

ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО ЛАФЕТНОГО СТВОЛА

Розглянуто результати експериментальних досліджень вібраційного лафетного ствола, на підставі яких отримано емпіричні залежності для визначення довжини кологогвинтового струменя та площі покриття вогнища пожежі. На підставі цих залежностей встановлено оптимальні технічні параметри роботи вібраційного лафетного ствола.

У Львівському інституті пожежної безпеки була розроблена конструкція лафетного вібраційного ствола [1, 2], яка дає можливість подачі кологогвинтового струменя вогнегасної рідини у вогнище пожежі. Попередні експериментальні дослідження показали, що розроблена конструкція лафетного вібраційного ствола при використанні тільки збурених коливань без урахування резонансу системи не дає можливості досягти задовільних технічних характеристик роботи ствола. Тому була поставлена задача використати для роботи вібраційного лафетного ствола збурені коливання, які можуть бути отримані тільки при збігу власних і вимушених коливань (резонансні коливання). В процесі виконання цих досліджень проводився повнофакторний експеримент для встановлення основних технічних характеристик роботи вібраційного лафетного ствола [3].

При виконанні повнофакторного експерименту досліджував вплив амплітуди коливання ствола A , діаметра насадки d , та тиску рідини P на довжину L кологогвинтового струменя та площу покриття S вогнища пожежі.

Для проведення експериментальних досліджень були прийняті такі межі зміни факторів процесу при встановленні ствола на висоті 0,8 м від опорної поверхні під кутом 10° :

- амплітуда коливань ствола $A_{\max} = 100$ мм, $A_{\min} = 6$ мм;
- діаметр отвору насадки $d_{\max} = 28$ мм, $d_{\min} = 12$ мм;
- тиск вогнегасної рідини на вході $P_{\max} = 6$ атм, $P_{\min} = 3$ атм.

Для узагальнення результатів експериментальних досліджень були вибрані такі форми емпіричних залежностей:

- для встановлення емпіричної залежності між довжиною кологогвинтового компактного струменя L та режимами витікання вогнегасної рідини A , d , P у вигляді степеневі залежності

$$L = C_L A^m d^n P^w, \quad (1)$$

де C_L - постійний коефіцієнт; m , n , w – показники степеня;

- для встановлення емпіричної залежності між площею пожежегасіння кологогвинтовим компактным струменем S та режимами витікання вогнегасної рідини A , d , P у вигляді степеневі залежності

$$S = C_S A^k d^r P^z, \quad (2)$$

де C_S - постійний коефіцієнт; k, r, z – показники степеня.

Перетворення натуральних чинників A, d, P в кодовані безрозмірні змінні виконувалося за допомогою залежності

$$X_i = \frac{2 \cdot (\ln \tilde{X}_i - \ln \tilde{X}_{i \max})}{\ln \tilde{X}_{i \max} - \ln \tilde{X}_{i \min}} + 1, \quad (3)$$

де \tilde{X}_i - відповідні натуральні змінні.

Результати кодування натуральних змінних зведені у табл.1 і отримані за такими залежностями

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{2 \cdot (\ln A - 4,6052)}{4,6052 - 1,7918} + 1 = 0,7109 \cdot \ln A - 2,2737 \\ X_2 &= \frac{2 \cdot (\ln d - 3,3322)}{3,3322 - 2,4849} + 1 = 2,3604 \cdot \ln d - 6,8655 \\ X_3 &= \frac{2 \cdot (\ln P - 1,7918)}{1,7918 - 1,0986} + 1 = 2,8854 \cdot \ln P - 4,1699 \end{aligned} \right\}; \quad (4)$$

Таблиця 1

Рівні зміни чинників

Рівень факторів		A, мм		d, мм		P, атм	
Назва	Кодоване значення	$\tilde{X}_1 = A$	$\ln \tilde{X}_1$	$\tilde{X}_2 = d$	$\ln \tilde{X}_2$	$\tilde{X}_3 = P$	$\ln \tilde{X}_3$
Верхній	+ 1	100	4,6052	28	3,3322	6	1,7918
Основний	0	53	-	20	-	4,5	-
Нижній	- 1	6	1,7918	12	2,4849	3	1,0986

Приведення нелінійної залежності, наприклад, (1) до лінійного виду виконуємо логарифмуванням

$$\ln L = \ln C_L + m \cdot \ln A + n \cdot \ln d + w \cdot \ln P \quad (5)$$

Після введення заміни: $\ln L = Y$; $\ln C_L = b_0$; $m = b_1$; $n = b_2$; $w = b_3$, із застосуванням кодованих змінних (див.табл.1), отримуємо постульовану емпіричну модель залежності довжини коловогвинтового компактного струменя L від режимів витікання вогнегасної рідини у кодованій формі. Аналогічно приводимо нелінійну залежність (2) до лінійного виду за допомогою логарифмування.

Після цього було зроблено вибір плану експерименту. Розрахунок коефіцієнтів емпіричної моделі виконувався за допомогою матриці повного факторного експерименту (ПФЕ) типу 2^3 (число незалежних факторів – 3, число рівнів зміни кожного фактора – 2 (див. табл.1)). Число дослідів за планом експериментів - $N = 8$.

Матриця ПФЕ типу 2^3 дозволяє також визначити коефіцієнти регресії з урахуванням взаємодії факторів. Матриця планування та результати експериментів з визначення довжини коловогвинтового струменя наведені в табл. 2.

На підставі результатів експериментальних досліджень було складено рівняння регресії з кодованими змінними, що враховує взаємодію факторів.

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3. \quad (6)$$

Матриця планування експериментів

№ дослідів	Фактори						Результати дослідів				$\bar{L}, \text{м}$	\bar{Y}_v
	X_1		X_2		X_3		$L_1, \text{м}$	$Y_{v1} = \ln L_1$	$L_2, \text{м}$	$Y_{v2} = \ln L_2$		
	код	A, мм	код	d, мм	код	P, атм						
1	+1	100	+1	28	+1	6	32	3,4657	33	3,4965	32,5	3,4811
2	- 1	6	+1	28	+1	6	30	3,4012	28	3,3322	29	3,3667
3	+1	100	- 1	12	+1	6	21	3,0445	22,5	3,1135	21,75	3,0790
4	- 1	6	- 1	12	+1	6	19	2,9444	20	2,9957	19,5	2,9701
5	+1	100	+1	28	- 1	3	19	2,9444	21	3,0445	20	2,9945
6	- 1	6	+1	28	- 1	3	17,5	2,8622	17	2,8332	17,25	2,8477
7	+1	100	- 1	12	- 1	3	19	2,9444	20	2,9957	19,5	2,9701
8	- 1	6	- 1	12	- 1	3	17	2,8332	19	2,9444	18	2,8888

Відтворюваність результатів дослідів забезпечується повторюваністю останніх в кількості $r = 2$.

Коефіцієнти регресії визначалися шляхом сумування почленних добутоків стовпця матриці плану експериментів 2^3 на стовпець \bar{Y}_v за такими залежностями

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{v=1}^N X_{iv} \cdot \bar{Y}_v ;$$

$$b_0 = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (+1) + 3,079 \cdot (+1) + 2,970 \cdot (+1) + 2,994 \cdot (+1) + 2,848 \cdot (+1) + 2,970 \cdot (+1) + 2,889 \cdot (+1))}{8} =$$

$$= 3,0748$$

$$b_1 = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (-1) + 3,079 \cdot (+1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,994 \cdot (+1) + 2,848 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (+1) + 2,889 \cdot (-1))}{8} =$$

$$= 0,0564$$

$$b_2 = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (+1) + 3,079 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,994 \cdot (+1) + 2,848 \cdot (+1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,889 \cdot (-1))}{8} =$$

$$= 0,0977$$

$$b_3 = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (+1) + 3,079 \cdot (+1) + 2,970 \cdot (+1) + 2,994 \cdot (-1) + 2,848 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,889 \cdot (-1))}{8} =$$

$$= 0,1495$$

$$b_{12} = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (-1) + 3,079 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (+1) + 2,994 \cdot (+1) + 2,848 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,889 \cdot (+1))}{8} =$$

$$= 0,0089$$

$$b_{13} = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (-1) + 3,079 \cdot (+1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,994 \cdot (-1) + 2,848 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,889 \cdot (+1))}{8} =$$

$$= -0,0006$$

$$b_{23} = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (+1) + 3,079 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,994 \cdot (-1) + 2,848 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,889 \cdot (+1))}{8} =$$

$$= 0,1019$$

$$b_{123} = \frac{(3,481 \cdot (+1) + 3,367 \cdot (-1) + 3,079 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (+1) + 2,994 \cdot (-1) + 2,848 \cdot (-1) + 2,970 \cdot (-1) + 2,889 \cdot (-1))}{8} =$$

$$= -0,0075$$

Загальний вигляд рівняння регресії (6) з урахуванням визначених значень коефіцієнтів b_i

$$Y = 3,0748 + 0,0564X_1 + 0,0977X_2 + 0,1495X_3 + 0,0089X_1X_2 - 0,0006X_1X_3 + 0,1019X_2X_3 - 0,0075X_1X_2X_3. \quad (7)$$

Вихідні дані для встановлення дисперсії відтворюваності дослідів наведені в табл.3.

Таблиця 3

Вихідні дані для визначення дисперсії відтворюваності дослідів

№ дослідів	$(Y_{vj} - \bar{Y}_v)$	$(Y_{vj} - \bar{Y}_v)^2$	№ дослідів	$(Y_{vj} - \bar{Y}_v)$	$(Y_{vj} - \bar{Y}_v)^2$
1	3,4657 – 3,4811 = -0,0154	0,00024	5	2,9444 – 2,9945 = -0,0500	0,00250
1	3,4965 – 3,4811 = 0,0154	0,00024	5	3,0445 – 2,9945 = 0,0500	0,00250
2	3,4012 – 3,3667 = 0,0345	0,00119	6	2,8622 – 2,8477 = 0,0145	0,00021
2	3,3322 – 3,3667 = -0,0345	0,00119	6	2,8332 – 2,8477 = -0,0145	0,00021
3	3,0445 – 3,0790 = -0,0345	0,00119	7	2,9444 – 2,9701 = -0,0256	0,00066
3	3,1135 – 3,0790 = 0,0345	0,00119	7	2,9957 – 2,9701 = 0,0256	0,00066
4	2,9444 – 2,9701 = -0,0256	0,00066	8	2,8332 – 2,8888 = -0,0556	0,00309
4	2,9957 – 2,9701 = 0,0256	0,00066	8	2,9444 – 2,8888 = 0,0556	0,00309
Разом: $S_v^2 = 0,01948$					

Дисперсія відтворюваності визначається за залежностями:

$$S^2\{Y\} = \frac{\sum_{v=1}^N \sum_{j=1}^r (Y_{vj} - \bar{Y}_v)^2}{N(r-1)} = \frac{0,01948}{8(2-1)} = 0,002435; \quad S\{Y\} = \pm\sqrt{0,002435} = \pm 0,049344.$$

Для перевірки однорідності дисперсій розраховували значення критерію Кохрена

$$G = \frac{S_{v \max}^2}{S_v^2} = \frac{0,00309}{0,01948} = 0,158779$$

Критичне значення критерію Кохрена $G_{кр} = 0,6798$ визначене для ступіней вільності $f_{v \max} = (r-1) = 2-1=1$, $f_v = N = 8$, $\alpha = 0,05$).

Гіпотеза однорідності дисперсій приймається, якщо $G < G_{кр}$.

Для перевірки значущості коефіцієнтів регресії визначали дисперсію коефіцієнтів

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{Y\}}{N \cdot r} = \frac{0,002435}{8 \cdot 2} = 0,0001522; \quad S\{b_i\} = \pm\sqrt{0,0001522} = \pm 0,01236.$$

Табличне значення критерію Стюдента $t_{кр} = 2,306$ визначене для ступеня вільності $f_E = N(r-1) = 8 \cdot (2-1) = 8$ та $\alpha = 0,05$.

Половина довжини довірчого інтервалу буде

$$\Delta b_i = t_{кр} \cdot S\{b_i\} = 2,306 \cdot 0,01236 = 0,028447.$$

Коефіцієнт рівняння регресії вважається значимим, якщо виконується умова

$$|b_i| \geq \Delta b_i.$$

Значимі коефіцієнти регресії:

$$|b_0| = 3,07475; |b_1| = 0,05642; |b_2| = 0,09775; |b_3| = 0,14948; |b_{23}| = 0,10193.$$

Рівняння регресії в кодованих змінних (отримано з (7) шляхом вилучення не значущих коефіцієнтів)

$$Y = 3,07475 + 0,05642X_1 + 0,09775X_2 + 0,14948X_3 + 0,10193X_2X_3. \quad (8)$$

Для перевірки адекватності математичної моделі розраховували значення Y_v після підставлення в залежність (8) значень +1 та -1 у відповідності з матрицею планування

$$Y_1 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (+1) + 0,09775 \cdot (+1) + 0,14948 \cdot (+1) + 0,10193 \cdot (+1) = 3,4803;$$

$$Y_2 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (-1) + 0,09775 \cdot (+1) + 0,14948 \cdot (+1) + 0,10193 \cdot (+1) = 3,3675;$$

$$Y_3 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (+1) + 0,09775 \cdot (-1) + 0,14948 \cdot (+1) + 0,10193 \cdot (-1) = 3,0810;$$

$$Y_4 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (-1) + 0,09775 \cdot (-1) + 0,14948 \cdot (+1) + 0,10193 \cdot (-1) = 2,9681;$$

$$Y_5 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (+1) + 0,09775 \cdot (+1) + 0,14948 \cdot (-1) + 0,10193 \cdot (-1) = 2,9775;$$

$$Y_6 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (-1) + 0,09775 \cdot (+1) + 0,14948 \cdot (-1) + 0,10193 \cdot (-1) = 2,8647;$$

$$Y_7 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (+1) + 0,09775 \cdot (-1) + 0,14948 \cdot (-1) + 0,10193 \cdot (+1) = 2,9859;$$

$$Y_8 = 3,07475 + 0,05642 \cdot (-1) + 0,09775 \cdot (-1) + 0,14948 \cdot (-1) + 0,10193 \cdot (+1) = 2,8730;$$

Вихідні дані для розрахунку дисперсії адекватності наведені у табл.4.

Таблиця 4

Розрахунок дисперсії адекватності

№ дослідів	\bar{Y}_v	Y_v	$(\bar{Y}_v - Y_v)$	$(\bar{Y}_v - Y_v)^2$
1	3,4811	3,4803	0,0008	0,00000062
2	3,3667	3,3675	-0,0008	0,00000062
3	3,0790	3,0810	-0,0020	0,00000383
4	2,9701	2,9681	0,0020	0,00000383
5	2,9945	2,9775	0,0170	0,00028776
6	2,8477	2,8647	-0,0170	0,00028776
7	2,9701	2,9859	-0,0158	0,00024944
8	2,8888	2,8730	-0,0158	0,00024944
Разом :				0,00108329

Дисперсія адекватності моделі:

$$S_{ад}^2 = \frac{r}{N - m} \sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - Y_v)^2 = \frac{2}{8 - 5} \cdot 0,00108329 = 0,000722,$$

де m - число членів кінцевого апроксимуючого полінома (прийнято $m = 5$).

Розрахунковий критерій Фішера:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{Y\}} = \frac{0,000722}{0,002435} = 0,296611.$$

Табличне (критичне) значення критерію Фішера $F_{кр} = 4,07$ для степенів вільності

$$f_{ад} = N - m = 8 - 5 = 3;$$

$$f_E = N \cdot (r - 1) = 8 \cdot (2 - 1) = 8;$$

$$\alpha = 0,05.$$

Умова $F < F_{кр}$ – виконується. Модель (7) – адекватна.

Після цього визначали коефіцієнт множинної кореляції R .

Середня величина значень функції \bar{Y} визначена за експериментальними даними

$$\bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N \bar{Y}_v,$$

де розраховане середнє значення \bar{Y} дорівнює

$$\bar{Y} = \frac{3,4811 + 3,3667 + 3,0790 + 2,9701 + 2,9945 + 2,8477 + 2,9701 + 2,8888}{8} = 3,0748.$$

Вихідні дані для розрахунку R наведені в табл. 5.

Таким чином, $\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - Y_v)^2 = 0,00108329$ (див. табл. 4), $\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \bar{Y})^2 = 0,36486$ (див.

табл. 5).

Таблиця 5

Розрахунок коефіцієнта множинної кореляції

№ дослідів - v	\bar{Y}_v	$(\bar{Y}_v - \bar{Y})$	$(\bar{Y}_v - \bar{Y})^2$
1	3,4811	0,4064	0,165135
2	3,3667	0,2919	0,085233
3	3,0790	0,0043	0,000018
4	2,9701	-0,1047	0,010955
5	2,9945	-0,0803	0,006444
6	2,8477	-0,2270	0,051550
7	2,9701	-0,1047	0,010955
8	2,8888	-0,1859	0,034569
Разом			0,364860

Коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - Y_v)^2}{\sum_{v=1}^N (\bar{Y}_v - \bar{Y})^2}} = \sqrt{1 - \frac{0,00108329}{0,36486}} = 0,9985.$$

Коефіцієнт R за величиною наближається до 1, тому рівняння регресії (8) практично повністю описує результати експерименту.

Перехід до моделі в натуральних змінних здійснюємо шляхом підстановки залежностей (4) в рівняння регресії (8), тобто

$$\ln L = 3,07475 + 0,05642 \cdot (0,71088 \cdot \ln A - 2,2737) + 0,09775 \cdot (2,36045 \cdot \ln d - 6,8655) + 0,14948 \cdot (2,88539 \cdot \ln P - 4,1699) + 0,10193 \cdot (2,36045 \cdot \ln d - 6,8655) \cdot (2,88539 \cdot \ln P - 4,1699);$$

$$\ln L = 4,570146 + 0,040108 \cdot \ln A - 0,772547 \cdot \ln d - 1,587889 \cdot \ln P + 0,694227 \cdot \ln d \cdot \ln P$$

або

$$\ln L = \ln e^{4,570146} + \ln A^{0,040108} + \ln d^{-0,772547} + \ln P^{(-1,587889+0,694227 \cdot \ln d)}.$$

Після потенціювання попереднього виразу отримуємо математичну модель процесу впливу режимів роботи вібраційного лафетного ствола на довжину кологогвинтового компактного струменя L у вигляді

$$L = 96,5582 \cdot A^{0,0401} \cdot d^{-0,7725} \cdot P^{(-1,5879+0,6942 \cdot \ln d)}. \quad (9)$$

Одночасно проводилося дослідження впливу режимів роботи вібраційного лафетного ствола на площу покриву S вогнища пожежі кологогвинтовим компактным струменем та аналогічно виконувала математична обробка результатів експерименту. Результати цього до-

слідження описуються такою математичною моделлю

$$S = \exp(-15,57574 + 2,11469 \cdot \ln A + 4,49871 \cdot \ln d + 9,35566 \cdot \ln P - 0,58379 \cdot \ln A \cdot \ln d - 2,58463 \cdot \ln d \cdot \ln P - 1,51934 \cdot \ln A \cdot \ln P + 0,52237 \cdot \ln A \cdot \ln d \cdot \ln P). \quad (11)$$

На підставі отриманих математичних моделей для визначення довжини компактного струменя та площі покриву ним вогнища пожежі були визначені оптимальні значення технічних параметрів роботи вібраційного лафетного ствола, які наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Тактико-технічні характеристики вібраційного лафетного ствола

Діаметр насадки, мм	12	28
Робочий тиск, кПа	600	600
Витрата води л/с	15	23
Довжина струменя, при куті його підйому 10^0 , м	22	33
Довжина струменя, м при куті його підйому 30^0 , м	33	49
Площа покриву вогнища пожежі при куті підйому струменя 10^0 , м ²	10	32
Площа покриву вогнища пожежі при куті підйому струменя 30^0 , м ²	15	48

Висновки

1. За величиною та знаком коефіцієнтів рівняння регресії встановлено, що зростання амплітуди коливання ствола, діаметра отвору насадки ствола та тиску вогнегасної рідини на вході спричинює зростання $\ln L$, $\ln S$. Крім цього, вплив на величину $\ln L$, $\ln S$. - комплексний і залежить також від одночасного впливу діаметра отвору насадки ствола та тиску вогнегасної рідини на вході.

2. Градація впливу чинників на L , S така – тиск вогнегасної рідини на вході, діаметр отвору насадки ствола, амплітуда коливання ствола. Необхідно зауважити, що якщо діаметр отвору насадки ствола та тиск вогнегасної рідини на вході одночасно матимуть найбільші або найменші значення із досліджуваного діапазону чинників, то величини $\ln L$ і $\ln S$ збільшуються, а якщо один із згаданих чинників матиме найбільше, а інший – найменше значення, тоді величини $\ln L$ і $\ln S$ - зменшуються.

3. Отримана регресивна модель повністю описує досліджуваний процес – величина коефіцієнта кореляції становить 0,9985, що практично дорівнює 1.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 70521А. Декларативний патент на винахід. Лафетний вібраційний ствол, Бюл. №10, 2004.
2. Гуліда Е.М., Мовчан І.О., Панів Я.В. Гасіння лісових пожеж з використанням лафетного вібраційного ствола. // Пожежна безпека, №6, 2005. – С. 47-49.
3. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.