

*І.К. Кириченко, д.ф-м.н., проф., НУЦЗУ,
К.М. Остапов, викладач, НУЦЗУ,
В.В. Сировий, к.т.н., доцент, НУЦЗУ*

ДИСТАНЦІЙНА ПОДАЧА ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИХ СПОЛУК УСТАНОВКОЮ АУГГУС-М (представлено д.т.н. Куценком Л.М.)

Проведені експериментальні дослідження, що дозволили отримати матеріал для розробки математичних моделей процесів подачі гелеутворюючих сполук на відстань 10 і більше метрів за допомогою установки АУГГУС-М. Результати дослідження дозволяють з альтернативних траєкторій руху струменів, вибирати необхідні для забезпечення ефективного гасіння гелеутворюючими сполуками з різних дистанцій.

Ключові слова: гелеутворюючі сполуки, вогнегасні речовини, траєкторії руху, математична модель, кут, установка.

Постановка проблеми. За останнє десятиліття кількість пожеж в Україні не зменшувалась і на сьогодні становить близько 80 тис. пожеж на рік, збитки від яких в 2017 році склали понад 7 млрд. грн. [1]. В зв'язку з чим, зазначимо, що з початку 1990-х років у світі з застосуванням води ліквідувалося близько 82% пожеж [2]. Рідинні засоби пожежогасіння на основі води знайшли найбільш поширене застосування завдяки доступності, зручності транспортування до місця пожежі та використання різних технічних засобів і тактичних прийомів, що забезпечують безпечну роботу особового складу пожежних [3, 4].

У цьому сенсі слід особливо підкреслити, що незважаючи на всі переваги води, вона має істотний недолік, який полягає у великих її втратах за рахунок стікання з похилих поверхонь, що істотно знижує її вогнегасну ефективність і призводить до додаткових збитків від стікання води на розташовані нижче поверхи [5].

Суттєво зменшити втрати вогнегасної речовини (ВГР) (в тому числі і води), а також, прямі і побічні збитки, дозволяє застосування гелеутворюючих сполук (ГУС), використання яких дозволяє зменшити побічні збитки від проливу води в десятки разів [6, 7].

Однією з проблем використання ГУС на практиці, полягає в тому, що специфічні особливості прийомів подачі ГУС [8], які складаються з двох окремо збережених і роздільно-одночасно поданих компонент на об'єкти пожежогасіння, на даний момент майже не розглядалися, що в принципі не дозволяло досить ефективно і широко використовувати їх на практиці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В процесі дослідження механізму гасіння гелеутворюючими сполуками [9, 10], а також оцінки його ефективності, використовувались дослідні установки гасіння АУГГУС и АУГГУС-П [6]. Разом з цим раніше запропоновані технічні рішення та прийоми подачі ГУС фактично дозволяли проводити гасіння,

з відстані не більше 1-го метра, що з точки зору безпеки особового складу та вимог ДСТУ, щодо мінімальної довжини струменя ВГР – не відповідає вимогам та не дозволяє досить ефективно і широко використовувати ГУС на практиці [11, 12].

Для забезпечення вимог ДСТУ та безпечної реалізації ГУС в роботі [13] була розроблена дослідна установка гасіння гелеутворюючими сполуками АУГГУС-М, яка дозволяє здійснювати подачу двох компонент ГУС на відстань до 10 метрів, тим самим реалізуючи їх більш безпечно. Однак, дослідження [14] з гасіння модельних вогнищ установкою АУГГУС-М показали, що використання даної установки без відповідного відпрацювання тактико-технічних особливостей подачі, а саме більш детального розгляду траєкторій руху одиночними та бінарними струменями компонент ГУС, не дозволяє використовувати їх максимально ефективно на практиці.

Постановка завдання та його вирішення. Метою роботи є забезпечення раціонального трасування струменів складових ГУС при подачі їх на відстань до 10 метрів.

Дослідження особливостей роботи пристроїв і установок пожежогасіння здійснюється, як правило, дослідним шляхом і поєднанням його з математичними методами теорій, що базуються на експериментальному матеріалі. Тому на початку експериментальних досліджень вивчалася можливість представлення руху одиночних і бінарних розпиленних струменів ГУС до умовних об'єктів пожежогасіння у вигляді ліній, які відтворюють їх осьові траєкторії. Для отримання фактичного експериментального матеріалу спочатку вирішувалося завдання аналізу руху струменів ВГР з урахуванням Ейлеревих кутів (α – підвищення відносно горизонту і ψ – відхилення відносно площини націлювання на об'єкт пожежогасіння), які визначають в просторі координат ($OXYZ$) орієнтацію стволів-розпилювачів (рис. 1), що відповідають максимальним значенням дальності і висоти струменів ВГР в процесі їх подачі.

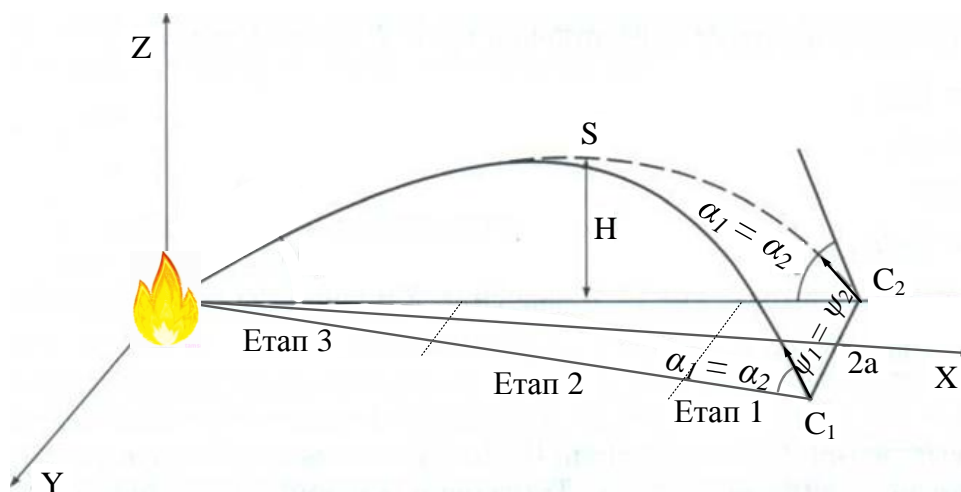


Рис. 1. Схема проведення експериментів з прицілюванням стволів на осередок пожежі, що подають компоненти ГУС з точок C_1 і C_2 , на епіцентр пожежі; α_1 і α_2 та ψ_1 і ψ_2 – кути орієнтації стволів у просторі $OXYZ$

На фото (рис. 2) зображена реальна картина подачі струменя ВГР, де вузловими точками показана траєкторія руху струменя ВГР.



Рис. 2. Формування експериментальних даних для аналітичної побудови траєкторій руху струменів, що подаються з установки АУГГУС-М

В табл. 1, як приклад застосування математичної обробки експериментальних даних, приведені усереднені результати оцінки середньоарифметичних значень координат точок, що належать лініям, які спрощено відтворюють осьові траєкторії струменів ВГР.

Табл. 1. Усереднені значення координат “реперних” точок розділених за трьома етапами траєкторій руху струменів ВГР

Точка №		1	2	3	4	5	6	7	8
Струмінь №1	X_1 (м)	0,6	1,7	3	4,2	5,6	6,8	8,2	9
	Z_1 (м)	1,2	1,4	1,6	2	2,1	2	1,6	1,7

Як і очікувалося, рух струменів обох компонент ГУС на об’єкт пожежогасіння, здійснювався параболічними траєкторіями (рис. 2). Тому, за допомогою отриманих фото і відео матеріалів, можливо досить точно встановити геометричні параметри траєкторій руху ГУС.

Подальша обробка і аналіз цього матеріалу можуть бути здійснені на основі відповідних графіків, таблиць, математичних залежностей, що побудовані різними методами. Серед найбільш поширених методів, які перетворюють табличні дані експериментів до всіляких кривих, зручних при аналізі досліджуваних процесів, є відомий метод найменших квадратів (МНК) [15]. Тут табличні дані визначаються на підставі значень координат вузлових точок (реперних точок) рівномірно поділеної сітки з кроком $\Delta n = (a \leq x_1 < \dots < x_n \leq b)$.

Більш загальним методом, де зазначена сітка поділена не рівномірно, з орієнтуванням на поширені дослідження, використовують різновид МНК – метод інтерполяції табличних даних поліномами Лагранжу $L_n(x) = L_n(f; x)$, такими, що $L_n(x_k) = f(x)$ [16].

На підставі “знятих” з фотоматеріалів осереднених експериментальних значень координат траєкторій розпиленних струменів ВГР, що по-

даються в точку умовного осередку пожежі, на початковій стадії досліджень будемо користуватися цим методом.

Будемо вважати, що визначена за реперними точками натурального експерименту параметрична крива траєкторії струменя відповідає залежностям координат від часу третього степеня. Тоді рівняння для осової лінії траєкторії струменя ВГР запишеться в вигляді:

$$\begin{aligned} X(t) &= A_1(\alpha)t^3 + B_1(\alpha)t^2 + C_1(\alpha)t, \\ Z(t) &= A_2(\alpha)t^3 + B_2(\alpha)t^2 + C_2(\alpha)t, \end{aligned} \quad (1)$$

де α – кут нахилу до горизонту ствола; t – поточний час.

У функціях $X(t)$ і $Z(t)$ відсутні складові нульового степеня, тому що початок координат поєднано з точкою, в якій знаходяться стволи-розпилювачі – точка з координатами $(0, 0)$. З іншого боку, регресійний аналіз [17], який використовувався нами щодо отриманого експериментального матеріалу, дозволяє зробити деякі спрощення в формулах (1). Визначене значення X/t , яке відповідає фізичному змісту швидкості, будемо називати ефективною швидкістю струменя. Тоді на підставі даних табл. 1 неважко обчислити середнє значення ефективною швидкості в напрямі координати OX , або інакше – його математичне сподівання

$$\langle X/t \rangle^* = 1/N \sum_i (X_i/t_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8. \quad (2)$$

Тут N – кількість точок, отриманих в результаті експерименту (однакових для кожної серії дослідів); X_i – абсциса відповідної i -ої точки; t_i – момент часу для цієї точки.

Середньоквадратичне відхилення значення $(X/t)^*$ знаходиться згідно з відомим співвідношенням

$$\langle (X/t) \rangle = 1/N \sum_i \{(X/t)^* - X_i/t_i\}^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8. \quad (3)$$

Зрозуміло, що, якщо середньоквадратичне відхилення (3) менше, ніж похибка вимірювань, то величину X/t можна вважати сталою. Тоді, перше рівняння системи (1) буде уявляти собою лінійну функцію, причому коефіцієнт пропорційності між координатою X і змінною t буде залежати від того ж аргументу – кута α . Після оцінки точності результатів обробки експериментальних даних та визначення, що похибка вимірювань в експерименті завжди перевищує середньоквадратичне відхилення, стали вважати доведеним, що $X(t)$ є лінійною функцією часу.

Враховуючи доведене запишемо в явному вигляді рівняння для траєкторії $Z = Z(X)$. Дійсно, виключаючи в рівняннях (1) параметр “час”, отримаємо шукану кубічну параболу

$$Z(X) = A_2(\alpha)X^3 + B_2(\alpha)X^2 + C_2(\alpha)X, \quad (4)$$

У формулі (4) залишені ті ж самі позначення коефіцієнтів при змінній X , що і в формулі (1).

Для визначення коефіцієнтів у формулі (4) теж використаємо результати експериментів та математичний метод інтерполяції поліномами Лагранжа.

Згадані коефіцієнти для n -го експерименту визначаються наступним чином. Розглянемо функцію

$$F_n(A_{2n}, B_{2n}, C_{2n}) = \sum_i (Z_i - Z(X_i))^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 8. \quad (5)$$

Ця функція – є поліномом другого степеня щодо коефіцієнтів A_{2n}, B_{2n}, C_{2n} . Знайдемо її мінімум [16]. Згідно з теорією побудови інтерполяційних кривих з використанням поліномів Лагранжа мінімум функції F_n визначається системою лінійних рівнянь відносно коефіцієнтів A_{2n}, B_{2n}, C_{2n} , отриманих при обчисленні значень перших похідних від виразу (2.6) для кожного з коефіцієнтів. Шукана система рівнянь має вигляд

$$\frac{\partial F_n}{\partial A_n} = 0; \quad \frac{\partial F_n}{\partial B_n} = 0; \quad \frac{\partial F_n}{\partial C_n} = 0, \quad (6)$$

Розв'язуючи систему лінійних рівнянь (6) методом Гауса або за допомогою оберненої матриці [16], знаходимо шукані коефіцієнти.

В результаті узагальнення даних проведених експериментальних досліджень знаходяться криві осьових ліній струменів ГУС, які залежать від кута нахилу стволів (рис. 3).

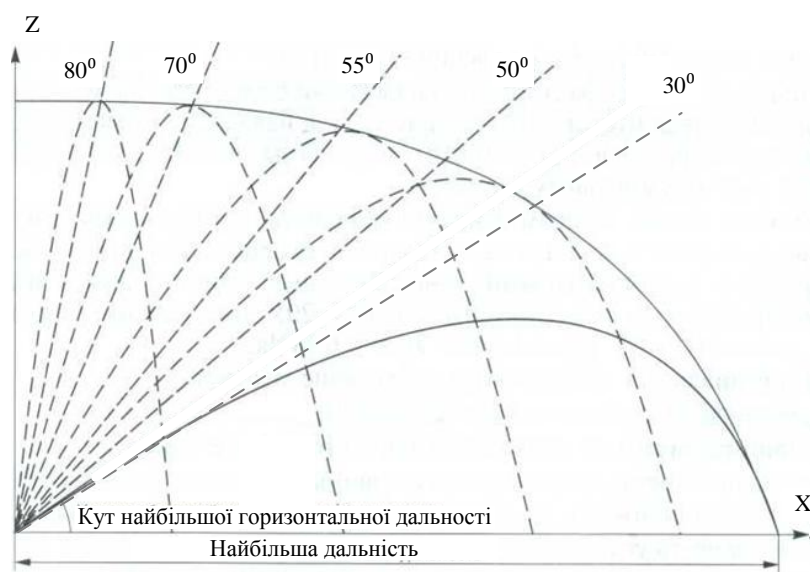
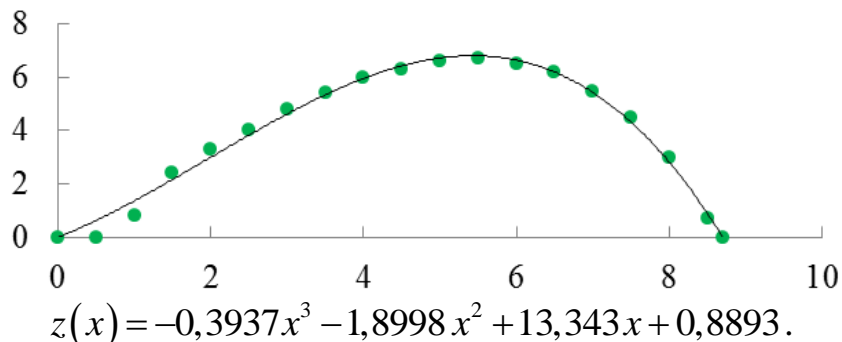


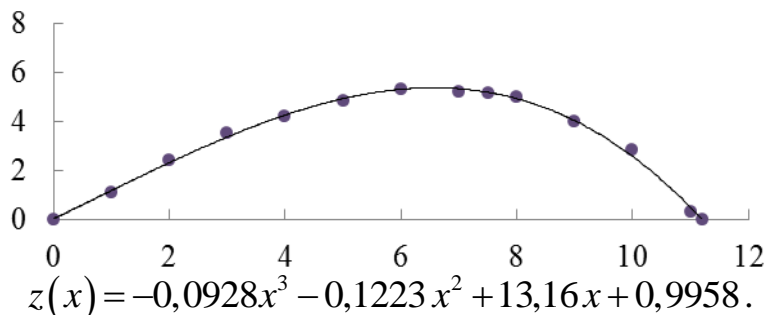
Рис. 3. Траєкторії осьових ліній струменів води, що подаються стволом-розпилювачем під різними кутами нахилу α

Графіки необхідних траєкторій, таблиці відповідних координат вузлових точок та аналітичні вирази, щодо траєкторій на рис. 3 зображено на рис. 4–6.



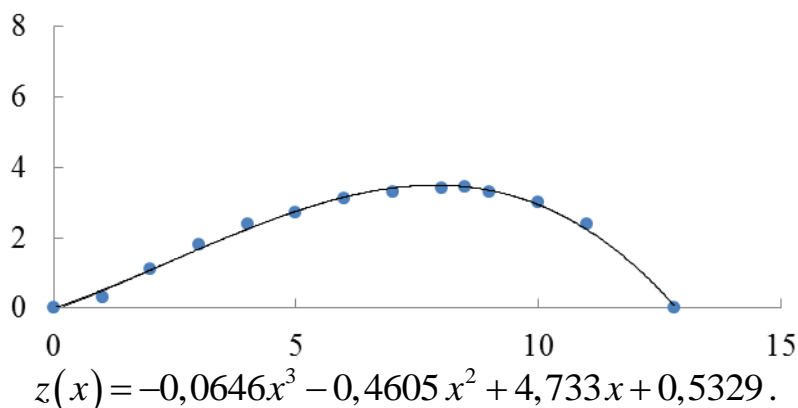
x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,7
z	0	1,5	3,3	4,8	6,0	6,6	6,5	5,5	3,0	0

Рис. 4. Траєкторія осьової лінії струменя, що подається стволом-розпилювачем під кутом нахилу 55°



x	0	1	2	3	4	5	6	7	7,5	8	9	10	11	11,2
z	0	1,1	2,4	3,5	4,2	4,8	5,3	5,2	5,15	5,0	4,0	2,8	0,3	0

Рис. 5. Траєкторія осьової лінії струменя, що подається стволом-розпилювачем під кутом нахилу 50°



x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8,5	9	10	11	12,8
z	0	0,6	1,1	1,8	2,4	2,7	3,1	3,3	3,4	3,45	3,3	3,0	2,4	0

Рис. 6. Траєкторія осьової лінії струменя, що подається стволом-розпилювачем під кутом нахилу 30°

Знайдені таким чином аналітичні залежності з тактико-технічної точки зору зручніше (в оперативній обстановці) використовувати за допомогою графіків (рис. 4) так, що одразу маємо можливість вибрати необхідну дистанцію розміщення установки типу АУГГУС-М та кут нахилу ствола-розпилювача для відповідного випадку пожежогасіння.

В подальших дослідженнях більш точний аналіз розглянутого процесу може бути виконаний, якщо вважати першу складову (1) не лінійною, а квадратичною, тобто є

$$\begin{aligned} X(t) &= \varepsilon(\alpha)t^2 + C_1(\alpha)t; \\ Z(t) &= A_2(\alpha)t^3 + B_2(\alpha)t^2 + C_2(\alpha)t. \end{aligned} \quad (7)$$

де ε – мала, наперед задана похибка апроксимації.

Якщо немає необхідності задавати заздалегідь відповіді похибки результатів проведення експериментів ε , то і в цьому випадку (в першому наближенні) можна показати, що співвідношення (7) справедливо для даної форми траєкторії струменя в тому розумінні, що воно може бути описано, як поліном вигляду $Z = Z(X)$. Різниця полягає лише в тому, що степінь полінома буде вище.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження, що дозволили отримати матеріал для розробки математичних моделей процесів подачі ГУС на відстань 10 і більше метрів за допомогою установки АУГГУС-М. Результати експериментально-теоретичних досліджень, за допомогою відповідного тактико-технічного забезпечення до установки АУГГУС-М, дозволяють з альтернативних траєкторій руху складових струменів, вибирати необхідні при бінарному подаванні гелеутворюючих сполук на пожежогасіння з різних дистанцій. На основі теорії прийняття оптимальних рішень в умовах визначеності вибором раціональних траєкторій руху складових струменів ГУС із таких, що мають різні кути нахилу стволів-розпилювачів, за допомогою установки АУГГУС-М забезпечено ефективно пожежогасіння з різних дистанцій до осередку пожежі. Показано, що траєкторія руху струменів ГУС та її характерні параметри можуть бути визначені на основі математичної моделі з використанням інтерполяційних поліномів Лагранжа третього степеня. Подальше їх уточнення якісно не змінює вигляд рішення, лише підвищується степінь апроксимуючого полінома з деякими ускладненнями аналізу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аналіз масиву карток обліку пожеж за 12 місяців 2017 року [Електронний ресурс] // Режим доступу: [https:// undicz.dsns.gov.ua/ua/Analiz-masivu-kartok-obliku-pozhezh.html](https://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analiz-masivu-kartok-obliku-pozhezh.html).
2. World Fire Statistics. Report 22 [Electronic resource] // Mode of access: [https:// www.ctif.org/world-fire-statistics](https://www.ctif.org/world-fire-statistics).

3. John Norman Fire Officers Handbook of Tactics / Norman John. South Sheridan Road Tulsa, Oklahoma, 2012–311 p.

4. Delmar Learning Firefighter's Handbook Essentials of Firefighting and Emergency Response / Learning Delmar. – USA: Delmar Publishers, 2004–1056 p.

5. Калугін В.Д., Кустов М.В. Вогнегасні емульсії: теорія, сполуки, використання: монографія / В.Д. Калугін, М.В. Кустов – Х.: НУЦЗУ, 2011. – 178 с.

6. Абрамов Ю.А. Гелеобразующие огнетушащие и огнезащитные средства повышенной эффективности применительно к пожарам класса А: монография / Ю.А. Абрамов, А.А. Киреев. – Харьков: НУЦЗУ, 2015. – 254 с.

7. Analysis of solevolution in sol-gel synthesis by use of rheological measurements / Tănase Dobre, Oana Cristina Părvulescu, Gustav Iavorschi, Anicuța Stoica, Marta Stroescu. // U.P. B. Sci. Bull., Series B, V. 71, Iss. 3, 2009, p. 55–64.

8. Hamounda A.A. Factor affecting alkaline sodium silicate gelation for in depth reservoir pro file modification / A.A. Hamounda, H.A. Akhlaghi Amiri // Energies, 2014. – no. 7. – pp. 568–590.

9. Chow W.K. A review on studying extinguishing room fires by water mist / Chow W.K., Li Y.F. // J. Appl. Fire Sci. – 2002–2003. – V. 11, № 4. – С. 367–403.

10. Analysis of sol evolution in sol-gel synthesis by use of rheological measurements / Tănase Dobre, Oana Cristina Părvulescu, Gustav Iavorschi, Anicuța Stoica, Marta Stroescu. // U.P. B. Sci. Bull., Series B, V. 71, Iss. 3, 2009, p. 55–64.

11. Ostapov K.M. Development of the installation for the binary feed of gelling formulations to extinguishing facilities / K.M. Ostapov, Yu.N. Senchihin, V.V. Syrovoy // Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences – Budapest: Rózsadomb, 2017. – Issue 132 – P. 75–77. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3891>.

12. Сенчихин Ю.Н. Тактика подачи потока струй огнетушащих составов установками типа АУТГОС / Ю.Н. Сенчихин, В.В. Сыровой, К.М. Остапов // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУЦЗУ, 2017. – Вып. 41. – С. 168–176. Режим доступа: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2129>.

13. Пат. 118440 Україна, МПК А 62 С 31/00, А 62 С 31/02. Установка дистанционного гашения пожаров гелеобразующими сполуками / Голендер В.А., Росоха С.В., Сенчихин Ю.Н., Сыровой В.В., Остапов К.М. – заявник і патентовласник Національний університет цивільного захисту України. – № 201701600. Заявл. 20.02.2017; Надр. 10.08.2017; Бюл. 15. – 5 с.

14. Остапов К.М. Особенности применения опытной установки АУТГОС-М / К.М. Остапов, Ю.Н. Сенчихин, В.В. Сыровой // Науковий вісник будівництва – Харків: ХДТУБА ХОТВ АБУ, 2017. – Вып. 88, С. 276–279.

15. Дудко В.С. Економіко-математичне моделювання: навчальний посібник: в 2 частинах / В.С. Дудко, Т.Д. Краснова, В.В. Лаговський. – Ірпінь: НУДПСУ, 2010. – 448 с.

16. Свердан М.М. Основи наукових досліджень: навч. посіб. / М.М. Свердан, М.Р. Свердан. – Чернівці : Рута, 2006. – 352 с.

17. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології: наук. зб. Вип. 12 / Гол. ред. Я. Бурак. – Л. : Ін-т приклад. проблем механіки і мат. ім. Я. Підстригача, 2010. – 215 с.

Отримано редколегією 14.03.2018

И.К. Кириченко, К.М. Остапов, В.В. Сировой

Дистанционная подача гелеобразующих составов установкой АУГГУС-М

Проведены экспериментальные исследования, позволившие получить материал для разработки математических моделей процессов подачи гелеобразующих составов на расстояние 10 и более метров с помощью установки АУГГУС-М. Результаты исследования позволяют из альтернативных траекторий движения струй, выбрать необходимые для обеспечения эффективного тушения гелеобразующими составами с разных дистанций.

Ключевые слова: гелеобразующие соединения, огнетушащие вещества, математическая модель, угол, установка.

I. Kyrychenko, K. Ostapov, V. Syrovoy

Remote feeding of gel-forming compounds with AUGGUS-M

Experimental studies have been carried out, which made it possible to obtain material for the development of mathematical models of the processes of supplying gel-forming compositions for a distance of 10 meters or more using the AUGGUS-M installation. The results of the investigation make it possible from the alternative trajectories of the jets to select the necessary gel-forming compositions necessary for ensuring effective quenching from different distances.

Keywords: gel-forming compositions, extinguishing substances, trajectories of motion, mathematical model, angle, installation.