

# КОМУНАЛЬНЕ ГОСПОДАРСТВО МІСТ MUNICIPAL ECONOMY OF CITIES

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК  
СЕРІЯ: ТЕХНІЧНІ НАУКИ ТА АРХІТЕКТУРА

ТОМ 6 ВИПУСК 180'2023

Ідентифікатор медіа у Ресстрі суб'єктів медіа R30-01140 від 10.08.2023 р.  
Наукове фахове видання категорії «Б» за спеціальностями 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 133, 191, 192, 193, 194, 261, 263, 273, 274, 275 (наказ МОН України № 1301 від 15.10.19), 141, 183 (наказ МОН України № 1643 від 28.12.19)

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

БАБАЄВ В.М.	<b>відповідальний редактор</b> , д.держ.упр., ректор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
СУХОНОС М.К.	<b>відповідальний секретар</b> , д.т.н., проректор з наукової роботи, ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДЯДІН Д.В.	к.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
КОГАЛОВСЬКИЙ В.	к.т.н., Інженерний коледж «Самі Шамун», Ізраїль
ПЛЮГІН В.Є.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ЧУМАЧЕНКО І.В.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ШЕВЧЕНКО Р.І.	д.т.н., НУЦЗ України
<b>ШМУКЛЕР В.С.</b>	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ШПАЧУК В.П.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова

## КООРДИНАЦІЙНА РАДА

<b>ШУТЕНКО Л.М.</b>	<b>голова координаційної ради</b> , д.т.н., почесний ректор ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ГОВОРОВ П.П.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДАЛЕКА В.Х.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДРЕВАЛЬ І.В.	д.арх., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ДУШКІН С.С.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
КОНДРАЩЕНКО О.В.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
МАЛЯРЕНКО В.А.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
МИХАЙЛИШИН О.Л.	д.арх., НУВГП
ОСИЧЕНКО Г.О.	д.арх., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ТОВБИЧ В.В.	д.арх., КНУБА
ФЕЙРУША С.Х.	к.т.н., Університет Салахаддін – Ербіль, Ірак
ХАРЧЕНКО В.Ф.	д.т.н., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ЧЕЧЕЛЬНИЦЬКИЙ С.Г.	д.арх., ХНУМГ ім. О.М. Бекетова
ЧУДНОВСЬКИЙ А.	к.т.н., Гамбурзький університет, Германія
ЮРКЕВИЧ І.	к.т.н., Астонський університет, Великобританія
ЯНКЕЛЕВИЧ М.	к.т.н., Парсонс, США

## EDITORIAL BOARD

BABAYEV V.	<b>Editor-in-Chief</b> , Dr.Sc., Rector of the O.M. Beketov NUUE
SUKHONOS M.	<b>Executive Managing Editor</b> , Dr. Sc., Vice-rector of the O.M. Beketov NUUE
DIADIN D.	PhD, O.M. Beketov NUUE
KAGALOVSKY V.	PhD, Engineering College “Sami Shamun”, Israel
PLUGIN V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
CHUMACHENKO I.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
SHEVCHENKO R.	Dr.Sc., NUCDU
<b>SHMUKLER V.</b>	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
SHPACHUK V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE

## COORDINATION COUNCIL

<b>SHUTENKO L.</b>	<b>Chairman of the Coordination Council</b> , Dr.Sc., Honorary Rector of the O.M. Beketov NUUE
GOVOROV P.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
DALEKA V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
DREVAL I.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
DUSHKIN S.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
KONDRASHENKO O.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
MALYARENKO V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
MYHAYLISHYN O.	Dr.Sc., NUWEE
OSYCHENKO G.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
TOVBICH V.	Dr.Sc., KNUCA
FEIRUSHA S.	PhD, Salahaddin University – Erbil, Iraq
HARCHENKO V.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
CHECHELNITSKY S.	Dr.Sc., O.M. Beketov NUUE
CHUDNOVSKIY A.	Ph.D., University of Hamburg, Germany
YURKEVICH I.	Ph.D., Aston University, United Kingdom
YANKELEVICH M.	PhD, PARSONS, USA

### Адреса редакції / Editorial office address:

61002, м. Харків, вул. Маршала Бажанова, 17 / 17, Marshala Bazhanova Street, Kharkiv, 61002

Тел./tel.: +38 (057) 707-33-21, e-mail: khg@kname.edu.ua

ISSN (print) 2522 – 1809

ISSN (online) 2522 – 1817

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова (протокол № 5 від 1 грудня 2023 року)

Ю.О. Абрамов, В.С. Коломієць, В.О. Собина

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

## МОДЕЛІ РУХУ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ В ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРИ

Для руху вогнегасної речовини до вогнища горіння розроблено структурно-динамічну схему, яка виконана для побудови імітаційної моделі. Здійснено імітаційне моделювання і одержані дані стосовно часу подачі вогнегасної речовини на максимальну дальність, максимальної дальності та швидкості її подачі. Одержані результати є початковими даними при розробці експлуатаційної документації для систем пожежогасіння.

**Ключові слова:** вогнегасна речовина, дальність подачі, швидкість руху.

### Постановка проблеми

Системи автоматичного пожежогасіння мають стійку тенденцію до їх все більшого використання. Ефективність таких систем залежить від багатьох факторів, одним із яких є визначення і подальша формалізація процесів, які мають місце як в об'єкті управління – пожежі, так і в пристрої управління. До таких процесів відноситься рух вогнегасної речовини в полум'ї пожежі та в повітряному просторі при її подачі до вогнища горіння. Однією із проблем при цьому є необхідність формалізації при описі таких процесів в класі моделей, які узгоджуються із моделями систем автоматичного управління.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В [1], а також в [2] наведені математичні моделі, які описують рух вогнегасної речовини в полум'ї пожежі. Для такого опису використовується традиційний підхід – математичні моделі, представлені у вигляді диференційних рівнянь. Математичні моделі руху вогнегасної речовини в повітряному просторі описуються системою диференційних рівнянь [3], які можуть бути лінійними [4] або нелінійними [5]. Слід відмітити, що дослідження, які пов'язані із використанням математичних моделей стосовно до опису руху вогнегасної речовини як в полум'ї, так і в повітряному просторі носять в переважній більшості випадків локальний характер. Винятком є робота [5], де формалізація руху вогнегасної речовини використовується в контексті математичного опису роботи всієї системи автоматичного пожежогасіння. В [6] процес руху вогнегасної речовини при її доставці до вогнища горіння формалізовано передаточною функцією.

Наведений аналіз обумовлює необхідність в проведенні досліджень, спрямованих на розробку моделей руху вогнегасної речовини в повітряному просторі в термінах технічної кібернетики, яка має розширені можливості для опису цього процесу.

### Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є створення моделі руху вогнегасної речовини до вогнища горіння у повітряному просторі із розширеними можливостями для опису цього процесу.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- формалізувати опис руху вогнегасної речовини в повітряному просторі із використанням інтегрального перетворення Лапласа;
- побудувати структурно-динамічну схему, яка забезпечує визначення координат та швидкості руху вогнегасної речовини із врахуванням дестабілізуючих факторів;
- із використанням пакету Simulink одержати масиви даних стосовно часу подачі вогнегасної речовини на максимальну дальність, максимальної дальності та швидкості на цій дальності при варіюванні початкових даних та формалізувати процес подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння у вигляді передаточної функції.

### Виклад основного матеріалу

Від мобільної пожежної установки вогнегасна речовина подається до вогнища горіння через повітряний простір. На рис. 1 показана графічна інтерпретація в декартовій системі координат  $Ox$  руху вогнегасної речовини із початковою швидкістю  $V_0$  з висоти  $h$ . Вогнегасна речовина подається під кутом  $\beta$ .

В загальному випадку на подачу вогнегасної речовини може впливати наявність вітру, швидкість якого дорівнює величині  $V$ . В подальшому будемо вважати, що вектор  $\vec{V}$  є колінеарним вісі  $Ox$ , а його напрям враховується параметром  $\sigma$ , величина якого дорівнює  $\pm 1$ .

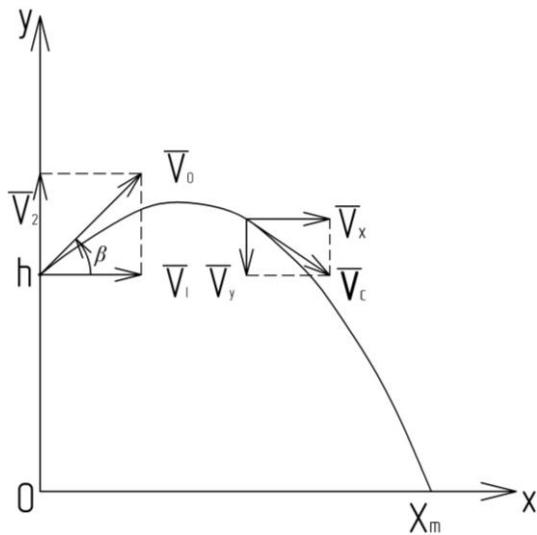


Рис. 1. Графічна інтерпретація руху вогнегасної речовини

Для одиничної маси вогнегасної речовини буде мати місце система диференціальних рівнянь [7]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \alpha \left( \frac{dx(t)}{dt} + \sigma V \right) &= 0; \\ \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \alpha \left( \frac{dy(t)}{dt} + \sigma V \right) &= -g, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $x, y$  – координати;  $\alpha$  – коефіцієнт опору;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Початковими умовами системи (1) є:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0; \quad y(0) = h; \\ \frac{dx(0)}{dt} &= V_1 = V_0 \cos \beta; \\ \frac{dy(0)}{dt} &= V_2 = V_0 \sin \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Після застосування оператора інтегрального перетворення Лапласа до системи диференціальних рівнянь (1) із початковими умовами (2) ця система трансформується наступним чином [8]:

$$\begin{aligned} X(p) &= [V_1 - \alpha \sigma V p^{-1}] [p(p + \alpha)]^{-1}; \\ Y(p) &= [p(p + \alpha)h + pV_2 - g] [p^2(p + \alpha)]^{-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $p$  – комплексна змінна;  $X(p) = L[x(t)]$ ;  $Y(p) = L[y(t)]$ ;  $L$  – оператор інтегрального перетворення Лапласа.

Системі алгебраїчних рівнянь (3) буде відповідати структурно-динамічна схема подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння, яка наведена на рис. 2.

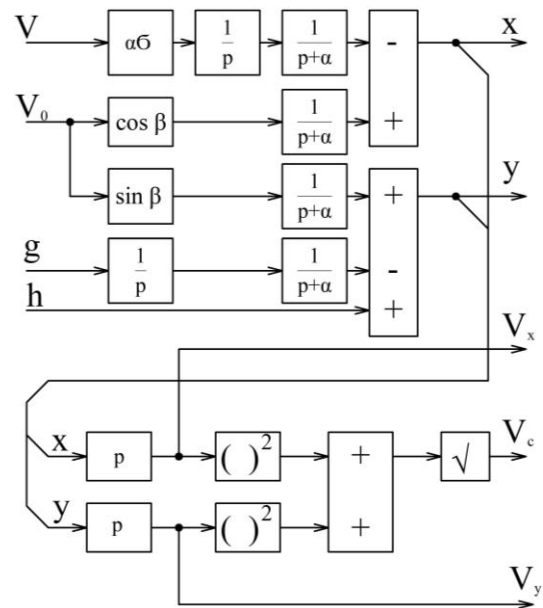


Рис. 2. Структурно-динамічна схема подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння

На цій структурно-динамічній схемі позначено:

$$V_x = \frac{dx}{dt}; \quad V_y = \frac{dy}{dt}; \quad V_c = (V_x^2 + V_y^2)^{0.5}. \quad (4)$$

Слід зазначити, що сукупність залежностей  $x(t)$ ,  $y(t)$  визначають в параметричній формі траєкторію руху вогнегасної речовини в повітряному просторі.

Структурно-динамічна схема, що наведена на рис. 2, є основою для побудови імітаційної моделі в середовищі MATLAB за допомогою пакету візуального математичного моделювання Simulink [9].

Результати імітаційного моделювання процесу подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння у відповідності до структурно-динамічної схеми, наведеної на рис. 2 і реалізованої за допомогою пакету Simulink, приведені в табл. 1 – табл. 3.

В табл. 1 представлені значення часу подачі  $t_m$  вогнегасної речовини на максимальну дальність  $x_m$  при  $h = 1,5$  м,  $V_0 = (10 \div 30)$  мс<sup>-1</sup>;  $\beta = (5 \div 20)$  град;  $\alpha = (0,2 \div 0,6)$  с<sup>-1</sup>.

Аналіз даних, наведених в табл. 1, свідчить про те, що:

- для малих кутів  $\beta$ , величини яких не перевищують 5 град, має місце незначне зростання величини  $t_m$  при збільшенні параметра  $\alpha$ . Величина  $t_m$  зростає не більше ніж на 3,0% незалежно від варіювання величини початкової швидкості  $V_0$  подачі вогнегасної речовини;

Таблиця 1

Значення часу подачі вогнегасної речовини на максимальну дальність

$V_0, \text{ мс}^{-1}$	$\beta_1, \text{ град}$	$t_m, \text{ с}$		
		$\alpha, \text{ с}^{-1}$		
		0,2	0,4	0,6
10	5	0,652	0,661	0,672
	10	0,755	0,764	0,773
	15	0,868	0,874	0,880
	20	0,986	0,987	0,989
20	5	0,757	0,765	0,774
	10	0,994	0,995	0,996
	15	1,25	1,24	1,23
	20	1,52	1,48	1,46
30	5	0,872	0,877	0,885
	10	1,258	1,245	1,235
	15	1,67	1,63	1,60
	20	2,08	2,00	1,94

– при зменшенні величини параметра  $V_0$  від  $30 \text{ мс}^{-1}$  до  $10 \text{ мс}^{-1}$  розширюється діапазон кутів  $\beta$ , в якому має місце зростання величини  $t_m$  при збільшенні параметра  $\alpha$ . В цьому випадку діапазон кутів  $\beta$  дорівнює  $20$  град;

– зростання величин  $V_0$  обумовлює збільшення величин  $t_m$ , які також збільшуються із ростом параметра  $\beta$ . Зокрема, при збільшенні величини  $V_0$  в три рази величина  $t_m$  при  $\alpha = 0,2 \text{ с}^{-1}$  зростає в  $2,1$  рази;

– при збільшенні параметра  $\alpha$  із одночасним збільшенням величини параметра  $V_0$  розширюється діапазон параметра  $\beta$ , в якому має місце зменшення величини  $t_m$ . Так, при  $V_0 = 20 \text{ мс}^{-1}$ ;  $\alpha = (0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$  цей діапазон належить  $\beta = (15 \div 20)$  град, а при  $V_0 = 30 \text{ мс}^{-1}$ ;  $\alpha = (0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$  цей діапазон належить  $\beta = (10 \div 20)$  град.

У табл. 2 наведені значення максимальної дальності подачі вогнегасної речовини для  $V_0 = 20 \text{ мс}^{-1}$ ;  $V = 5 \text{ мс}^{-1}$ ;  $\alpha = (0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$  та  $\beta = 5$  град і  $\beta = 15$  град. Величині  $\sigma = 0$  відповідає відсутність вітрового впливу на рух вогнегасної речовини.

Особливістю результатів, наведених в табл. 2, є:

– при зростанні величини  $\alpha$  від  $0,2 \text{ с}^{-1}$  до  $0,6 \text{ с}^{-1}$  величина  $x_m$  при  $\beta = 5$  град зменшується на  $11,8\%$  при відсутності вітру, на  $15,7\%$  при зустрічному вітрі та на  $8,1\%$  при попутному вітрі. Для  $\beta = 15$  град таке зменшення складає  $14,2\%$ ,  $18,7\%$  та  $9,9\%$  відповідно;

Таблиця 2

Значення максимальної дальності подачі вогнегасної речовини

$\sigma$	$\beta_1, \text{ град}$	$x_m, \text{ м}$		
		$\alpha, \text{ с}^{-1}$		
		0,2	0,4	0,6
0	5	14,00	13,13	12,34
	15	15,39	14,25	13,20
+1	5	13,72	12,60	11,56
	15	15,04	13,57	12,23
-1	5	14,27	13,66	13,11
	15	15,75	14,94	14,19

– при  $\alpha = 0,2 \text{ с}^{-1}$  наявність вітру призводить до зміни величини  $x_m$  на  $\pm 2,0\%$  для  $\beta = 5$  град і на  $\pm 2,3\%$  для  $\beta = 15$  град. При  $\alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$  така зміна величини  $x_m$  складає відповідно  $\pm 6,3\%$  та  $\pm 7,5\%$ .

У табл. 3 наведені значення швидкості руху  $V_c$  вогнегасної речовини на максимальній дальності подачі для  $V_0 = 20 \text{ мс}^{-1}$ ;  $V_0 = 5 \text{ мс}^{-1}$ ;  $\alpha = (0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$  при  $\beta = 5$  град та  $\beta = 15$  град.

Таблиця 3

Значення швидкості руху вогнегасної речовини на максимальній дальності її подачі

$\sigma$	$\beta_1, \text{ град}$	$V_c, \text{ мс}^{-1}$		
		$\alpha, \text{ с}^{-1}$		
		0,2	0,4	0,6
0	5	17,92	15,45	13,30
	15	16,15	12,63	9,89
+1	5	17,25	14,21	11,56
	15	15,13	10,83	7,51
-1	5	18,59	16,71	15,05
	15	17,19	14,46	12,36

Із аналізу даних табл. 3 витікає, що:

– зміна величини  $\alpha$  від  $0,2 \text{ с}^{-1}$  до  $0,6 \text{ с}^{-1}$  при  $\beta = 5$  град призводить до зменшення величини  $V_c$  на  $25,8\%$  при відсутності вітру, на  $32,9\%$  при зустрічному напрямку вітру та на  $19,0\%$  при його попутному напрямку. Для  $\beta = 15$  град таке зменшення складає відповідно  $38,7\%$ ,  $50,3\%$  та  $28,1\%$ ;

– при  $\alpha = 0,2 \text{ с}^{-1}$  наявність вітру призводить до зміни величини  $V_c$  на  $\pm 3,7\%$  для  $\beta = 5$  град і на  $\pm 6,3\%$  для  $\beta = 15$  град. При  $\alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$  така зміна величини  $V_c$  складає відповідно  $\pm 13,1\%$  та  $\pm 24,9\%$ .

В [4] показано, що при  $\beta = 0$  час досягнення максимальної дальності подачі вогнегасної речовини може оцінюватись за допомогою виразу:

$$t_{m0} = (2hg^{-1})^{0,5}. \quad (5)$$

Методична похибка при використанні цього виразу не перевищує 0,6% для  $\alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$  і не перевищує 0,02% для  $\alpha = 0,2 \text{ с}^{-1}$ . При  $h = 1,5 \text{ м}$  величина  $t_{m0}$  дорівнює 0,547 с і не залежить від величини параметрів  $V_0$ ,  $V$  та  $\alpha$ .

Із аналізу табл. 1 витікає, що з похибкою, величина якої не перевищує 1,5%, для  $\beta = 5$  град як час досягнення максимальної дальності подачі вогнегасної речовини при її початковій швидкості  $V_{oi}$  ( $V_{o1} = 10 \text{ мс}^{-1}$ ;  $V_{o2} = 20 \text{ мс}^{-1}$ ;  $V_{o3} = 30 \text{ мс}^{-1}$ ;) можна використовувати середнє значення цього часу для  $\alpha = (0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$ . Це середнє значення визначається виразом:

$$t_{mi} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 t_{mij}, \quad (6)$$

де  $j = 1$  відповідає величині  $\alpha = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $j = 2$  відповідає  $\alpha = 0,4 \text{ с}^{-1}$ ;  $j = 3$  відповідає  $\alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$ .

Залежність  $t_{mi} = t_{mi}(V_{oi})$  буде визначатись як:

$$t_{mi} = t_{m0} + kV_{oi}; \quad i = \overline{1,3}, \quad (7)$$

де  $k = 1,13 \cdot 10^{-2} \text{ с}^2 \text{ м}^{-1}$ , що витікає при врахуванні (3) та об'єднанні даних табл. 1 у відповідності із (6). Слід зазначити, що за величину  $V_{oi}$  в цьому виразі можна використовувати будь-яке значення на фіксованому інтервалі  $V_{oi} \in [V_{0\min}, V_{0\max}]$ .

Якщо  $V_{o1} = (10 \div 30) \text{ мс}^{-1}$ , то при  $\beta = 5$  град вогнегасна речовина подається до вогнища горіння, яке розташовується на максимальній дальності  $x_m$ , через інтервал часу  $(0,66 \div 0,88) \text{ с}$ , тобто із запізненням. Для малоінерційних систем пожежогасіння, інерційні властивості яких характеризуються часовим параметром  $\tau = 3,0 \text{ с}$  [10], такий час запізнення є досить суттєвим. Слід зазначити, що цей час запізнення при вирішенні задач аналізу та синтезу систем пожежогасіння не враховується [3]. Врахування цього часу запізнення в системах пожежогасіння можливо у вигляді динамічної ланки із передаточною функцією:

$$W_n(p) = K_n \exp(-p\tau_n), \quad (8)$$

де  $K_n$ ,  $\tau_n$  – коефіцієнт передачі та час запізнення ділянки, на якій здійснюється подача вогнегасної речовини. За параметр  $\tau_n$  обирається параметр  $t_m$ .

## Висновки

1. Показано, що рух вогнегасної речовини в повітряному просторі доцільно формалізувати із використанням інтегрального перетворення Лапласа, що відкриває нові можливості для використання методів імітаційного моделювання, зокрема методів, які орієнтовані на використання пакета візуального математичного моделювання Simulink.

2. Побудована структурно-динамічна схема, яка використовується для створення імітаційної моделі, що відображає подачу вогнегасної речовини до вогнища горіння. Модель враховує початкову швидкість подачі вогнегасної речовини, наявність вітру та опір повітряного середовища і забезпечує одержання поточних значень для координат та швидкості руху вогнегасної речовини.

3. Із використанням пакета візуального математичного моделювання Simulink одержані масиви даних для часу подачі вогнегасної речовини на максимальну дальність при варіюванні значень початкової швидкості в межах  $(10 \div 30) \text{ мс}^{-1}$ , кута подачі в межах  $(5 \div 20)$  град та опору повітряного середовища в межах  $(0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$ . Показано, що при малих кутах подачі вогнегасної речовини час подачі вогнегасної речовини змінюється не більше ніж на 3,0% при варіюванні величини опору повітряного середовища в межах  $(0,2 \div 0,6) \text{ с}^{-1}$  і практично не залежить від величини початкової швидкості. Одержані масиви даних для максимальної дальності подачі вогнегасної речовини та для її швидкості. Показано, що процес подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння може бути формалізований передаточною функцією запізнюючої ланки, часовий параметр якої дорівнює часу подачі вогнегасної речовини.

## Література

1. Тарахно О. В. Фізико-хімічні основи використання води в пожежній справі : навч. посіб. / О. В. Тарахно, А. Я. Шаріанов. – Харків : АЦЗУ, 2004. – 252 с. – Режим доступу: [http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp\\_metod/472/FHOVVyPS.pdf](http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/472/FHOVVyPS.pdf); вільний (дата звернення: 05.12.2023).
2. Dombrovsky L. A. An infrared scattering by evaporating droplets at the initial stage of a pool fire suppression by water sprays / L. A. Dombrovsky, S. Dembele, J. X. Wen // *Infrared Physics & Technology*. – 2018. – Vol. 91. – P. 55–62. – DOI: [10.1016/j.infrared.2018.03.027](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.03.027).
3. Ольшанський В. П. До побудови області зрошення пожежного гідравлічного струменя / В. П. Ольшанський // *Проблеми пожежної безпеки*. – 2004. – Вип. 15. – С. 153–159.
4. Estimating the influence of the wind exposure on the motion of an extinguishing substance / Yu. Abramov, O. Basmanov, V. Krivtsova, A. Khyzhnyak // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2020. – No. 5 – P. 51–59. – DOI: [10.21303/2461-4262.2020.001400](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001400).
5. Садковий В. П. Теоретичні основи автоматичного гасіння пожеж класу В розпорошеною водою / В. П. Садковий, Ю. А. Абрамов. – Харків : НУЦЗУ, 2010. – 267 с.
6. Хижняк А. А. Моделі при пожежогасіння при використанні мобільної установки / А. А. Хижняк, Ю. О. Абрамов, Є. О. Тищенко // *Проблеми пожежної безпеки*. – 2019. – Вип. 46. – С. 193–198. – Режим доступу:

- <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb46/Khizhnyak.pdf>; вільний (дата звернення: 05.12.2023).
7. Цасюк В. В. Теоретична механіка : навч. посіб. / В. В. Цасюк. – Київ : Центр навчальної літератури, 2004. – 402 с.
8. Теоретичні основи технічної кібернетики : навч. посіб. / Л. М. Артюшин, Б. В. Дурняк, О. А. Машков, О. М. Плащенко. – Львів : Українська академія друкарства, 2004. – 130 с.
9. Моделювання систем у середовищі MATLAB / С. С. Забара, О. О. Гагарін, І. М. Кузьменко, Ю. Д. Щербашин. – Київ : Університет «Україна», 2011. – 137 с.
10. Котов А. Г. Пожежогасіння та системи безпеки / А. Г. Котов. – Київ : Репро-Графіка, 2003. – 270 с.

## References

1. Tarakhno, O. V., & Sharshanov, A. Ya. (2004). *Physico-chemical bases of use of water in firefighting: study guide*. Academy of Civil Protection of Ukraine. Retrieved from: [http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp\\_metod/472/FHOVVvPS.pdf](http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/472/FHOVVvPS.pdf) [in Ukrainian]
2. Dombrovsky, L. A., Dembele, S., & Wen, J. X. (2018). An infrared scattering by evaporating droplets at the initial stage of a pool fire suppression by water sprays. *Infrared Physics & Technology*, 91, 55–62. DOI: [10.1016/j.infrared.2018.03.027](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.03.027)
3. Olshanskiy, V. P. (2004). On the construction of the fire hydraulic jet irrigation area. *Problems of fire safety*, (15), 153–159.
4. Abramov, Yu., Basmanov, O., Krivtsova, V., & Khyzhnyak, A. (2020). Estimating the influence of the wind exposure on the motion of an extinguishing substance. *EUREKA: Physics and Engineering*, (5), 51–59. DOI: [10.21303/2461-4262.2020.001400](https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001400)
5. Sadkovyi, V. P., & Abramov, Yu. A. (2010). *Theoretical basis for automatic extinguishing of class B fires with sprayed water*. National University of Civil Protection of Ukraine.
6. Khyzhniak, A. A., Abramov, Yu. O. & Tyshchenko, Ye. O. (2019). Fire extinguishing models when using a mobile device. *Problems of fire safety*, (46), 193–198. Retrieved from <https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb46/Khizhnyak.pdf> [in Ukrainian]
7. Tsasiuk, V. V. (2004). *Theoretical mechanics: study guide*.

- Tsentr navchalnoi literatury [in Ukrainian]
8. Artiushyn, L. M., Durniak, B. V., Mashkov, O. A., & Plashenko, O. M. (2004). *Theoretical foundations of technical cybernetics: study guide*. Ukrainian Academy of Printing (UAP) [in Ukrainian]
  9. Zabara, S. S., Naharin, O. O., Kuzmenko, I. M., & Shcherbashyn, Yu. D. (2011). *Modelling systems in MATLAB*. University 'Ukraine' [in Ukrainian]
  10. Kotov, A. H. (2003). *Fire extinguishing and security systems*. Repro-Hrafika.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.С. Басманов, Національний університет цивільного захисту України, Україна.

**Автор:** АБРАМОВ Юрій Олексійович  
доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник науково-дослідного центру Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – [abramov121146@gmail.com](mailto:abramov121146@gmail.com)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7901-3768>

**Автор:** КОЛОМІСЦЬ Валерій Станіславович  
викладач кафедри організації та технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – [kolomiets@nuczu.edu.ua](mailto:kolomiets@nuczu.edu.ua)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4058-4026>

**Автор:** СОБИНА Віталій Олександрович  
кандидат технічних наук, доцент, начальник кафедри організації та технічного забезпечення аварійно-рятувальних робіт Національний університет цивільного захисту України  
E-mail – [sobol\\_84@ukr.net](mailto:sobol_84@ukr.net)  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6908-8037>

## MODELS OF EXTINGUISHING AGENT MOVEMENT IN AIR SPACE

Yu. Abramov, V. Kolomiets, V. Sobyna

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

A system of linear differentiated equations, which takes into account the resistance of the air medium and the presence of wind, is used to formalise the movement of an extinguishing agent. Furthermore, using the integral Laplace transform allows the construction of a structural and dynamic scheme that reflects the process of supplying an extinguishing agent to the fire. Such a structural and dynamic scheme opens up opportunities for building a simulation model of the extinguishing agent movement using the Simulink mathematical visual modelling package. This simulation model provides for the determination of the current coordinates of the extinguishing agent and the speed of its movement to the fire. The parameters of this simulation model are the initial velocity of the extinguishing agent, the height from which it is supplied, the resistance of the air environment, the angle of supply of the extinguishing agent, and the presence of wind.

We used the Simulink package to simulate the process of the extinguishing agent supply to the fire. Data sets were obtained for the time of the extinguishing agent supply to the maximum range, for the maximum supply range, and for the value of the extinguishing agent velocity at the maximum range. We have noted that for small angles of the extinguishing agent, there is a slight increase in the time of its supply to the maximum range by no more than 3.0% with a threefold increase in the resistance of the air medium and regardless of the variation in the value of the initial speed of the extinguishing agent supply. The analytical dependence of the time of supplying an extinguishing agent to the maximum range on the rate of its supply is obtained. In particular, the time of the extinguishing agent supply to the maximum range at small angles lies within (0.66÷0.88) s, which is quite significant for low-inertial fire extinguishing systems, the inertial properties of which are characterised by time parameters. This circumstance necessitates considering the time of supplying an extinguishing agent to the fire when solving problems of analysis and synthesis of fire extinguishing systems. This factor can be accounted for through the transfer function of the lagging link. The time parameter of such a transfer function is equivalent to the time of supplying the extinguishing agent to the fire.

**Keywords:** extinguishing agent, delivery range, travel speed.

---

## ЗМІСТ

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Григоренко Н.А., Ларіонов Н.М., Бредіхін В.М.</i> Дослідження процесу трансляції візуального мистецтва в музику та створення колекцій для людей з вадами зору .....	2
<i>Кандиба В.В., Кушнір О.І., Бредіхін В.М., Хорошилова І.О.</i> Дослідження інструментів та алгоритмів машинного навчання для розпізнавання та оцифровки товарних чеків .....	7
<i>Федорчук А.Л., Усата О.Ю., Наконечна О.А.</i> Web-дизайн та web-програмування у сучасному Інтернет-світі .....	12
<i>Чаговець Л.О., Чаговець В.В.</i> Цифровізація як чинник соціально-економічного розвитку та економічної безпеки держави .....	21
<i>Литвинов А.Л.</i> Імовірнісний аналіз багатоканальних шинних арбітрів інтерфейсів обчислювальних мереж .....	27

### ЕЛЕКТРИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

<i>Єсаулов С.М., Хворост М.В., Бабічева О.Ф., Найдъонов М.О.</i> Застосування нечіткої логіки в системі керування електромеханічним обладнанням .....	33
---	----

### АРХІТЕКТУРА ТА БУДІВНИЦТВО

<i>Вотінов М.А., Смірнова О.В.</i> Архітектурне проектування та види візуалізації інноваційних архітектурних об'єктів .....	43
<i>Діденко К.В., Гелла О.І.</i> Житлові комплекси за Держпромом у структурі столичного адміністративного центру Харкова 1920–1930-х рр. ....	51
<i>Локтіонова О.С.</i> До питання визначення поняття «архітектурний ландшафт міста» .....	61
<i>Терлецька Х.М.</i> Класифікація пам'яток архітектури територіальних громад Прикарпаття .....	67
<i>Шаталюк Ю.В., Шаталюк Д.А.</i> Тенденції розвитку інструментів віртуальної реальності у світовій практиці проектування .....	73
<i>В'яткін К.І., Колодезний А.В.</i> Формування факторів впливу на розвиток агломерацій у системі територіального планування: світовий досвід .....	79
<i>Фірсов П.М., Золотов С.М., Надточій С.О.</i> Аналіз тріщиноутворення та деформативності згинальних бетонних конструкцій армованих композитною арматурою .....	84
<i>Кондратюк І.В.</i> Методи і моделі оцінки рівня використання нерухомості на регіональному рівні .....	92
<i>Мамонов К.А., В'яткін Р.С., Фролов В.О.</i> Моніторинг використання земель регіонів: геоінформаційні аспекти .....	98
<i>Мамонов К.А., Канівець О.М., Доброходова О.В., Штерндок Е.С.</i> Моніторинг використання земель на регіональному рівні: теоретичні положення та особливості реалізації .....	103
<i>Метешкін К.О., Пілічева М.О., Маслій Л.О.</i> Комплексна проблема розширення можливостей кадастрових систем і шляхи її вирішення .....	110
<i>Нелін Є.О., Касьянов В.В., Штерндок Е.С.</i> Дослідження напрямів моніторингу використання об'єктів нерухомості населених пунктів .....	118

<i>Нестеренко С.Г., Радзінська Ю.Б., Мироненко М.Л., Афанасьєв О.В.</i> Вплив містобудівних обмежень на використання об'єктів підземної нерухомості .....	123
<i>Галкіна О.П., Куницький С.О., Іванчук Н.І., Ткачов В.О., Куницький М.О.</i> Аналіз методів оцінки впливу коксохімічного заводу на навколишнє середовище .....	130
<i>Шевченко А.О., Мясоедов О.Ю., Шевченко Т.О.</i> Розробка технології обробки дигестату стічних вод харчової промисловості .....	137

### **ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА**

<i>Абрамов Ю.О., Коломієць В.С., Собина В.О.</i> Моделі руху вогнегасної речовини в повітряному просторі .....	143
<i>Абрамов Ю.О., Кривцова В.І., Михайлюк А.О.</i> Інформаційні можливості перехідної функції газогенератора системи зберігання та подачі водню для оцінки його рівня пожежонебезпеки .....	148
<i>Доценко О.Г.</i> Методика експериментальних досліджень евакуації змішаних потоків людей різних груп мобільності .....	154
<i>Попов О.О., Корнієнко Р.В., Білоусов А.В.</i> Математичні засоби визначення достатності функціональної спроможності пожежних підрозділів на локальній території .....	160
<i>Трошкін С.Е.</i> Проведення натурального вогневого випробування у вертикальному кабельному тунелі атомної електростанції .....	168
<i>Федченко С.М.</i> Дослідження зниження міцності бетону залізобетонного ригеля в умовах вогневих випробувань .....	176
<i>Азаренко О.В., Гончаренко Ю.Ю., Дівізінюк М.М., Шевченко Р.І., Шевченко О.С.</i> Методи оцінки терористичних загроз стосовно стратегічних об'єктів держави .....	187
<i>Буц Ю.В., Крайнюк О.В., Сенчихін Ю.М., Барбашин В.В., Трішина О.О.</i> Вплив небезпечних токсичних факторів пожеж при військових діях на екосистеми і життєдіяльність населення .....	196
<i>Данова К.В., Малишева В.В., Колибельнікова Л.С., Логвінков С.М.</i> Цикл PDCA в контексті зниження психоемоційного напруження на робочому місці .....	202
<i>Крайнюк О.В., Буц Ю.В., Барбашин В.В., Яцюк М.В.</i> Використання штучного інтелекту для управління безпекою праці .....	207
<i>Протасенко О.Ф., Івашура А.А.</i> Екологічність робочого місця .....	214
<i>Серіков Я.О., Серікова К.С., Бабіщук К.О., Синельнікова Н.Р.</i> Дослідження стану охорони праці в зарубіжних країнах з метою імплементації досягнень в Україні .....	221

### **ТРАНСПОРТ**

<i>Гальона І.І., Ігнатенко О.С., Харченко О.І.</i> Роль технологій у покращенні транспортної безпеки: системи безпеки автомобілів та інфраструктури .....	226
<i>Калініченко О.П., Павленко О.В.</i> Методика визначення раціональної технології переміщення вантажів на складі .....	231
<i>Кузьменко О.Ю., Кузьменко В.С., Безуглова І.В.</i> Основні напрямки розвитку морських вантажоперевезень в Україні: формування нових логістичних вузлів .....	237
<i>Павленко О.В., Калініченко О.П.</i> Методика визначення ефективного варіанта технології роботи складу при використанні високоманеврених та енергоефективних багатовісних автомобілів .....	244



---

## CONTENTS

### *INFORMATION TECHNOLOGY*

<i>Hryhorenko N., Larionov N., Bredikhin V.</i> Research of the process of visual art transmission in music and the creation of collections for people with visual impairments .....	2
<i>Kandyba V., Kushnir O., Bredikhin V., Khoroshylova I.</i> Study of machine learning tools and algorithms for recognition and digitalisation of sales receipts .....	7
<i>Fedorchuk A., Usata O., Nakonechna O.</i> Web design and web programming in the modern Internet world .....	12
<i>Chahovets L., Chahovets V.</i> Digitalisation as a factor of socioeconomic development and economic security of the state .....	21
<i>Litvinov A.</i> Probabilistic analysis of multichannel bus arbitrators of computer network interfaces .....	27

### *ELECTRICAL ENGINEERING*

<i>Yesaulov S., Khvorost M., Babicheva O., Naidonov M.</i> Application of fuzzy logic in the control system of electromechanical equipment .....	33
--	----

### *THE DESIGN AND ARCHITECTURE*

<i>Votinov M., Smirnova O.</i> Architectural design and types of visualisation of innovative architectural objects .....	43
<i>Didenko K., Gella O.</i> Residential complexes built behind the State Industry Building in the structure of the capital's administrative centre of Kharkiv in the 1920s and 1930s .....	51
<i>Loktionova O.</i> On the question of defining the concept of 'architectural landscape of the city' .....	61
<i>Terletska K.</i> Classification of architectural monuments of territorial communities of the Carpathian region .....	67
<i>Shataliuk Yu., Shataliuk D.</i> Trends in the development of virtual reality tools in the global design practice .....	73
<i>Viatkin K., Kolodeznyi A.</i> Formation of factors influencing the development of agglomerations in the territorial planning system: world experience .....	79
<i>Firsov P., Zolotov S., Nadtochii S.</i> Analysis of crack formation and deformability of bent concrete structures reinforced with composite reinforcement .....	84
<i>Kondratiuk I.</i> Methods and models for evaluating the level of real estate use at the regional level .....	92
<i>Mamonov K., Viatkin R., Frolov V.</i> Land use monitoring of the regions: geoinformation aspects .....	98
<i>Mamonov K., Kanivets O., Dobrokhodova O., Shterndok E.</i> Monitoring of land use at the regional level: theoretical provisions and features of implementation .....	103
<i>Meteshkin K., Pilicheva M., Maslii L.</i> The complex problem of expanding the capabilities of cadastral systems and ways to solve it .....	110
<i>Nelin Ye., Kasianov V., Shterndok E.</i> Research on the directions of monitoring the use of real estate in settlements .....	118
<i>Nesterenko S., Radzinska Yu., Myronenko M., Afanasiev O.</i> Impact of urban planning restrictions on the use of underground real estate .....	123

<i>Galkina O., Kunytskyi S., Ivanchuk N., Tkachov V., Kunytskyi M.</i> Analysis of methods for assessing the impact of a coke plant on the environment .....	130
<i>Shevchenko A., Miasoiedov O., Shevchenko T.</i> Development of technology for treatment of wastewater digestat from the food industry .....	137

### **CIVIL SECURITY**

<i>Abramov Yu., Kolomiets V., Sobynta V.</i> Models of extinguishing agent movement in air space .....	143
<i>Abramov Yu., Kryvtsova V., Mykhailiuk A.</i> Information capabilities of the transition function of the hydrogen storage and supply system gas generator to assess its fire hazard level .....	148
<i>Dotsenko O.</i> Method of experimental research of evacuation of mixed flows of people of different mobility groups .....	154
<i>Popov O., Korniienko R., Bilousov A.</i> Mathematical means of determining the sufficiency of the functional capacity of fire departments in the local area .....	160
<i>Troshkin S.</i> Conducting a natural fire test in the vertical cable tunnel of a nuclear power plant .....	168
<i>Fedchenko S.</i> Study of strength reduction of reinforced concrete beam under fire tests ....	176
<i>Azarenko O., Honcharenko Yu., Diviziniuk M., Shevchenko R., Shevchenko O.</i> Methods of assessing terrorist threats to strategic facilities of the state .....	187
<i>Buts Yu., Krainiuk O., Senchykhin Yu., Barbashyn V., Trishyna O.</i> Impact of hazardous toxic factors of fires during military actions .....	196
<i>Danova K., Malysheva V., Kolybelnikova L., Lohvinkov S.</i> The PDCA cycle in the context of reducing psycho-emotional tension in the workplace .....	202
<i>Krainiuk O., Buts Yu., Barbashyn V., Yatsiuk M.</i> Use of artificial intelligence for work safety management .....	207
<i>Protasenko O., Ivashura A.</i> Workplace eco-friendliness .....	214
<i>Sierikov Ya., Sierikova K., Babishchuk K., Synelnikova N.</i> Study of the state of labour protection in foreign countries with the purpose of implementing achievements in Ukraine ....	221

### **TRANSPORT**

<i>Halona I., Ihnatenko O., Kharchenko O.</i> The role of technology in improving transport safety: vehicle and infrastructure safety systems .....	226
<i>Kalinichenko O., Pavlenko O.</i> Methodology for determining the rational technology for moving goods in the warehouse .....	231
<i>Kuzmenko O., Kuzmenko V., Bezuhlova I.</i> Main directions of sea freight development in Ukraine: formation of new logistics hubs .....	237
<i>Pavlenko O., Kalinichenko O.</i> Methodology for determining an effective variant of warehouse operation technology when using highly manoeuvrable and energy-efficient multi-axle vehicles .....	244