

*С.А. Виноградов, к.т.н., ст. преподаватель, НУГЗУ,  
И.Н. Грицына, к.т.н., доцент, зам. нач. каф., НУГЗУ,  
Р.В. Пономаренко, к.т.н., ст. преподаватель, НУГЗУ*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ ВОДЯНОГО ОГНЕТУШАЩЕГО ВЕЩЕСТВА**

(представлено д-ром техн. наук Лариным А.Н.)

Описана схема проведения экспериментальных исследований изменения скорости полета высокоскоростной струи водяного огнетушащего вещества. Проведено измерение скорости головы высокоскоростной струи на разных расстояниях от сопла водяной системы пожаротушения импульсного действия. Получена зависимость скорости струи водяного огнетушащего вещества от массы порохового заряда и расстояния до сопла системы пожаротушения и построена поверхность ее отклика.

**Ключевые слова:** водяное огнетушащее вещество, водяная система пожаротушения импульсного действия, планирование эксперимента, регрессионная зависимость.

**Постановка проблемы.** Процесс распространения высокоскоростной струи водяного огнетушащего вещества (ВОВ) скоротечен. Для изучения траектории или профиля струи необходимо высокоскоростное оборудование. Исследования таких струй ранее проводились в непосредственной близости от устройства подачи. Зависимости скорости истечения от расстояния на длинном участке позволят проводить оценку необходимой дальности подачи высокоскоростной струи ВОВ в зависимости от требуемого энергетического воздействия.

**Анализ последних исследований и публикаций** показал, что в работах Атанова Г.А. [1, 2], Nomi M. [3] и Семко А.Н. [4] установлено, что скорость головы высокоскоростной струи сначала возрастает со временем, а затем падает за счет торможения о воздух. Однако конкретные численные данные об изменении скорости струи импульсного водомета в процессе распространения отсутствуют.

Для измерения скорости потока используют кинематические, динамические и физические методы [5]. Для измерения высокоскоростных процессов рекомендуется использовать кинематические методы, когда в среде потока каким-либо образом отмечается определенный, обычно малый объем, и движение этого объема–метки прослеживается при помощи соответствующих приборов.

**Постановка задачи и ее решение.** На скорость полета струи водяного огнетушащего вещества могут влиять следующие факторы: начальная скорость истечения  $U_0$ , которая при прочих равных услови-

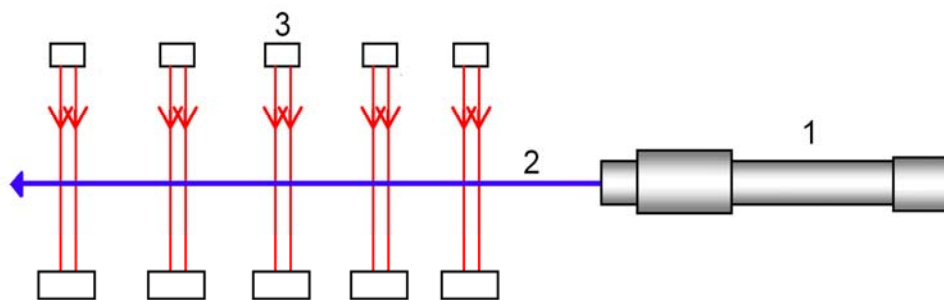
ях определяется массой порохового заряда  $m_{p0}$ , расстояние  $l$  до сопла водяной системы пожаротушения импульсного действия (ВСПИД), скорость и направление ветра  $\vec{W}$ , масса  $m_w$  и плотность  $\rho$  водяного огнетушащего вещества

$$U = f(m_{p0}, l, \vec{W}, m_w, \rho) \quad (1)$$

Однако скоростью и направлением движения ветра  $\vec{W}$  при больших количествах огнетушащей жидкости можно пренебречь, а физические свойства ВОВ известны и принимаются неизменными. Поэтому целью эксперимента являлось получение зависимости

$$U = f(m_{p0}, l). \quad (2)$$

Для определения зависимости (2) проведен эксперимент, схема которого представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема проведения эксперимента: 1 – экспериментальный образец водяной системы пожаротушения импульсного действия; 2 – высокоскоростная струя ВОВ; 3 – многоканальная система измерения скорости головной части струи ВОВ**

Производился выстрел из экспериментального образца ВСПИД 1 высокоскоростной струей ВОВ 2. С помощью многоканальной системы измерения скорости головной части струи ВОВ 3, датчики которой расставлены через каждые 2 м на дистанции 10 м, измерялась скорость полета головной части струи ВОВ. Параметры газового факела: диаметр горелки  $d_m=15$  мм, расход газа  $Q_0=5,4$  л/с, скорость истечения газа из модели  $V=30,6$  м/с, высота факела  $H_f \approx 2,5$  м. Параметры ВСПИД: диаметр сопла  $d_c=15$  мм, масса пороха  $m_p=5 \div 15$  г, масса воды в системе  $m_w=450$  г.

Изменение скорости головы струи измерялась с помощью многоканальной лазерной системы бесконтактного измерения скорости [6], которая позволяет измерять скорость в интервале 50 – 3000 м/с. Измерители расположены через каждые 2 метра на участке 10 м. Также проводилась видеосъемка со скоростью 5 000 к/сек с помощью камеры Photron Fastcam BC-2 HD.

Для обработки результатов экспериментов и построения математических моделей использовали математический метод планирования эксперимента. Поскольку в эксперименте исследовали влияние только двух факторов, то был поставлен эксперимент типа  $2^2$  [7]. Для построения полинома второго порядка использовали метод, предложенный Г.Э.П. Боксом и К.Б. Вильсоном [8]. В работе использовали ротатабельный план второго порядка, так как они, в отличие от ортогонального, позволяет предусмотреть значение функции отклика с дисперсией, одинаковой на равных расстояниях от центра плана [7]. Для этого дополнительно проводили эксперименты в центре плана (на нулевом уровне) и на расстоянии  $d$  от центра. В этом случае звездное плечо  $d$  выбирали из условия инвариантности плана к обращению. В условиях проведения двухфакторного эксперимента для построения центрального композиционного ротатабельного плана брали 4 звездные точки и 5 точек на нулевом уровне. Величина плеча  $d$  для звездных точек равняется 1,414.

Значение массы порохового заряда варьировалось от 5 г – наименьшее расчетное количества пороха для экспериментального образца ВСПИД, до массы, при которой обеспечивается, по теоретическим предположениям, максимальная дальность полета струи – 15 г. Нижний уровень для расстояния до сопла составлял 2 м, что обусловлено необходимостью проследить изменение скорости возле сопла, а верхний уровень составлял 10 м – теоретически максимальное расстояние для изучения. С учётом звёздных точек уровни варьирования факторов имеют вид табл. 1.

**Табл. 1. Уровни варьирования двух факторов исследования изменения скорости полета высокоскоростной струи ВОВ**

Уровень и интервал изменения факторов	Масса порохового заряда $m_{p0}$ , г	Расстояние до сопла $l$ , м
Нулевой уровень, $x_i=0$	10	6
Интервал изменения, $\delta_i$	5	4
Верхний уровень, $x_i=1$	15	10
Нижний уровень, $x_i=-1$	5	2
Кодовое обозначение	$X_1$	$X_2$

Результаты эксперимента обрабатывались численно с помощью методов статистики [7, 9]. Составлен двухфакторный ротатабельный план второго порядка, матрица которого представлена в табл. 2.

Расчет коэффициентов регрессии по результатам экспериментов и оценка их значимости по критерию Стьюдента проводили по методике, приведенной в [7].

В результате получено уравнение регрессии

$$U=18,4 \cdot m_{p0}-6,45 \cdot l^2+70,8 \cdot l-0,96 \cdot m_{p0} \cdot l-4,1096 \quad (3)$$

**Табл. 2. Условия и результаты опытов по исследованию изменения скорости полета водяной струи**

Опыт	Кодированное значение массы порохового заряда $m_{p0}$	Кодированное значение расстояния до сопла $l$	Измеренная скорость $U$ , м/с
Планирование типа $2^2$	-1	-1	226
	+1	-1	409
	-1	+1	89
	+1	+1	134
Звездные точки	-1,414	0	182
	+1,414	0	341
	0	-1,414	120
	0	+1,414	72
Нулевые точки	0	0	327
	0	0	322
	0	0	325
	0	0	324
	0	0	327

Получив полиномиальную модель, проводили статистическую оценку. Проверяли воспроизводимость процесса по критерию Кохрена по формуле

$$G = \frac{s_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n s_u^2} \leq G_{(0,05; f_n; f_u)}, \quad (4)$$

где  $s_u^2 = \frac{\sum_{p=1}^m (y_{up} - y_u^-)^2}{m-1}$  – дисперсия, характеризующая рассеяние результатов исследований на  $u$ -м уровне факторов;  $p=1, 2, \dots, m$  – число параллельных опытов;  $s_{u \max}^2$  – наибольшая из дисперсий в строчках плана;  $G_{(0,05; f_n; f_u)}$  – табличное значение критерия Кохрена при 5% – м уровне значимости;  $f_n = n$  – число независимых оценок дисперсии;  $f_u = m-1$  – число степеней свободы каждой оценки.

$$G = 0,652 < G_{(0,05; f_n; f_u)} = 0,807. \quad (5)$$

Адекватность модели проверяется по критерию Фишера:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_0^2} \leq F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}, \quad (6)$$

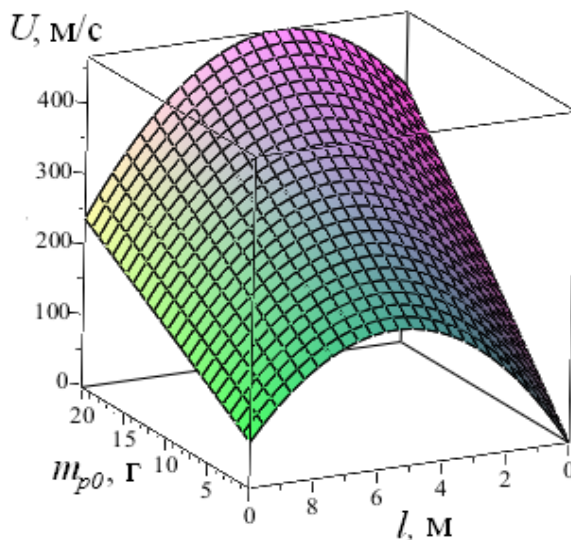
где  $s_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^m (y_u^- - y_u)^2}{n-k-1}$ ;  $y_u$  – расчетное значение отклика в  $u$ -м опыте;

$F_{(0,05; f_{ad}; f_y)}$  – критерий Фишера при 5% – м уровне значимости;  $f_{ad}$  –

число степеней свободы дисперсии адекватности;  $f_y$  – число степеней свободы дисперсии воспроизведения.

$$F = 2,7862 < F_{(0,05; f_{ad}; f_y)} = 3,9381. \quad (7)$$

Таким образом, проверка адекватности модели и воспроизводимости процесса дала положительный результат. Графическое изображение зависимости скорости струи ВОВ от массы порохового заряда и расстояния до сопла представлено на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость скорости струи ВОВ от массы порохового заряда и расстояния до сопла

Анализ рис. 2 показывает, что истечение высокоскоростной струи ВОВ начинается со скоростью, соответствующей давлению за первой волной сжатия. Вторая зона струи, соответствующая следующей волне сжатия, имеет большую скорость и проходит сквозь первую зону, разбивая ее и т.д. Этот процесс разгона происходит до тех пор, пока в голове струи не установится максимальная скорость. Для всех опытов этот участок лежит в пределах (4÷5) м. После этого происходит постепенное уменьшение скорости за счет торможения о воздух.

**Выводы.** Полученная регрессионная зависимость (3) позволяет определить, какой должен быть заряд пороха, если известно расстояние от очага пожара до сопла экспериментального образца ВСПИД. Предложенный подход можно использовать для определения изменения скорости распространения высокоскоростной струи ВОВ для систем пожаротушения импульсного действия увеличенных размеров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород / Г.А. Атанов. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.

2. Атанов Г.А. Об особенностях движения струи импульсного водомета / Г.А. Атанов, Б.И. Бишевли // Газовая динамика: сб. научн. тр. – Томск: Изд-во ТГУ. - 1987. – С. 3-8. .

3. Proc. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology. - Chicago (Illinois), 1976. – Paper B4. – P. 47-58.

4. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / Александр Николаевич Семко. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с.

5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1976. – 878 с.

6. Разработка системы измерения скорости высокоскоростной струи огнетушащей жидкости / [Виноградов С.А., Грицына И.Н., Семко А.Н., Украинский Ю.Д.] // XXIV международная научно-практическая конференция по проблемам пожарной безопасности, посвященная 75-летию создания института: тезисы докладов. Ч. 2. – М.: ВНИИПО, 2012. – С. 224-226.

7. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье – К.: Техника, 1975, – 168 с.

8. Vox G.E.V. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions / G.E.O. Vox, K.V. Wilson // Journal of the Royal Statistical Society. – Series B. – 1951, 13, №1. – P. 1-45.

9. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1976, – 254 с.

nczu.edu.ua

С.А. Виноградов, І.М. Грицина, Р.В. Пономаренко

#### **Дослідження зміни швидкості польоту високошвидкісного струменя водної вогнегасної речовини**

Описано схему проведення експериментальних досліджень зміни швидкості польоту високошвидкісного струменя водяної вогнегасної речовини. Проведено вимірювання швидкості голови високошвидкісного струменя на різних відстанях від сопла водяної системи пожежогасіння імпульсної дії. Одержано залежність швидкості струменя водяної вогнегасної речовини від маси порохового заряду і відстані до сопла системи пожежогасіння і побудована поверхня її відгуку.

**Ключові слова:** водяна вогнегасна речовина, водяна система пожежогасіння імпульсної дії, планування експерименту, регресійна залежність.

S.A. Vinogradov, I.N. Gritsyna, R.V. Ponomarenko

#### **Research changes of speed high-speed jets of water extinguishing agent**

The scheme of the experimental studies of changes in flight speed of high-speed jet of water extinguishing agent. The measurement of the velocity of the head high-speed jet at different distances from the nozzle of a water sprinkler system the impulse action. The dependence of the velocity of the jet of water extinguishing agent by weight of the powder charge and the distance to the nozzle sprinkler system and constructed surface of its response.

**Keywords:** water extinguishing agent, impulse action water fire-fighting system, design of experiments, regression dependence.