

*С.В. Росоха, д.т.н., доцент, ООО Брандмастер,  
В.В. Сыровой, к.т.н., доцент, НУГЗУ,  
К.М. Останов, преподаватель, НУГЗУ*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СТРУЙ ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ СОСТАВОВ**

(представлено д.т.н. Комяк В.М.)

Получены аналитические выражения, позволяющие строить траектории движения незатопленных струй гелеобразующих составов (ГОС) для составления алгоритмов трассировки их движения, которые необходимы при аналитическом решении задач, обеспечивающих эффективное тушение и защиту объектов пожаротушения с использованием минимального количества огнетушащих веществ (ОВ).

**Ключевые слова:** гелеобразующие составляющие (ГОС), огнетушащие вещества (ОВ), траектории движения, угол, скорость.

**Постановка проблемы.** Развивая идеи исследований [1, 2] в части тушения пожаров гелеобразующими составами (ГОС) с применением автономных установок тушения гелеобразующими составами типа АУТГОС и АУТГОС-П, приходится констатировать, что одной из сторон проблемы эффективного пожаротушения гелеобразующими составами является своевременное смешивание и (как следствие) гелеобразование соответствующей смеси ОВ, что существенно влияет на количество ГОС активно участвующей в тушении (так называемый коэффициент использования) [3].

В связи с этим, локализация и ликвидация возникающих возгораний и распространяющихся пожаров класса А, требует не только увеличивать количество подаваемых на очаг огнетушащих составов (ОВ/ГОС), но и применять при этом соответствующее тактическое обеспечение. То есть, ко всему прочему, иметь и квалифицированно использовать научно обоснованные рекомендации о том каким наиболее эффективным образом работать с пожарно-техническим оснащением.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В литературе по пожарному делу достаточно полно исследованы вопросы пожаротушения подачей компактных и распыленных струй воды в очаг пожара с помощью лафетных и ручных стволов. Разработаны методы и методики моделирования самого процесса тушения пожаров [4, 5]. Однако вопросы, связанные с дистанционной подачей бинарных потоков гелеобразующих составов (ГОС) при пожаротушении, а так же изучение движения компонент ГОС рассматриваются нами впервые.

**Постановка задачи и ее решение.** Цель исследования – анализ траекторий прицельного движения составляющих ГОС, подаваемых из двух стволов-распылителей на очаг пожара, расположенного внутри некоторой области Р с эпицентром в т. Э (рис. 1).

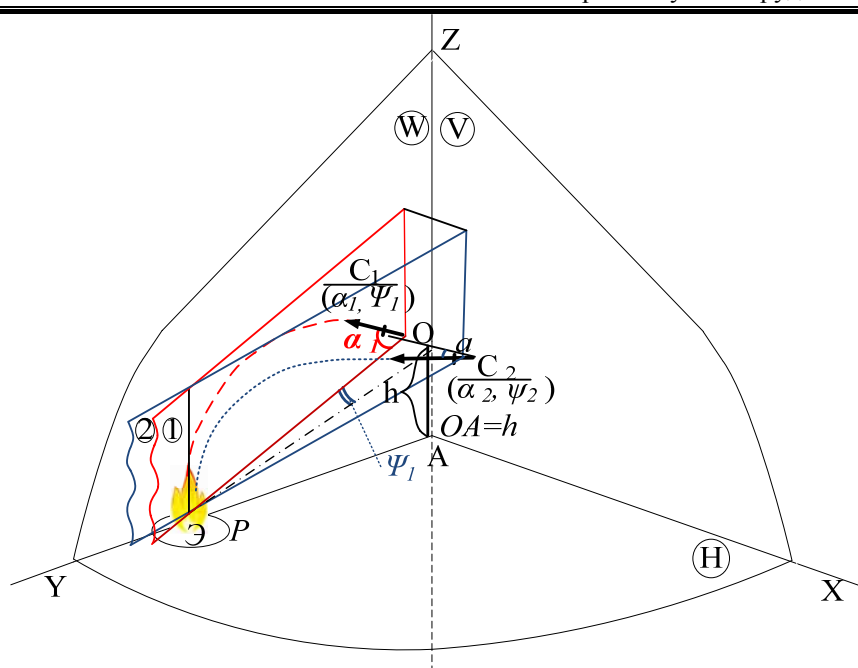


Рис. 1. Схема расположения стволов-распылителей  $C_1$  и  $C_2$ , подающих в эпицентр пожара (т. Э) компоненты бинарного потока ГОС:  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – углы возвышения стволов,  $\psi_1$  и  $\psi_2$  – углы их рыскания,  $2a$  – расстояние между стволами, расположенные на уровне  $h_1=h_2=h$

Пусть твердые горящие в очаге материалы и изделия сосредотачиваются в определенной области, очерченной периметром  $P$ , на некотором удалении  $L_0$  от исходной позиции, где размещены два ствола-распылителя  $C_1$  и  $C_2$ , нацеленные на эпицентр пожара (точка Э).

Понятно, что при тушении пожаров любыми установками пожаротушения, в т.ч. и типа АУТГОС, струи составляющих ГОС (с точки зрения внешней баллистики) необходимо подать в эпицентр пожара аналогично схемам традиционного пожаротушения распыляемой водой. То есть компоненты ГОС следует направить таким образом, чтобы осевые линии траекторий обеих струй замыкались в точке, не выходящей за границы периметра очага пожара  $P$ . В частности, – к точке Э эпицентра возгорания, отстоящего от исходной позиции на расстоянии  $L_0$  (рис. 2).

Для решения подобных задач, связанных с исследованием «свободного» движения материальных тел в воздухе, в частности, с определением параметров прицельной подачи струй ОВ/ГОС на очаг пожара, наука баллистика позволяет записать уравнение траекторий полета капель струй в аналитической форме. Их математические выражения представимы в виде систем уравнений, учитывающих влияние определенного количества значимых параметров.

Для такого подхода известны математические приемы, изложенные в работах [6, 7], которые применимы при аналитических исследованиях траекторий движения каждой из составляющих ГОС в отдельности (рис. 2). В них предполагается, что одиночная струя ОВ, направленная под углом  $\alpha$  к горизонту, осуществляет движение в воздухе, сопротивление которого пропорционально скорости элементарных частиц струи (капель).

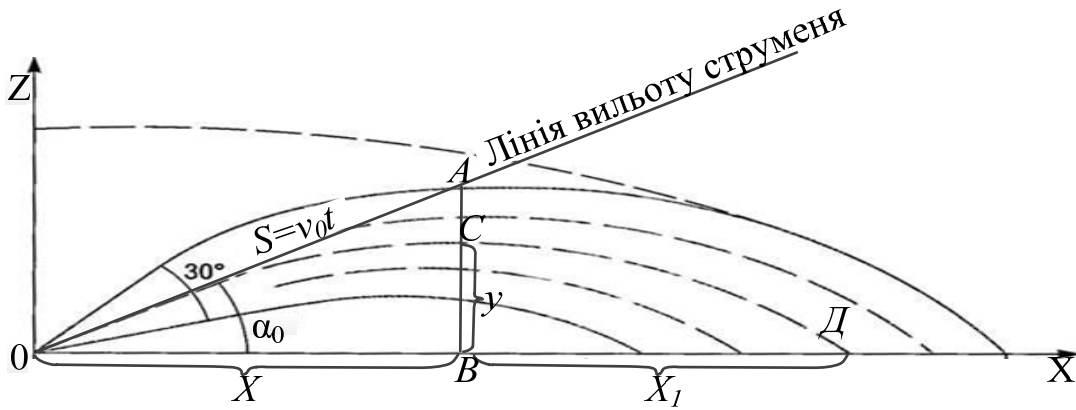


Рис. 2. Иллюстрация к выводу уравнения траектории полета капль ОВ с начальной скоростью движения  $v_0$  в гравитационном поле

Что бы установить параметры траектории движения такой струи исследуемый процесс идеализируется и вводится допущение о том, что «самоизмельчение» летящих капль за счет присутствия в водных растворах ОВ/ГОС специальных добавок отсутствует. Тогда опираясь на классические схемы исследований движения тел, брошенных под углом  $\alpha$  к горизонту, будем иметь траектории полета капль такие, как показаны на рис. 2.

Здесь подразумевается, что: начальная скорость вылета капли массой  $m$  равна  $v_0$ , и сопротивление среды пропорционально (с коэффициентом  $k$ ) скорости  $v$  элементарной частицы струи. Обозначив ускорение силы тяжести через  $g$ , получим систему дифференциальных уравнений [8]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m} \cdot \frac{dx}{dt} = 0; \quad \frac{d^2z}{dt^2} + \frac{k}{m} \cdot \frac{dz}{dt} = -g. \tag{1}$$

Известно, что частное решение этой системы в параметрическом виде запишется:

$$x = a \left( 1 - e^{-\frac{g}{c}t} \right); \quad z = b \left( 1 - e^{-\frac{g}{c}t} \right) - ct, \tag{2}$$

где  $a = \frac{mv_0}{k} \cos \alpha$ ;  $b = \frac{m}{k^2} (mg + kv_0 \sin \alpha)$ ;  $c = \frac{mg}{k}$ .

Вместе с тем, частное решение (2), описывающее изменения координат  $x$  и  $Z$  в зависимости от обобщенной координаты времени  $t$  не всегда удобно применять на практике. Более приемлемым для реализации является представление уравнения траектории в явном виде. Его определить несложно, если в (2) выполнить следующие действия:

Сначала с 1-го выражения системы (2) вычленим  $1 - e^{-\frac{g}{c}t} = x/a$ .  
 Затем, во 2-й выражение системы (2) вместо  $1 - e^{-\frac{g}{c}t}$  подставим  $x/a$ .

В результате получим  $z = \frac{b}{a}x - ct$ , откуда  $t = \frac{bx - az}{ac}$ .

Теперь, подставляя выражение для времени  $t$  в первую формулу системы (2), находим выражение для  $x$ :

$$x = a \left( 1 - e^{-\frac{g}{ac^2}(bx-az)} \right).$$

$$\text{Откуда } z = \frac{1}{a} \left( bx + \frac{ac^2}{g} \ln \left( 1 - \frac{x}{a} \right) \right). \quad (3)$$

Или, в явном виде получаем

$$z = \frac{xkmg + xk^2v_0 \sin \alpha + m^2gv_0 \cos \alpha \ln \left( \frac{mv_0 \cos \alpha - xk}{mv_0 \cos \alpha} \right)}{k^2v_0 \cos \alpha}. \quad (4)$$

В результате имеем выражение (4), которое является идеализированным описанием «осредненной» линии траектории движения струи ОВ/ГОС в гравитационном поле, с учетом сопротивления воздуха. Соответственно источник одиночной струи находится в начале своей системы координат (рис. 3).

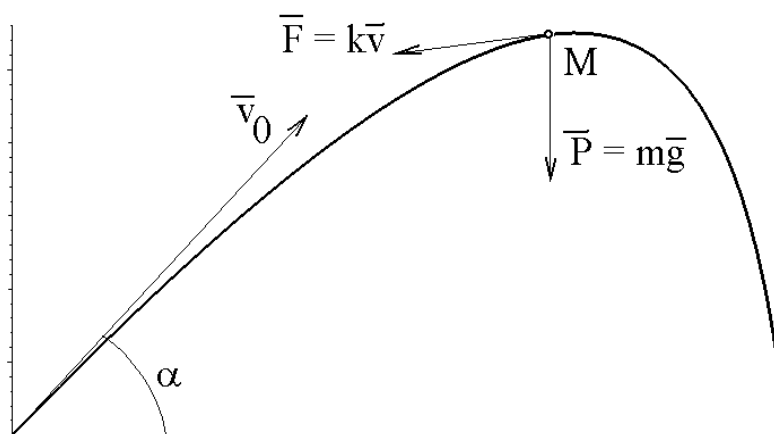


Рис. 3. Схематическое представление осевой линии полета капель струи с учетом сопротивления воздуха

В этом случае при определении параметров «осредненных» линий траекторий каждой из составляющих ГОС, направленных на очаг с одинаковыми начальными условиями (угол  $\alpha$  и скорости  $v_0$ ) необходимо решать систему нелинейных уравнений экспоненциально-тригонометрического вида:

$$z_1 = \frac{x_1 k m g + x_1 k^2 v_0 \sin \alpha + m^2 g v_0 \cos \alpha \ln \left( \frac{m v_0 \cos \alpha - x_1 k}{m v_0 \cos \alpha} \right)}{k^2 v_0 \cos \alpha};$$

$$z_2 = \frac{x_2 k m g + x_2 k^2 v_0 \sin \alpha + m^2 g v_0 \cos \alpha \ln \left( \frac{m v_0 \cos \alpha - x_2 k}{m v_0 \cos \alpha} \right)}{k^2 v_0 \cos \alpha}.$$
(5)

Исследования показали, что решение систем уравнений (1) часто приводит к нестабильности вычислительного процесса. Для систем вида (2) решение можно получить в замкнутой форме с использованием функции Ламберта  $W(x)$  – функции, которая удовлетворяет условию  $W(x)e^{W(x)} = x$  [6]. Таким образом, в среде математического процессора Maple [9] можно найти аналитические решения, определяющие зависимость  $v_0$  от  $\alpha$  (с использованием функции LambertW (x)), и зависимость  $\alpha$  от  $v_0$  (с использованием функции RootOf) [10].

Иными словами выражения (2) является основополагающими при установлении в явном виде параметров движения струй по «усредненной» осевой линии траектории с сопротивлением воздуха, которое пропорционально скорости  $v$  элементарных частиц (капель) струи.

Максимальный уровень подачи струи по высоте будет соответствовать величине

$$z_0 = \frac{m}{k^2} \left( k v_0 \sin \alpha + m g \ln \left( \frac{m g}{m g + k v_0 \sin \alpha} \right) \right)$$
(6)

и достигается в точке с координатой:

$$x_0 = \frac{m v_0^2 \sin 2\alpha}{2 m g + k v_0 \sin \alpha}.$$
(7)

Заметим, что получение подобных аналитических решений дает возможность установить характер движения в пространстве струй ГОС, направляемых стволами-распылителями на цель (очаг пожара или рядом расположенные объекты) [11]. Вместе с тем теоретические решения подобных задач пожаротушения должны подкрепляться экспериментально проверенными опытными данными (рис. 4).

В указанном смысле нами полученные эмпирические данные, позволили верифицировать результаты теоретических расчетов траекторий струй при различных углах  $\alpha_0$  и рабочих давлениях  $P$ , для чего применялась новая автомобильная установка АУТГОС-М [12].



Рис. 4. Подача двух струй ГОС на модельный очаг 1А

На рис. 5 представлены траектории распыленных струй в относительных координатах длин, полученные расчетным путем с использованием АУТГОС-М при давлении на спрыске соответственно 0,4; 0,6 и 0,8 МПа. Траектории струй даны для угловвозвышения стволов-распылителей  $\alpha_0$ , с шагом изменения  $3^\circ$ .

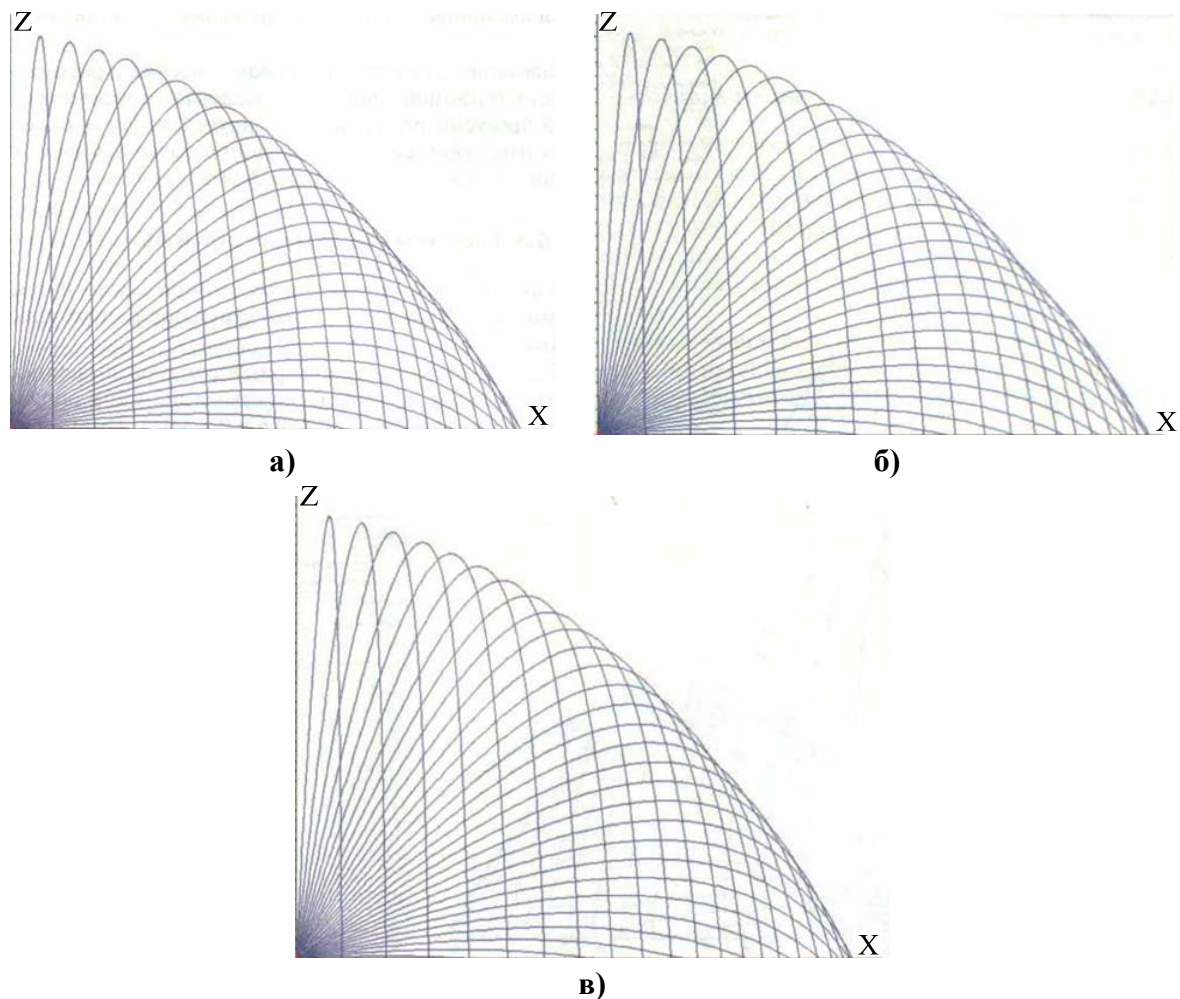


Рис. 5. Расчетные траектории распыленных струй: а)  $P = 0,4$  МПа; б)  $P = 0,6$  МПа; в)  $P = 0,8$  МПа

Сопоставительный анализ теории и эксперимента, проведенный нами, позволяет утверждать, что реальные траектории струй с достаточной степенью точности совпадают с расчетными кривыми. Максимальные отклонения расчетных кривых траекторий отмечались для углов возвышения более  $30^\circ$  на излете струи. Частично это может быть объяснено тем, что при значительных углах возвышения столов-распылителей (более  $30^\circ$ ) по достижении максимальной высоты, капли струи, теряя скорость, относительно легко сносятся конвективными потоками воздуха, из-за разницы температур вблизи земли и на некотором расстоянии от нее. Действительно на видео фиксации видно, что капли струи (притормаживая) сносятся в противоположном прямому движению ОВ/ГОС направлении – в сторону ствола. (Хотя видео фиксация экспериментов проводилась в безветренную погоду.)

В заключение отметим, что рассматриваемые в статье расчеты при пожаротушении выполняются (если они выполняются) для струй с углом подачи ОВ около  $30^\circ$  с целью попадания в очаг возгорания, расположенный на максимально возможной дистанции. Большие углы используются при нацеливании стволов на очаг, расположенный выше уровня среза стволов. В этих случаях следует проводить трассировку струй от исходной позиции расположения стволов-распылителей через максимальную высоту «осредненной» линии траектории движения компонент ОВ/ГОС до, эпицентра возгорания, где на высоте  $t$ . Э находится объект пожаротушения.

**Выводы.** Для получения аналитических выражений, описывающих движение гелеобразующих огнетушащих составов при различных начальных условиях подачи двух компонент ГОС со среза стволов-распылителей, предложен подход к определения параметров их траекторий целенаправленных на очаг пожара.

Расчетным путем получены траектории распыленных струй в относительных координатах длин с использованием новой установки АУТГОС-М при давлении на спрыске соответственно 0,4; 0,6 и 0,8 МПа. Траектории струй верифицированы опытными данными для углов возвышения стволов-распылителей  $\alpha_0$ , с шагом изменения  $3^\circ$ .

Установлено, что реальные траектории струй с достаточной для практики пожаротушения степенью точности совпадают с полученными расчетными кривыми. Максимальные отклонения расчетных координат кривых траекторий отмечаются для углов возвышения стволов более  $30^\circ$ .

Проведенные сравнительные (теоретические и экспериментальные) исследования подтвердили обоснованность полученных тактико-технических решений дистанционной подачи компонентов бинарного потока ГОС для тушения твердых горючих материалов.

На основе результатов исследований подана заявка в Укрпатент на способ и устройство дистанционной подачи бинарных растворов ОВ/ГОС для тушения пожаров класса А.

---

Разработанные материалы приняты к внедрению на предприятии пожарно-технического обеспечения «СПЕЦПОЖТЕХНИКА».

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.

2. Киреев А.А. Определение показателя огнетушащей способности гелеобразующих огнетушащих составов при тушении модельного очага пожара 1А / А.А. Киреев, К.В. Жерноклёв, А.В. Савченко // Проблемы пожарной безопасности. – 2010 – Вип. 28. – С. 74 – 80. – Режим доступа: <http://nuczu.edu.ua/sciencearchive/Problems OffireSafety/vol28/29.pdf>.

3. Анализ процесса подачи и траектории потока струй огнетушащего вещества установкой АУТГОС / С.В. Росоха, Ю.Н. Сенчихин, А.А. Киреев, К.М. Остапов // Проблемы пожарной безопасности – Харків: НУЦЗУ, 2015. – Вип. 38. – С. 56–65. – Режим доступа: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3311>

4. Ольшанский В.П. Вопросы внешней баллистики огнетушащих веществ / В.П. Ольшанский, О.А. Дубовик. – Харьков. «Митець», 2005. – 236 с.

5. Абрамов Ю.А. Моделирование процессов в пожарных стволах / Ю.А. Абрамов, В.Е. Росоха, А.Е. Шаповалова. – Харьков: Фолио, 2001. – 195 с.

6. Куценко Л.М. Методи геометричного моделювання в задачах пожежної безпеки / Куценко Л.М., Бобов С.В., Росоха С.В. – Харків : АЦЗУ, 2004. – 175 с.

7. Рева Г.В. Анімаційне комп'ютерне моделювання деяких процесів в задачах пожежної безпеки / Г.В. Рева, Л.М. Куценко, С.В. Росоха // Проблемы пожарной безопасности. Юбилейный выпуск. – Харьков : АПБУ, 2003. – С.147–163.

8. Кузьо І. В. Теоретична механіка. Динаміка: [навч. посіб. для вищ. техн. навч. закл. III-IV рівнів акредитації]. Кн.1 / І. В. Кузьо, Т. М. Ванькович, Я.А. Зінько. – Львів: Растр-7, 2012. – 444 с.

9. Аладьев В. З. Программирование и разработка приложений в Maple: монография / В. З. Аладьев, В. К. Бойко, Е. А. Ровба. – Гродно : ГрГУ; Таллинн : Межд. акад. Ноосферы, Балт. отд., 2007. – 458 с.

10. Valluri S.R., Jeffrey D.J., Corless R.M. Some applications of the Lambert W function to physics / S.R. Valluri, D.J. Jeffrey, R.M. Corless // Canadian : J. Physics, 2000. – Vol 78. – p. 823–831.

11. Ольшанский В.П. Приближенные методы расчета гидравлических пожарных струй. / В.П. Ольшанский, В.М. Халыпа О.А. Дубовик. – Харьков: Митець, 2004. – 116 с.



12. Пат. 118440 Україна, МПК А 62 С 31/00, А 62 С 31/02. Установка дистанційного гасіння пожеж гелеутворюючими складами / Голендер В.А., Росоха С.В., Сенчихин Ю.Н., Сировой 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.

*Получено редколлегией 13.10.2017*

С.В. Росоха, В.В. Сировий, К.М. Остапов

#### **Дослідження траєкторії руху струменя гелеутворюючих складів**

Отримано аналітичні вирази, що дозволяють будувати траєкторії руху струменів гелеутворюючих складів (ГУС) для складання алгоритмів трасування їх руху, які необхідні при аналітичному рішенні задач, що забезпечують ефективне гасіння та захист об'єктів пожежогасіння з використанням мінімальної кількості вогнегасних речовин (ВР)

**Ключові слова:** гелеутворюючі складів (ГУС), вогнегасні речовини (ВР), траєкторії руху, кут, швидкість.

S. Rosokha, V. Syrovoy, K. Ostapov

#### **Tactics of supplying a flow of fire of fire-extinguishing arrangements of AUTGOS type**

Analytic expressions are obtained that allow building the trajectories of motion of unflooded jets of gel-forming compounds (GFC) to compile algorithms for tracing their movements that are necessary in the analytical solution of problems that ensure effective extinguishing and protection of extinguishing objects using the minimum amount of extinguishing agents

**Keywords:** gel-forming components (GFC), fire-extinguishing substances, installation, trajectory of motion, angle, speed.