

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

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛІ РУХУ ВОГНЕГАСНОЇ РЕЧОВИНИ В ПОВІТРЯНОМУ ПРОСТОРІ

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 диференціальних рівнянь. Математичні моделі руху вогнегасної речовини в повітряному просторі описуються системою диференціальних 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 β .

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 σ , величина якого дорівнює ± 1 .

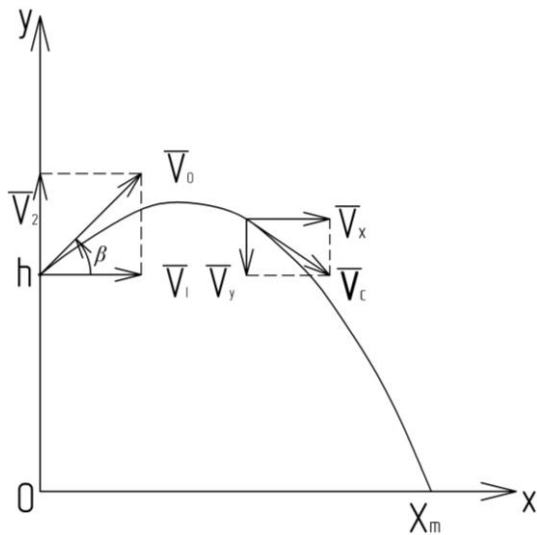


Рис. 1. Графічна інтерпретація руху вогнегасної речовини

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; α – 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.

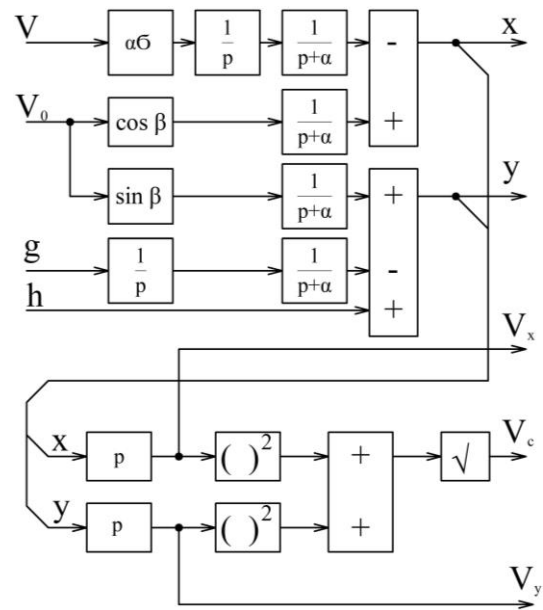


Рис. 2. Структурно-динамічна схема подачі вогнегасної речовини до вогнища горіння

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 пакета 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⁻¹; $\beta = (5 \div 20)$ град; $\alpha = (0,2 \div 0,6)$ с⁻¹.

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

- для малих кутів β , величини яких не перевищують 5 град, має місце незначне зростання величини t_m при збільшенні параметра α . 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 , мс ⁻¹	β_1 , град	t_m , с		
		α , 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 мс⁻¹ до 10 мс⁻¹ розширюється діапазон кутів β , в якому має місце зростання величини t_m при збільшенні параметра α . В цьому випадку діапазон кутів β дорівнює 20 град;

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

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

У табл. 2 наведені значення максимальної дальності подачі вогнегасної речовини для $V_0 = 20$ мс⁻¹; $V = 5$ мс⁻¹; $\alpha = (0,2 \div 0,6)$ 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 α від 0,2 с⁻¹ до 0,6 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

σ	β_1 , град	x_m , м		
		α , 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 $\alpha = 0,2$ 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 $\alpha = 0,6$ 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 $V_0 = 20$ мс⁻¹; $V_0 = 5$ мс⁻¹; $\alpha = (0,2 \div 0,6)$ с⁻¹ при $\beta = 5$ град та $\beta = 15$ град.

Таблиця 3

Значення швидкості руху вогнегасної речовини на максимальній дальності її подачі

σ	β_1 , град	V_c , мс ⁻¹		
		α , 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 α від 0,2 с⁻¹ до 0,6 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 $\alpha = 0,2$ 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 $\alpha = 0,6$ 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 α .

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} ($V_{01} = 10 \text{ мс}^{-1}$; $V_{02} = 20 \text{ мс}^{-1}$; $V_{03} = 30 \text{ мс}^{-1}$;) 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 $V_{01} = (10 \div 30) \text{ мс}^{-1}$, 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 , τ_n – коефіцієнт передачі та час запізнення ділянки, на якій здійснюється подача вогнегасної речовини. За параметр τ_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/FHOVVvPS.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 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).
- Цасюк В. В. Теоретична механіка : навч. посіб. / В. В. Цасюк. – Київ : Центр навчальної літератури, 2004. – 402 с.
 - 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.
 - Модельовання систем у середовищі MATLAB / С. С. Забара, О. О. Гагарін, І. М. Кузьменко, Ю. Д. Щербашин. – Київ : Університет «Україна», 2011. – 137 с.
 - Котов А. Г. Пожежогасіння та системи безпеки / А. Г. Котов. – Київ : Ренпо-Графіка, 2003. – 270 с.

References

- 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 [in Ukrainian]
- 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)
- Olshanskyi, V. P. (2004). On the construction of the fire hydraulic jet irrigation area. *Problems of fire safety*, (15), 153–159.
- Abramov, Yu., Basmanov, O., Krivtsova, V., & Khizhnyak, 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)
- 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.
- Khizhniak, 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]
- Tsasiuk, V. V. (2004). *Theoretical mechanics: study guide*.

- Tsentr navchalnoi literatury [in Ukrainian]
- 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]
 - Zabara, S. S., Haharin, O. O., Kuzmenko, I. M., & Shcherbashyn, Yu. D. (2011). *Modelling systems in MATLAB*. University 'Ukraine' [in Ukrainian]
 - 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
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
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
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 $(0.66 \div 0.88)$ 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.