

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

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ СТРУИ УСТАНОВКИ ИМПУЛЬСНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ГАЗОВЫХ ФОНТАНОВ**

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

Проведено имитационное моделирование изменения скорости истечения струи установки импульсного действия для тушения газовых фонтанов в зависимости от ее основных геометрических параметров и массы порохового заряда. Получена имитационная модель. Определено влияние радиуса и длины ствола, радиуса сопла и массы порохового заряда на изменение скорости истечения.

**Ключевые слова:** установка импульсного действия, скорость истечения, струя, имитационная модель, поверхность отклика.

**Постановка проблемы.** В [1] обоснована возможность применения установок импульсного действия (УИД) для тушения газовых фонтанов. Это позволит увеличить скорость истечения импульсной струи жидкости до  $(1000 \div 1500)$  м/с, что приведет к повышению дальности эффективного тушения.

На скорость истечения высокоскоростной струи УИД оказывают влияние такие параметры, как радиус и длина ствола, радиус сопла и масса порохового заряда. Поэтому знание закономерностей изменения скорости истечения струи УИД от соотношения геометрических размеров ее элементов является основой создания оптимальной УИД для тушения газовых фонтанов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [2] проведена оценка влияния массы порохового заряда и радиуса сопла УИД на изменение скорости истечения высокоскоростной струи. Однако авторами не определено влияние параметров ствола на скорость истечения высокоскоростной струи УИД и суммарный вес того либо иного параметра на искомый параметр.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является определения влияния геометрических параметров УИД и массы порохового заряда на скорость истечения высокоскоростной струи для получения максимально возможной скорости на выходе из устройства.

Анализ изменения скорости истечения струи УИД [2] показал, что выстрел УИД скоротечен. Скорость струи изменяется с большой интенсивностью. Поэтому в качестве функции отклика при проведении вычислительного эксперимента выбираем максимальную ско-

рость истечения струи  $u_{\max}$ . Анализ переменных в математических моделях внутренней баллистики [2] показал, что выражение функции отклика влияние параметров УИД на скорость истечения струи можно представить в виде

$$u_{\max} = f(m_{p0}, L_c, r_c, r_s), \quad (1)$$

где  $m_{p0}$  - масса порохового заряда;  $L_c$  - длина ствола УИД (определяет массу заряда огнетушащей жидкости);  $r_c$  - радиус ствола УИД;  $r_s$  - радиус сопла УИД.

Пусть модель (1) имеет вид [3]

$$\begin{aligned} u_{\max} = & m_0 + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4 + \\ & + m_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + m_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + m_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + \\ & + m_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + m_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + m_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + \\ & + m'_1 \cdot x_1^2 + m'_2 \cdot x_2^2 + m'_3 \cdot x_3^2 + m'_4 \cdot x_4^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $m_0, m_i, m_{ij}, m'_i, m'_j, m'_c, m'_s$  - коэффициенты регрессии, которые будут получены в результате численного эксперимента;  $x_i, i = \overline{1,4}$  - переменные, связанные с геометрическими переменными  $m_{p0}, L_c, r_c, r_s$  следующим образом

$$x_1 = \frac{m_{p0} - m_{p0(0)}}{\Delta m_{p0}}; \quad x_2 = \frac{L_c - L_{c(0)}}{\Delta L_c}; \quad x_3 = \frac{r_c - r_{c(0)}}{\Delta r_c}; \quad x_4 = \frac{r_s - r_{s(0)}}{\Delta r_s}, \quad (3)$$

где  $m_{p0(0)}, L_{c(0)}, r_{c(0)}, r_{s(0)}$  - значения факторов на нулевом уровне, представленные в табл. 1;  $\Delta m_{p0}, \Delta L_c, \Delta r_c, \Delta r_s$  - интервалы варьирования факторов, указанные в той же таблице.

**Таблица 1 - Уровни варьирования факторов**

Факторы		Кодовое обозначение	Нулевой уровень $x_i = 0$	Интервал варьирования	Уровень $x_i = 1$	Уровень $x_i = -1$
Масса порохового заряда	$m_{p0}, \text{ г}$	$x_1$	20	10	30	10
Длина ствола УИД	$L_c, \text{ мм}$	$x_2$	380	70	450	310
Радиус ствола УИД	$r_c, \text{ мм}$	$x_3$	16	4	20	12
Радиус сопла УИД	$r_s, \text{ мм}$	$x_4$	7,5	2,5	10	5

План-матрица эксперимента представлена в табл. 2. Приведенный план позволяет проводить независимую оценку коэффициентов уравнения регрессии. Расчеты проводились с помощью компьютерной программы WaterCannonSimulator [2].

Таблица 2 - Центральный композиционный план полного факторного эксперимента типа  $2^4$  и результаты опытов

№ п/п	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_1 x_4$	$x_2 x_3$	$x_2 x_4$	$x_3 x_4$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_4^2$	$u_{\max},$ М/с
1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	345
2	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	832
3	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	337
4	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	933
5	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	463
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1038
7	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	484
8	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1103
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	344
10	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	292
11	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	140
12	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	321
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	148
14	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	372
15	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	154
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	395

Обработка экспериментальных данных производилась в пакете программ STATISTICA 6.

В результате расчетов получены следующие значения коэффициентов регрессии

$$\begin{aligned}
 m_0 &= 366,5; m_1 = 357,7; m_2 = 8,6; \\
 m_3 &= 78,7; m_4 = -396,3; m_{12} = 50,4; \\
 m_{13} &= 55,9; m_{14} = -210,4; m_{23} = 24,6; \\
 m_{24} &= -40,6; m_{34} = -83,6; m'_1 = 85,9; \\
 m'_2 &= 87,9; m'_3 = 70,9; m'_4 = -18.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Оценка статистической значимости коэффициентов регрессии выполнялась с помощью критерия Стьюдента [3], которая показала, что не значимыми являются следующие коэффициенты регрессии:  $m_2, m_{12}, m_{23}, m_{24}, m'_4$ . Тогда модель (1) в кодированных переменных целесообразно представить в виде

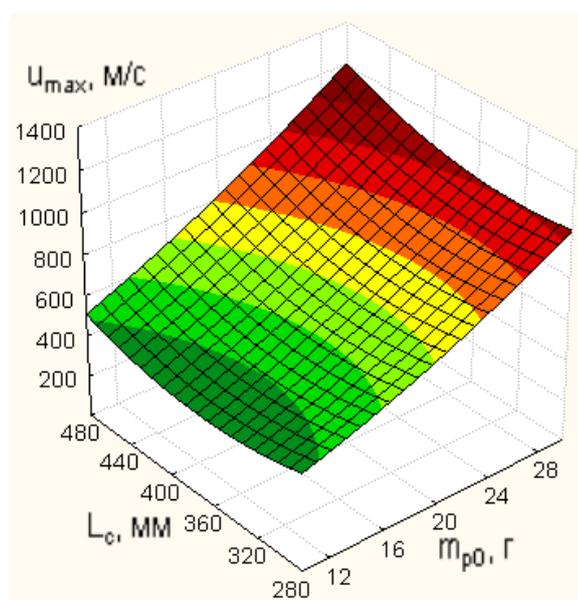
$$u_{\max} = 366,5 + 357,7x_1 + 78,7x_3 - 396,3x_4 + 55,9x_1x_3 - 210,4x_1x_4 - 83,6x_3x_4 + 85,9x_1^2 + 87,9x_2^2 + 70,9x_3^2. \quad (5)$$

Адекватность модели (5) проверялась с помощью критерия Фишера [3]. Проверка показала, что модель (5) является адекватной в соответствии с критерием Фишера.

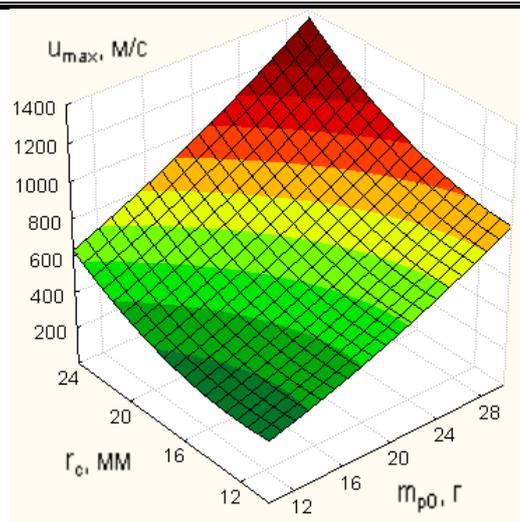
В соответствии с выражением (5) получены уравнения регрессии в натуральных переменных и построены зависимости максимальной скорости истечения струи УИД для диапазона параметров, приведенных в табл. 1 (рис. 1-4).

Анализ поверхности отклика зависимости максимальной скорости истечения струи УИД от длины ствола и массы порохового заряда на рис. 1 показал, что длина ствола практически не влияет на скорость истечения. Влияние массы порохового заряда носит линейный характер. При увеличении массы порохового заряда в 3 раза (с 10 до 30 г) скорость истечения увеличивается в 2 раза.

Полученная поверхность отклика зависимости максимальной скорости истечения струи УИД от радиуса ствола и массы порохового заряда показывает (рис. 2), что при увеличении массы порохового заряда и радиуса ствола максимальная скорость истечения тоже увеличивается. При этом при небольших зарядах пороха (10÷15 г) увеличение радиуса ствола практически не приводит к увеличению скорости истечения, в то время как для зарядов пороха (20÷30) г увеличение радиуса ствола в 2,5 раза приводит к возрастанию максимальной скорости истечения более, чем в 2 раза

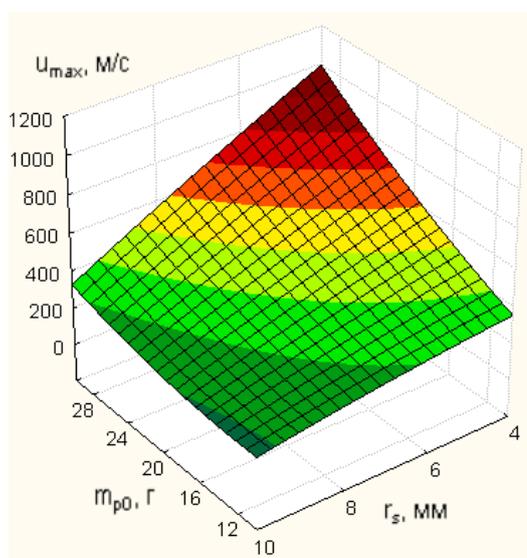


**Рис. 1 – Поверхность отклика зависимости максимальной скорости истечения струи ( $u_{\max}$ ) от длины ствола ( $L_c$ ) и массы порохового заряда ( $m_{po}$ ) при радиусе ствола  $r_c=20$  мм и радиусе сопла  $r_s=5$  мм.**



**Рис. 2 – Поверхность отклика зависимости максимальной скорости истечения струи ( $u_{\max}$ ) от радиуса ствола ( $r_c$ ) и массы порохового заряда ( $m_{p0}$ ) при длине ствола  $L_c=450$  мм и радиусе сопла  $r_s=5$  мм.**

На рис. 3 представлена поверхность отклика изменения максимальной скорости истечения струи от радиуса сопла и массы порохового заряда. Отметим, что скорость увеличивается при увеличении массы порохового заряда и уменьшении радиуса сопла. При этом увеличение массы пороха в 3 раза в случае малой конусности ( $\frac{r_c}{r_s}=1,2\div 1,5$ ) приводит к незначительному (10÷15 %) повышению скорости. При  $\frac{r_c}{r_s} \geq 2,5$  наблюдается существенное (100÷200 %) изменение максимальной скорости истечения при увеличении массы порохового заряда в 3 раза.



**Рис. 3 – Поверхность отклика зависимости максимальной скорости истечения струи ( $u_{\max}$ ) от радиуса сопла ( $r_s$ ) и массы порохового заряда ( $m_{p0}$ ) при длине ствола  $L_c=450$  мм и радиусе ствола  $r_c=12$  мм.**

В ходе анализа установлено, что на максимальную скорость истечения струи УИД оказывают малое влияние длина и радиуса ствола (рис. 4). Действительно, при увеличении радиуса ствола в 2 раза максимальная скорость истечения увеличивается не более, чем на 20%. Увеличение длины ствола на 200 мм приводит к увеличению скорости истечения на 10÷15 %.

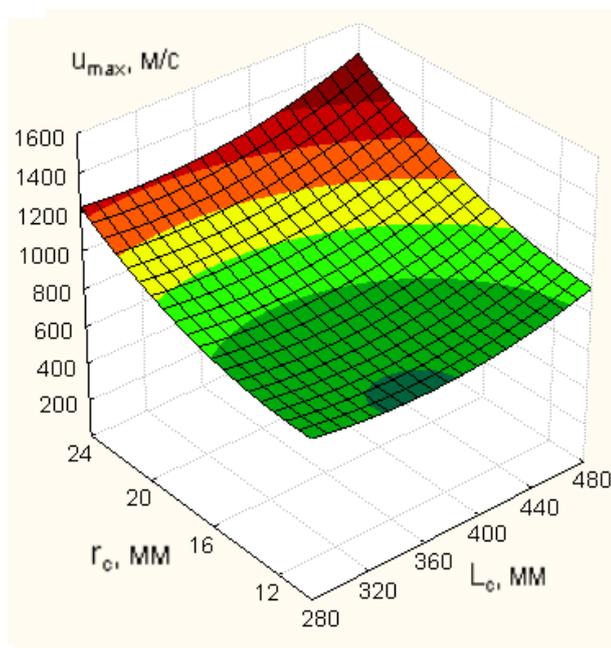


Рис. 4 – Поверхность отклика зависимости максимальной скорости истечения струи ( $u_{\max}$ ) от радиуса ствола ( $r_c$ ) и длины ствола ( $L_c$ ) при массе порохового заряда  $m_{p0}=30$  г и радиусе сопла  $r_s=5$  мм

**Выводы.** Таким образом, в работе получена имитационная модель влияния радиуса и длины ствола, радиуса сопла и массы порохового заряда на максимальную скорость истечения струи УИД для тушения газовых фонтанов. Определено, что для получения максимально возможной скорости истечения струи масса порохового заряда должна быть максимальной, а радиус сопла – минимальным. Длина ствола не оказывает существенного влияния на максимальную скорость истечения струи. Влияние радиуса ствола оказывается существенным при соотношении радиальных размеров ствола и сопла  $\frac{r_c}{r_s} \geq 2,5$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. О возможности тушения пожаров газовых фонтанов с помощью высокоскоростных струй жидкости / [Виноградов С.А., Грицына И.Н., Сенчихин Ю.Н., Касьян А.И.] // Пожежна безпека: збірник наукових праць. – Львов: ЛГУБЖД, 2010. - №17. – С.77-82.

Имитационное моделирование изменения максимальной скорости истечения струи установки 53 импульсного действия для тушения газовых фонтанов

2. Виноградов С.А. Исследование зависимости скорости истечения высокоскоростной струи от параметров импульсного водомета / С.А. Виноградов, И.Н. Грицына, Д.Л. Соколов // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2010. – Вып. 28. – С. 12-18.

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

I.M. Griцыna, S.A. Vinogradov, R.V. Ponomarenko

**Імітаційне моделювання зміни максимальної швидкості витікання струменя установки імпульсної дії для гасіння газових фонтанів**

Проведено імітаційне моделювання зміни швидкості витікання струменя установки імпульсної дії для гасіння газових фонтанів в залежності від її основних геометричних параметрів і маси порохового заряду. Отримано імітаційну модель. Визначено вплив радіуса і довжини ствола, радіуса сопла і маси порохового заряду на зміну швидкості витікання.

**Ключові слова:** установка імпульсної дії, швидкість витікання, струмінь, імітаційна модель, поверхня відгуку.

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

**Simulation changes the maximum speed outflow of jet settings of pulse action to extinguish the gas flowing**

A simulation speed change outflow of jets pulse action for installation of gas fire fountains according to its basic geometric parameters and mass of powder charge. Try simulation model. The influence of the radius and length of the barrel, nozzle radius and mass of powder charge to change the speed of discharge.

**Key words:** device of impulse action, rate of discharge, jet, simulation model, the surface response.