіння системи модельних вогнищ 6А – 21В – 6А запропонованим стволом комбінованої подачі скорочується в середньому на 27 % у порівнянні з часом гасіння існуючими «класичними» стволами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Васильєва О.Е. Підвищення ефективності гасіння пожеж ручними (переносними) стволами / О.Е. Васильєва, І.В. Паснак, С.З.

Курташ // Пожежна безпека: Зб. наук. пр. – Л.: ЛДУБЖД, 2010. – №17. – С. 113-117.

2. Пат. 57620 Україна, МПК (2011.01), А62С 31/00. Ствол комбінованої подачі компактного струменя води та повітряно-механічної піни низької кратності / О.Е. Васильєва, І.В. Паснак. № и 2010 08728; заявл. 13.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. №5.

3. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.

4. Биндер К., Хеерман Д.В. Моделирование методом Монте-Карло в статистической физике. Пер. с англ. В.Н. Задкова. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 144 с.

5. Семенов С. А. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. Учебно-методическое пособие. М.: ИПЦ МИТХТ, 2001 г., 93 с.

6. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.

І.В. Паснак, Е.Э. Васильєва, І.А. Мовчан

**Експериментальне дослідження тактико-технічних параметрів комбінованого водопенного ствола**

Представлены результаты экспериментальных исследований ствола комбинированной подачи сплошной струи воды и воздушно-механической пены низкой кратности, полученные на основе метода полнофакторного эксперимента. Получено эмпирическую зависимость для определения длины сплошной струи огнетушащего вещества и найдены оптимальные тактико-технические параметры работы ствола. Установлено, что применение предложенного ствола позволяет сократить время ликвидации пожара при необходимости изменения типа огнетушащего вещества «вода – воздушно-механическая пена – вода». В частности, время тушения системы модельных очагов 6А – 21В – 6А предложенным стволом комбинированной подачи сокращается в среднем на 26,6% по сравнению с временем тушения существующими «классическими» стволами.

**Ключевые слова:** пожарный ствол, изменение типа огнетушащего вещества, полнофакторный эксперимент, время тушения пожара.

I.V. Pasnak, O.E. Vasilyeva, I.O. Movchan

**Experimental investigation of performance characteristics of compound foam nozzle**

The article deals with the results of experimental investigations of nozzle of compound continuous water stream supply and air-mechanic foam of low multiplicity done with full-factorial experiment. Empirical dependence for length definition of continuous stream fire-fighting substances is determined. Optimum performance characteristics of nozzle work are found. Usage of such a nozzle can reduce the time of fire extinguishment changing the kind of fire-extinguishing substance 'water - air-mechanic foam - water' is defined. In particular, the time of extinguishment 6A – 21B – 6A fires with the proposed nozzle of compound supply reduced to 26, 6 % compared to the time of extinguishment with «classical» types of nozzle.

**Keywords:** nozzle, modification of type of fire extinguishing substance, full-factorial experiment, time of fire extinguishment.