

*С.В. Росоха, д.т.н., доцент, НУГЗУ,
Ю.Н. Сенчихин, к.т.н., профессор, НУГЗУ,
А.А. Киреев, д.т.н., доцент, НУГЗУ,
К.М. Остапов, адъюнкт, НУГЗУ*

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПОДАЧИ И ТРАЕКТОРИИ ПОТОКА СТРУЙ ОГNETУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА УСТАНОВКОЙ АУТГОС

Проведены экспериментальные исследования и определены некоторые параметры для имитационного моделирования гидродинамических потоков струй гелеобразующих составляющих огнетушащего вещества (ОВ), которое подается с помощью ранцевой установки АУТГОС на тушение пожара, а также защиту соседних конструкций или объектов.

Ключевые слова: гелеобразующие составляющие, огнетушащее вещество (ОВ), огнетушащие составы (ОС), установка, тушение пожара и защита, имитационное моделирование.

Постановка проблемы. Известно, что наиболее распространенным и практически всегда применяемым огнетушащим веществом является вода. Она доступна, относительно недорога и универсальна. Тем не менее, ее использование сопровождается в известной степени непроизводительными потерями (стекание с потолка по вертикальным и наклонным поверхностям), а также образованием между каплями воды и нагретой поверхностью объекта пожаротушения паровой преграды, что нежелательно. Как показывает анализ последних достижений и публикации по данному вопросу, снизить потери ОВ и материальные затраты в связи с этим можно при использовании гелеобразующих составляющих [1].

Анализ последних достижений и публикаций. Вместе с тем следует отметить, что работы, посвященные этой проблеме, в частности применение автономной установки тушения гелеобразующими составами (АУТГОС) [2], не пошли дальше тушения модельных пожаров с использованием одной установки, комбинируемой в двух модификациях. На наш взгляд причина здесь заключается в том, что, во-первых, для наработки достаточного объема достоверного экспериментального материала необходимо проведение соответственно немалого числа опытов, а значит – большого расхода компонентов гелеобразующих составляющих ОВ. Во-вторых, при ранее проведенных исследованиях тактико-техническим аспектам применения подобных установок уделялось недостаточно внимания, а эти аспекты взаимосвязаны и с вопросами достоверности теоретико-экспериментального анализа и с расходом реагентов при подаче двух потоков растворов-составляющих (гелеобразующих компонентов) на объекты пожаротушения.

Постановка задачи и ее решение. Задачей исследования является анализ и теоретико-экспериментальное исследование процесса подачи и траектории потока струй ОВ установкой АУТГОС. Для чего подачу на тушение пожара двух растворов-реагентов (двухвалентный водный раствор соли и многовалентный раствор металла) заменили подачей двух потоков воды, подкрашенной в разные цвета (имитационное моделирование).

После пристрелочной подаче распыленных струй воды имитирующих огнетушащие составы (ОС) – проверка готовности установки и мишени-экрана к испытаниям – осуществлялись серии экспериментов: первая – подача составляющих на горизонтальную мишень-экран (рис. 1, а); вторая – тоже, но на вертикально расположенную мишень-экран (рис. 1, б). Все опыты фиксировались на цифровые фото- и видеокамеры. Углы возвышения стволов-распылителей по отношению к базовому углу $\alpha = 45^{\circ}$ относительно горизонта, устанавливались идентично, соответственно идентично и цветовое подкрашивание распыленных струй. Для первого верхнего ствола-распылителя был установлен красный цвет; для второго нижнего – синий, угол между ними изменялся от 0° до 20° через $\Delta\alpha = 4^{\circ}$.



Рис. 1. Примеры испытаний: а) подача ОС навесным потоком двумя стволами-распылителями на горизонтально расположенную мишень-экран; б) тоже, – двумя стволами-распылителями на вертикальную мишень-экран: первый – красный; второй – синий

Всего в каждой серии было осуществлено по 24 опыта. Это позволило набрать минимально необходимый материал для его обработки по методу наименьших квадратов (МНК) и дальнейшего использования при имитационном математическом моделировании траекторий движения потоков ОС в виде интерполяционных кривых.

Данные о метеоусловиях: безветренно, температура $20-24^{\circ}\text{C}$; давление – $750-751$ мм рт. ст.; влажность воздуха – $72-75\%$. Очаги модельных пожаров не разжигались.

В табл.1 в качестве примера приведена часть данных после их обработки по МНК, а на фото рис. 2 – их реальная интерпретация в виде траектории исследуемых потоков ОС.

Табл. 1. Усредненные по методу МНК координаты (часть данных) к разделенной на три этапа траектории потоков ОС

Точка №		1	2	3	4	5	6	7	8
Поток №1 $\alpha = 30^\circ$	X_1 (м)	0,4	0,9	1,5	2,55	3,2	3,9	4,9	5,7
	Z_1 (м)	1,2	1,4	1,6	2	2,1	2	1,6	1,7
Поток № 2 $\alpha = 50^\circ$	X_2 (м)	0,4	0,9	1,5	2,55	3,2	3,9	4,9	5,7
	Z_2 (м)	1,45	1,85	2,3	2,8	2,9	2,7	2,2	1,25

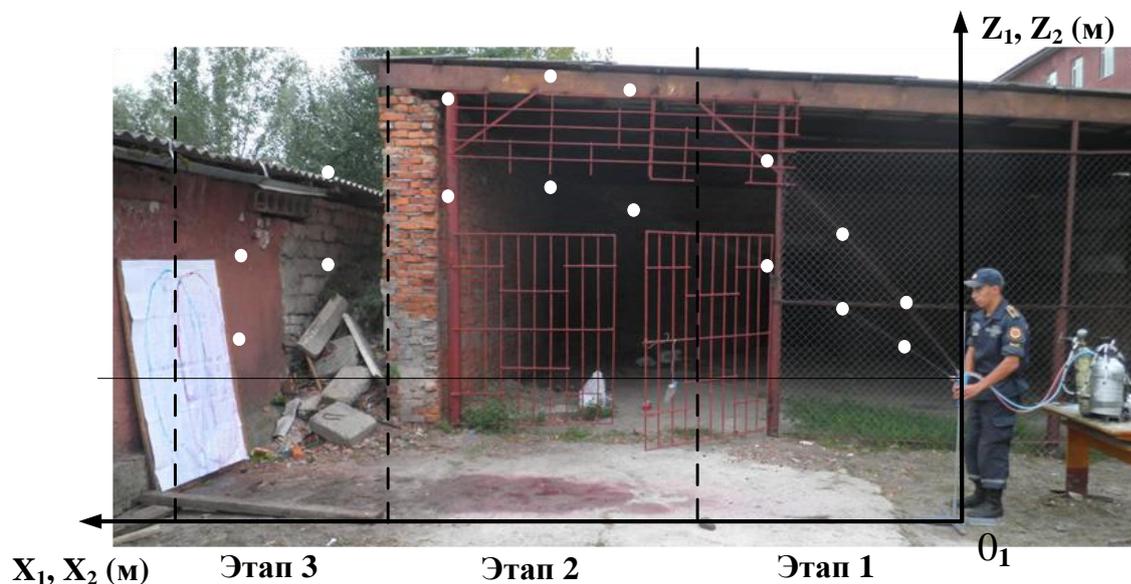


Рис. 2. Схематическая интерпретация проводимых экспериментов

Из рис. 2 видно, что процесс движения потоков составляющих ОБ логично разделить на три этапа, названные следующим образом: этап 1 – впрыск потока ОС в атмосферу; этап 2 – его свободное движение в воздухе; этап 3 – попадание на мишень-экран. Все три этапа могут быть отнесены к внешней баллистике гидродинамических потоков водных растворов. Дадим им феноменологическую характеристику.

На первом этапе осуществляется впрыск ОС и образование, так называемого «факела» или распыла потока жидкого раствора ОС (подкрашенная вода). Минимальный угол распыла в 4° для обоих стволов-распылителей и в той и другой серии опытов не изменялся.

Второй этап соответствует движению, когда скорость струи потока естественно изменяется в связи с преобразованиями кинетической и потенциальной энергии частиц потоков ОБ. Она (энергия) либо уменьшается до некоторого малого значения при «истощении» восходящего гидродинамического потока, и несколько возрастает в его ниспадающей части на этапе 3 при падении частиц. Причиной этому является влияние сил инерции и сил сопротивления движению, которое можно установить на основе экспериментального материала. Усредненная «размытая» траектория потока, как видно из фото- и видео материалов, приближается к форме кривой второго порядка (парабола). Соответственно задача анализа движения

составляющих ОВ на втором этапе вполне разрешима, в частности посредством использования интерполяционных полиномов Лагранжа [3].

Окончание третьего этапа характеризуется тем, что наступает момент, когда поступательные скорости частиц (капель) гидродинамического потока вдоль оси X становятся равными нулю. Это происходит естественно при полном «истощении» горизонтальной составляющей кинетической энергии системы движущихся капель. Тогда их движение осуществляется либо по траектории свободного падения на горизонтально расположенную мишень-экран; либо прекращается, когда гидродинамический поток встречает на своем пути вертикально расположенную мишень-экран. На фото (рис. 2) схематично изображен один из возможных вариантов движение двух потоков распыленных струй ОС.

Решение задачи интерполированием. Как уже отмечалось, основной задачей данного экспериментального исследования являлось изучение особенностей движения гидродинамических потоков, а также обобщенное представление траекторий этого движения, например, хорошо зарекомендовавшим себя методом интерполяционных полиномов Лагранжа. В связи с этим заметим, что на точность результатов, получаемых при обработке любых экспериментальных данных, влияет выбор аппроксимирующих составляющих [4]. Поэтому, развивая идею применения метода индукции к рассматриваемой задаче, будем считать, что искомая траектория отвечает зависимостям координат от времени третьей степени, заданным параметрически. То есть аппроксимирующий траекторию потока ОС осредненный полином будет иметь вид:

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

где α – угол наклона стволов-распылителей к горизонту.

В функциях $X(t)$ и $Z(t)$ отсутствуют слагаемые нулевой степени t , т.к. начало координат совмещено с точкой, в которой находятся стволы-распылители. С другой стороны, регрессионный анализ [4] полученного экспериментального материала позволяет сделать некоторые упрощения в формулах (1). Покажем это.

Для определенности величину X/t будем называть эффективной скоростью потока. Тогда на основании данных табл. 1 нетрудно вычислить среднее значение величины его эффективной скорости, или иначе – математическое ожидание

$$(X/t)^* = 1/N \sum (X_i/t_i). \quad (2)$$

Здесь N – количество точек, полученных в результате эксперимента (одинаковое для каждой серии опытов); X_i – абсцисса соответ-

вующей i -ой точки; t_i – момент времени для этой точки.

Среднеквадратичное отклонение величины $(X/t)^*$ от ее математического ожидания определяется известным соотношением:

$$\langle (X/t) \rangle = 1/N \sum \{ (X/t)^* - X_i/t_i \}^2. \quad (3)$$

Очевидно, что, если среднеквадратичное отклонение (3) будет меньше, чем погрешность измерений, то величину X/t можно считать постоянной. Следовательно, второе уравнение системы (1) будет представлять собой линейную функцию, причем коэффициент пропорциональности между координатой X и переменной t будет зависеть от того же аргумента – угла α . В табл. 2 дана оценка точности результатов обработки экспериментальных данных.

Табл. 2. Среднеквадратичные отклонения и погрешности измерений

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
$\langle (X/t) \rangle^*$ (м/с)	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Погрешность измерений (м/с)	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05

Примечание: при обработке данных использовались безразмерные величины для расстояний и времени, причем расстояние нормировалось по всей длине пути движения ОС к мишени-экрану, а время – по времени преодоления этого пути.

Максимальная погрешность измерений координат точек траектории при снятии их с экрана монитора или же при экспозиции на фотокамеру обусловлена максимальным отклонением угла зрения от перпендикуляра к плоскости проектирования и колеблется в пределах 3-5% (0,03-0,05 м/с).

Из табл. 2 видно, что погрешность измерений в эксперименте всегда превышает среднеквадратичное отклонение, поэтому можно считать доказанным, что $X(t)$ можно представить как линейную функцию времени.

С учетом доказанного, нетрудно в явном виде записать уравнение для траектории $Z = Z(X)$. Действительно, исключая в (1) параметр «время», имеем кубическую параболу.

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

В формуле (4) оставлены те же обозначения коэффициентов, что и в (1), хотя их значения формально отличаются.

Для вычисления коэффициентов в формуле (4) также воспользуемся результатами экспериментов и применим математический аппарат интерполяционных полиномов Лагранжа по аналогии с [5].

Упомянутые коэффициенты для n -го опыта определим следующим образом. Введем в рассмотрение функцию

$$F_n(A_{2n}, B_{2n}, C_{2n}) = \sum (Z_i - Z(X_i)). \quad (5)$$

Эта функция является полиномом второй степени относительно коэффициентов A_{2n}, B_{2n}, C_{2n} , поэтому значение ее минимума нетрудно вычислить аналитически (применяемый аппарат, по сути, совпадает с МНК [6]).

Минимум функции F_n определяется системой линейных уравнений относительно A_{2n}, B_{2n}, C_{2n} , полученных посредством вычисления значений первых производных от (5) по каждому из коэффициентов. Искомая система уравнений имеет вид:

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

Теперь, имея значения коэффициентов для каждого опыта, используем интерполяционные полиномы Лагранжа.

Переменной, по которой производится аппроксимация, является угол наклона стволов-распылителей (α) к горизонту.

Обозначим через

$$L_1(\alpha), L_2(\alpha), L_3(\alpha) \quad (7)$$

полиномы Лагранжа, совпадающие со значениями коэффициентов A_{2n}, B_{2n}, C_{2n} для n -го опыта. Тогда, воспользовавшись функциями (7), определим значения коэффициентов для произвольного угла наклона стволов-распылителей к горизонту

$$A_{2n} = L_1(\alpha), B_{2n} = L_2(\alpha), C_{2n} = L_3(\alpha). \quad (8)$$

Более точный анализ рассматриваемого процесса может быть выполнен, если считать первую составляющую функцию системы (1) не линейной, а квадратичной, т.е.:

$$\begin{aligned} X(t) &= \varepsilon(\alpha)t^2 + C_1(\alpha)t; \\ Z(t) &= A_2(\alpha)t^3 + B_2(\alpha)t^2 + C_2(\alpha)t. \end{aligned} \quad (9)$$

где ε – наперед заданная малая погрешность аппроксимаций (рис. 3).

Если нет необходимости задаваться заранее погрешностью результатов проведения экспериментов ε , то и в этом случае (в первом приближении) можно показать, что соотношение (7) справедливо для

данной формы траектории потока в том смысле, что она может быть описана, как полином вида $Z = Z(X)$. Разница состоит в том, что степень полинома будет выше.

Феноменологический анализ траекторий. Ранее было показано, что траектория движения ОС может быть представлена полиномом третьей степени, относительно переменной X . Там же было введено в рассмотрение понятия о трех этапах движения потока.

Докажем, что, задавшись точностью представления траектории ε , ее можно аппроксимировать при любых $-90^\circ \leq \alpha \leq +90^\circ$ в виде участков прямых (этап 1) и участка параболы (этап 2). На поясняющем рис. 3 приведена одна из таких траекторий. Здесь же указан наперед заданный параметр ε – погрешность или рассеяние, который дает основание численно оценить пределы условного деления траектории на этапы.

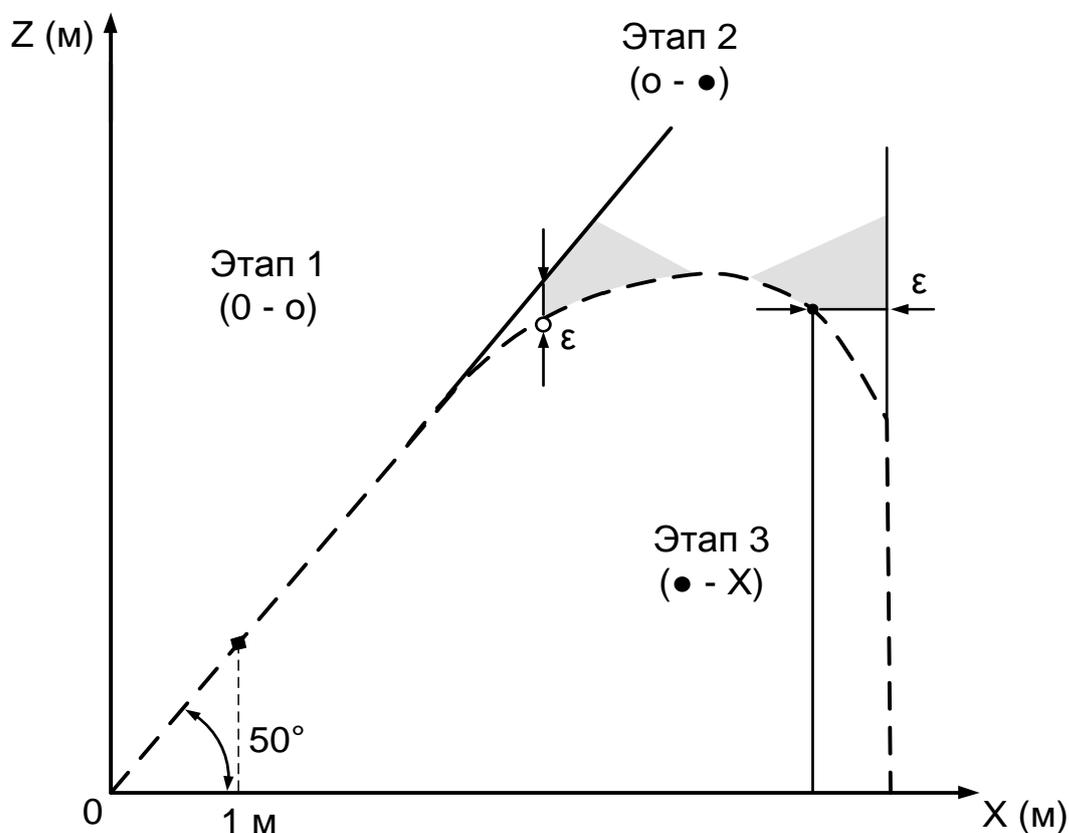


Рис. 3. К делению траектории движения потока ОС на этапы

Введем в рассмотрение следующие критерии к определению границ этапов движения потока ОС. Для линейных аппроксимаций:

- первый этап соответствует ситуации, когда отклонение между полиномом $Z(X)$ и прямой $Z = X \operatorname{tg} \alpha$ не превышает наперед заданной величины ε . В частном случае в качестве ε можно выбрать один из геометрических размеров (отклонение от центра мишени-экрана).

- третий этап соответствует ситуации, когда $L_{\max} - X \leq \varepsilon = 0$.

Когда не выполняется ни одно из двух указанных условий, движение происходит в границах второго и начала третьего этапов.

Обозначим через \underline{S} длину всей траектории, а через $Z(X)$ – длину траектории для текущего момента. Тогда величина безразмерной длины всей траектории будет лежать в пределах $0 \leq S_t/\underline{S} \leq 1$.

В табл. 3 даны результаты расчетов для одной из серий опытов, где в столбцах, соответствующих разным этапам, приведены значения безразмерной длины траектории $0 \leq S_t/\underline{S} \leq 1$.

Табл. 3. Этапы движения потока

№ опыта	Этап 1	Этап 2	Этап 3
1	0 – 4	4 – 8,8	8,8 – 12
2	0 – 4,1	4,1 – 8,9	8,9 – 12,1
3	0 – 4	4,1 – 8,9	8,9 – 12,1
4	0 – 4	4 – 8,7	8,7 – 11,9
5	0 – 3,9	3,9 – 9	8,6 – 12,2
6	0 – 4	4 – 8,9	8,9 – 11,8
7	0 – 4,1	4,1 – 8,7	9 – 12,1
8	0 – 4,2	4,2 – 8,8	8,8 – 12,2

Из анализа данных табл. 3 можно сделать заключение. Если рассматривать номер этапа траектории как функцию безразмерной величины S_t/\underline{S} , то, во-первых, деление траектории на этапы практически не зависит от угла наклона стволов-распылителей и, по существу, определяется только рабочими параметрами установки. Во-вторых, определенная часть траектории на этапе 1 априори близка к прямой линии. Именно здесь устанавливается так называемый корневой угол распыла потока ОС [7].

Выводы. 1. В рамках феноменологического подхода предложена методика имитационных экспериментальных исследований гидродинамики составляющих потока ОС.

2. Проведены эксперименты, которые позволили набрать статистический материал для разработки математических моделей исследуемых процессов.

3. Проанализированы результаты опытных данных. На основании этого анализа определены требуемые параметры и траектории движения составляющих потока ОС.

4. Теоретически обосновано деление траектории движения потока ОС на три фазы, что позволило использовать приближенные модели с применением полиномов Лагранжа. При этом поэтапное деление траектории практически не зависит от угла наклона стволов-распылителей и, по существу, определяется только рабочими параметрами установки.

5. Доказано, что сама траектория движения составляющих гидродинамического потока ОС может быть представлена в виде полинома третьей степени и на современном уровне определяться с помощью баллистического калькулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кіреєв О.О. Використання гелеутворюючих систем для попередження, локалізації та ліквідації пожеж та загорянь / О.О. Кіреєв, С.Д. Муравйов, О.В.Бабенко //Хранение и переработка зерна. – 2003. – №. 12 (54). – С. 52-54.

2. Бабенко О.В. Використання явища гелеутворення для підвищення ефективності рідинних засобів пожежогасіння: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 21.06.02 «Пожежна безпека» / О.В. Бабенко. – Харків, 2005. – 20 с.

3. Математическая энциклопедия, т. 1, 2 / [Под редакцией Виноградова И.М.]. – М.: «Советская энциклопедия». – 1979.

4. Конченнова Н.В. Вычислительная математика в примерах и задачах / Н.В. Конченнова, И.А. Марон. – М.: Наука, 1972. – 126 с.

5. Сенчихін Ю.М. Нетрадиційний пожежний висотний рятувальник та його тактичне забезпечення: автореф. дис. на здобуття наукового ступеню канд. техн. наук: спец. 05.26.02 «Пожежна безпека» / Ю.М. Сенчихін. – Харків, 1997. – 20 с.

6. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / [Под ред. Корольока В.С.]. – К.: Наукова думка, 1978. – 582 с.

7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.

С.В. Росоха, Ю.М. Сенчихін, О.О. Кіреєв, К.М. Остапов

Визначення параметрів подачі і траєкторії потоку струменів вогнегасних складових установкою АУТГОС

Проведено експериментальні дослідження та визначено деякі параметри для імітаційного моделювання гідродинамічних потоків струменів гелеобразних складових вогнегасних складів, які подаються з допомогою ранцевої установки АУТГОС на об'єкт пожежогасіння або захисту.

Ключові слова: гелеобразні складові, вогнегасний склад (ОС), установка, гасіння пожежі та захисту, імітаційне моделювання.

S.V. Rosokha, Y.N. Senchykhin, A.A. Kireev, K.M. Ostapov

Determination of parameters of supply and trajectory of streams of fire extinguishing substance by AUTGOS devices

Experimental investigations are carried out and certain parameters for simulation of hydrodynamic streams of gel-forming components of fire extinguishing substance which is supplied with the help of the backpack devices AUTGOS on fire extinguishing and adjacent constructions or objects protection are determined.

Keywords: gel-forming components, fire extinguishing substance, device, fire extinguishing, protection, simulation.