

**УДК 614.844.2**

*С.А. Виноградов, адъюнкт, НУГЗУ,  
И.Н. Грицына, канд. техн. наук, ст. преп., НУГЗУ,  
Д.Л. Соколов, канд. техн. наук, доцент, НУГЗУ*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СТРУИ ОТ ПАРАМЕТРОВ  
ИМПУЛЬСНОГО ВОДОМЕТА**

(представлено д-ром техн. наук Алексеевым О.П.)

В работе приведено краткое описание программного комплекса для исследования термодинамических процессов в импульсном водомете. Рассмотрено влияние массы порохового заряда, длины ствола, радиуса сопла и ствола на скорость истечения струи.

**Ключевые слова:** скорость истечения, параметры установки, программный комплекс.

**Постановка проблемы.** Основным параметром, влияющим на дальность подачи струй жидкости, в том числе с использованием импульсного водомета (ИВ), является импульс количества движения. Таким образом, дальность подачи зависит от скорости истечения струи и от количества жидкости, выбрасываемого во время выстрела.

Очевидно, что скорость истечения для ИВ будет зависит от энергетических затрат на выбрасывание единицы огнетушащей жидкости, от реологических характеристик, от конфигурации проточной части разгонного устройства, а также непосредственно от количества выбрасываемой жидкости.

Таким образом, задача синтеза устройств для импульсной подачи огнетушащей жидкости в необходимом количестве с параметрами, обеспечивающими максимальную скорость истечения, является актуальной задачей исследования.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Известны результаты [1, 2], полученные при исследовании устройств, которые позволяют выбрасывать за один выстрел от 50 мл до 1 л воды. Исследования устройств, позволяющих подавать 60-70 л за выстрел, авторам не известны.

**Постановка задачи и ее решение.** Для определения необходимых параметров устройства, обеспечивающих максимальный импульс количества движения, необходимо иметь адекватную математическую модель внутренней баллистики ИВ и программное обеспечение, позволяющее проводить численное решение уравнений, входящих в математическую модель.

Система уравнений внутренней баллистики порохового импульсного водомета в квазистационарном приближении имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{u_1}{h_1} p_g = u_{pl}, \\ \frac{dm_g}{dt} &= m_{p0} \chi_1 \sigma u_{pl} = Q_g, \\ \frac{dp_g}{dt} &= \frac{(k-1)qQ_g + ka_1 p_g Q_w - \alpha_1 p_g Q_g}{V_g + ka_2 p_g}, \\ \frac{dm_w}{dt} &= -u_s F_s \rho_0 = Q_w, \\ V_g &= V_{g0} + (V_{w0} - a_1 m_w) + \alpha_1 m_g, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u_s$  – скорость истечения струи из сопла;  $t$  – время;  $z = h/h_1$  – относительная толщина сгоревшего слоя,  $2h_1$  – начальная толщина порохового зерна,  $h$  – толщина сгоревшего слоя,  $u_1$  и  $q$  – постоянная скорости горения и удельная теплота сгорания пороха,  $V_g$  и  $p_g$  – объем и давление пороховых газов,  $m_{p0}$  – начальная масса пороха,  $\chi_1$ ,  $\lambda_1$ ,  $\mu_1$  – коэффициенты, определяемые формой порохового зерна,  $\sigma(z)$  – относительная площадь поверхности горения,  $k$  – показатель адиабаты продуктов сгорания пороха,  $\alpha_1 = 1/\rho_p - \alpha$  – поправка, учитывающая собственный объем молекул пороховых газов,  $\rho_p$  – плотность твердого пороха,  $m_w$  – текущая масса воды в водомете;  $F_s$  – площадь поперечного сечения сопла;  $a_0 \approx 1476$  м/с – скорость звука в воде при атмосферном давлении;  $\rho_0$  – плотность жидкости;  $V_{w0}$  – начальный объем воды.

Переменные величины [2]

$$a_1 = \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{B}{p_g + B} \right)^{1/n}, \quad a_2 = \frac{m_w}{nB\rho_0} \left( \frac{B}{p_g + B} \right)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (2)$$

где  $B = 304,5$  МПа,  $n = 7,15$ .

Начальные условия для системы (1)

$$m_b = m_{b0}, \quad z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad m_g = m_{g0}, \quad p_g = p_{g0}, \quad x_g = 0. \quad (3)$$

Здесь  $V_{g0}$ ,  $m_{g0}$ ,  $p_{g0}$  - параметры газа после срабатывания воспламенителя.

Начальный объем и масса газа определяются по объему камеры сгорания, массе пороха и давлению газов после срабатывания воспламенителя:

$$V_{g0} = V_k - m_{p0}/\rho_p, \quad m_{g0} = \frac{p_{g0} V_{g0}}{(k-1)q}. \quad (4)$$

Для решения этой задачи создан программный комплекс на языке C++, с использованием кросс-платформенного инструментария разработки программного обеспечения Qt, который позволяет запускать созданное на нем ПО в большинстве современных операционных систем путем простой компиляции программ без изменения исходного кода. Программный комплекс является полностью объектно-ориентированным и поддерживающим технику компонентного программирования.

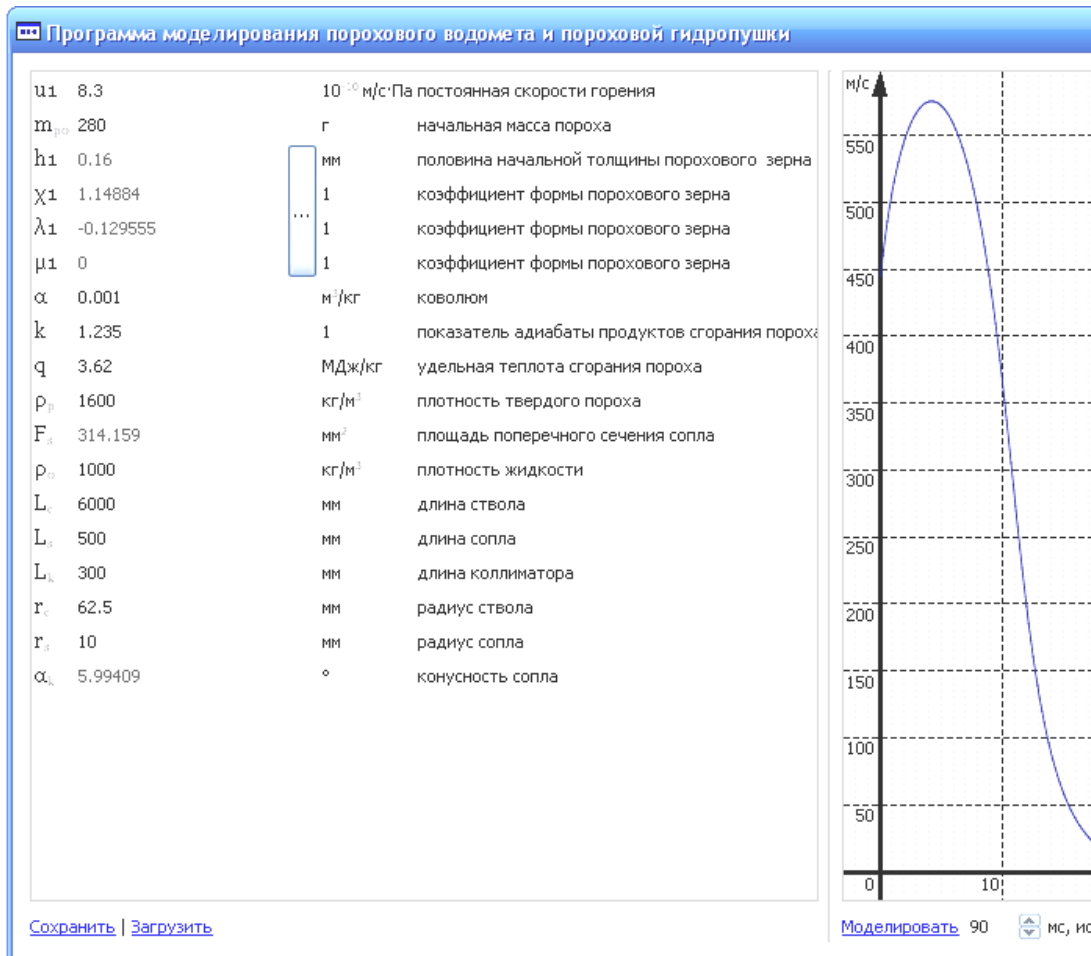


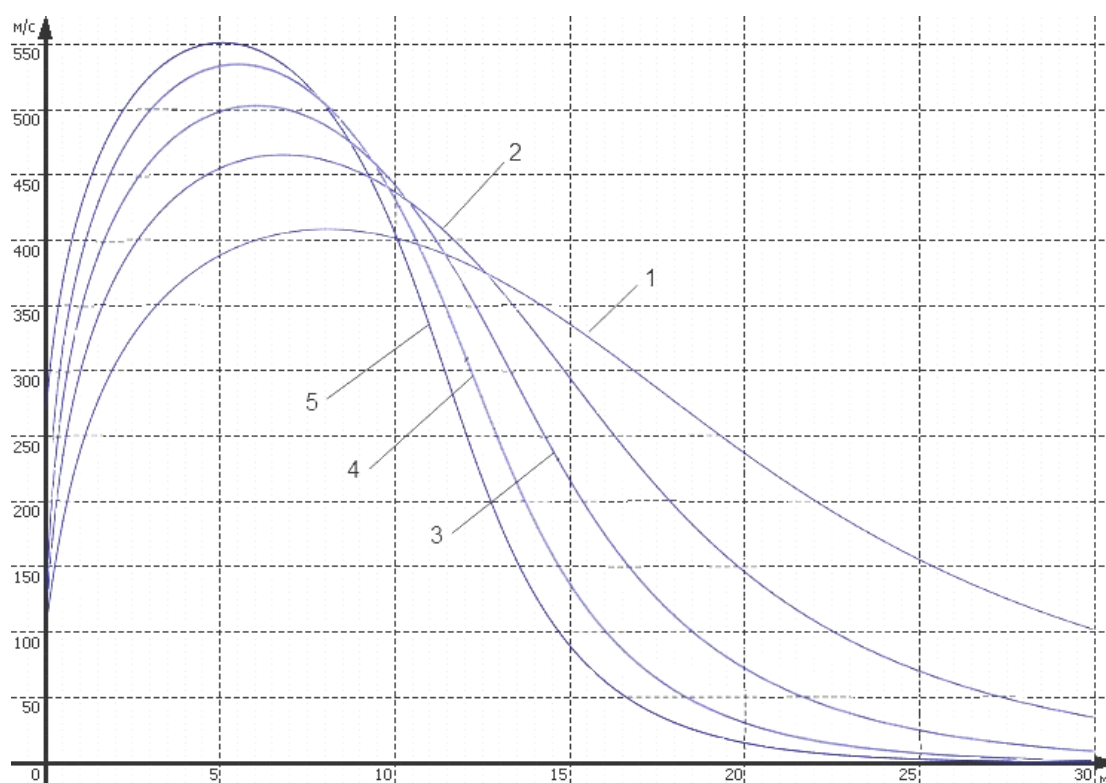
Рис. 1. – Интерфейс программы WaterCannonSimulator

Для увеличения производительности программы во время разработки применялся Meta Object Compiler (МОС) – система предварительной обработки исходного кода [3].

Интерфейс программы (рис. 1) состоит из двух частей. В левой части находится окно ввода переменных – параметров установки, масс жидкости и пороха и др. В правой части находится окно вывода полученных при моделировании результатов. Окно вывода полученных результатов представляет собой координатную сетку, в которую выполняется вывод полученных графиков. Внизу экрана находятся параметры моделирования, то есть шаги по времени и по длине, а также время. Программа позволяет сохранять и загружать полученные результаты при помощи кнопки сохранить/загрузить, находящейся в нижней части экрана. Также можно экспортировать полученный график в известные форматы графических объектов: bmp, jpg, png.

При решении системы уравнений использовались численные методы Эйлера и прямой метод Рунге-Кутты. Расчеты проводились на подвижной регулярной сетке, один конец которой опирался на срез сопла, а другой – на контактную поверхность, закон движения которой определялся в процессе решения задачи.

Результаты расчетов зависимости скорости истечения от массы пороха и радиуса сопла представлены на рис. 2 – 3.



**Рис. 2. – Зависимость скорости истечения от массы пороха.  $R_c=62,5$  мм,  $R_s=10$  мм,  $L_c=6000$  мм,  $L_s=300$  мм,  $L_k=300$  мм  
1 –  $m_{p0}=100$  г; 2 –  $m_{p0}=150$  г; 3 –  $m_{p0}=200$  г; 4 –  $m_{p0}=250$  г; 5 –  $m_{p0}=300$  г**

Из графика (рис. 2) видно, что изменение массы пороха оказывает существенное влияние на параметры выстрела.

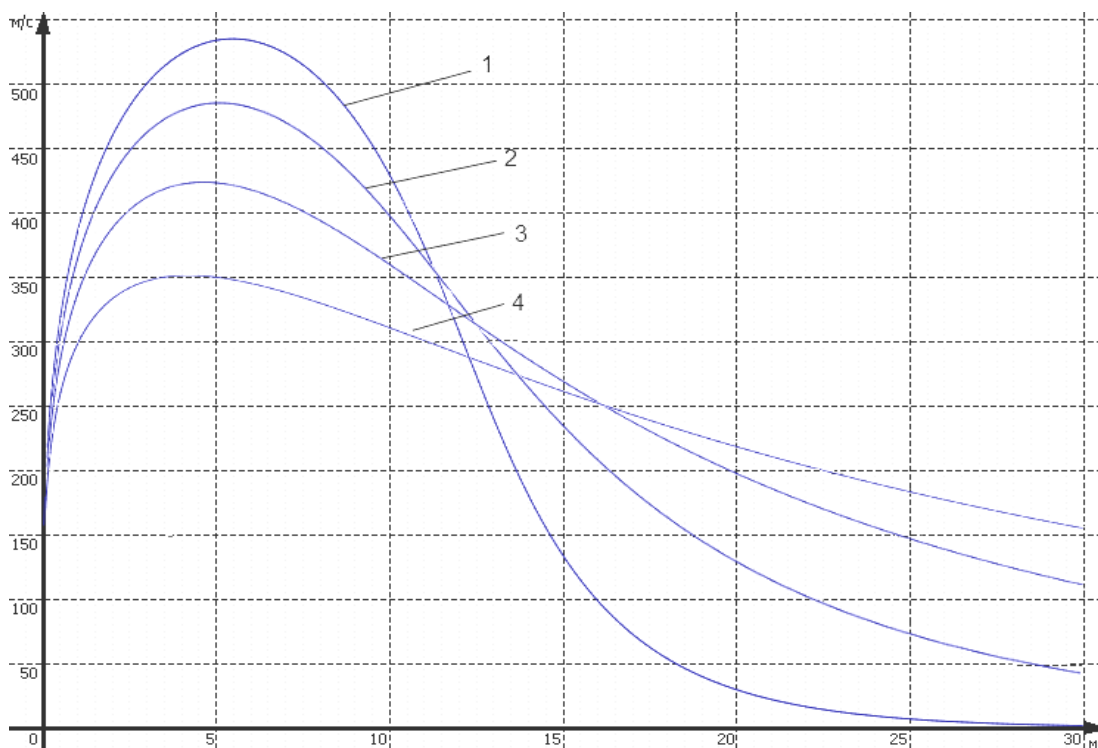


Рис. 3. – Зависимость скорости истечения от радиуса сопла.  $R_c=62,5$  мм,  $L_c=6000$  мм,  $L_s=300$  мм,  $L_k=300$  мм,  $m_{p0}=250$  г  
1 –  $R_s=10$  мм; 2 –  $R_s=15$  мм; 3 –  $R_s=20$  мм; 4 –  $R_s=25$  мм

**Выводы.** Таким образом, полученный программный комплекс позволяет проводить исследования термодинамических процессов внутри импульсного водомета. Полученные результаты позволяют утверждать, что наиболее активно система откликается на изменение массы порохового заряда. Второе по значимости место на изменение скорости истечения оказывает изменение диаметра выходного насадка. На практике реализовать такой метод регулирования возможно путем использования сменных насадков. Влияние остальных параметров на скорость истечения менее существенно.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / Александр Николаевич Семко - Донецк: Вебер, 2007. – 149 с. (Монография).
2. Орлов Б.В. Проектирование ракетных и ствольных систем / Б.В. Орлов – М.: Машиностроение, 1974. – 828 с.
3. Дейтел Х. Как программировать на C++ / Х. Дейтел , П. Дейтел – М.: Бином, 2003. – 1118 с.  
nuczu.edu.ua

С.А. Виноградов, І.М. Грицина, Д.Л Соколов

**Дослідження залежності швидкості руху високошвидкісного струменя рідини від параметрів імпульсного водомету.**

У роботі наведений короткий опис програмного комплексу для дослідження термодинамічних процесів в імпульсному водометі. Розглянуто вплив маси порохового заряду, довжини ствола, радіуса сопла й ствола на швидкість витікання струменя.

**Ключові слова:** швидкість витікання, параметри установки, програмний комплекс.

S.A. Vinogradov, I.M. Grytsyna, D.L. Sokolov

**Investigation of dependence of high-speed liquid jet pulse parameters of water cannons.**

The paper is a brief description of the software for the study of thermodynamic processes in pulsed water cannons. The influence of the mass of powder charge, barrel length, radius of nozzle and barrel to speed jet outflow.

**Keywords:** leakage rate, settings, software package.