

Виноградов С.А.

Национальный университет гражданской защиты Украины, г. Харьков

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ СТРУЙ ЖИДКОСТИ

Построена математическая модель внутренней баллистики импульсного водомета в квазистационарной постановке. Для решения системы уравнений создан программный комплекс. Проведено моделирование параметров высокоскоростных струй с использованием комплекса.

Введение

Импульсная подача жидкости широко используется в современной промышленности, в том числе и в автомобилестроении. Струи жидкости высокой скорости могут быть применены, в частности, для разбора и резки автомобиля при ликвидации последствий ДТП.

Высокоскоростные струи жидкости можно получить из специальных устройств – гидропушки (ГП) и импульсного водомета (ИВ) (рисунок 1). В этих установках реализуются разные физические принципы: вытеснение жидкости из замкнутого объема через малое отверстие в ИВ и ускорение жидкости при втекании в сужающееся сопло в ГП. Данные установки могут работать на различных источниках энергии, однако наиболее мощные и надежные – установки с пороховым приводом.

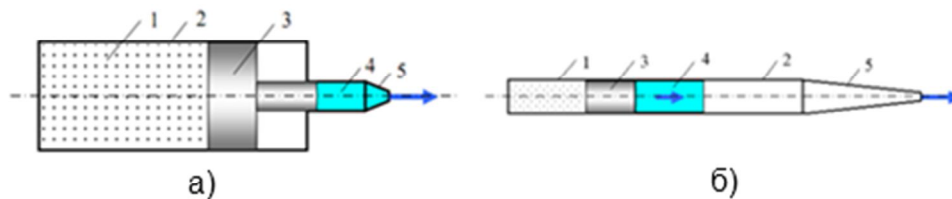


Рисунок 1 – Гидропушка (а) и импульсный водомет (б)
1 – ресивер; 2 – ствол; 3 – поршень; 4 – вода; 5 – сопло

Различные физические процессы в ГП и ИВ влекут за собой изменение характеристик струй. Струя ГП обладает большой скоростью и низкой дальностью. Для струи ИВ напротив, характерна большая, по сравнению со струей ГП, дальность и меньшая скорость. В дальности заключается ее преимущество.

Однако для использования высокоскоростных струй ИВ необходимо уметь определять параметры струи в зависимости от размеров установки и количества заряда. Для этого нужно определить математические модели, описывающие процессы, протекающие во время выстрела ИВ, а также создать программное обеспечение для расчета этих моделей.

Основной материал

В [1, 2] доказано, что параметры ИВ с поршневым приводом во многих практических случаях с достаточной точностью могут быть рассчитаны в квазистационарном приближении, когда они усредняются по всему объему жидкости. В такой постановке внутренняя баллистика ИВ описывается системой дифференциальных и алгебраических уравнений.

Для построения системы уравнений внутренней баллистики импульсного водомета примем ряд допущений: изменение параметров воды примем адиабатическими, осредненными по объему ствола, ствол имеет форму цилиндра с плоскими торцами, а истечение происходит через малое отверстие, кинетической энергией частиц воды в стволе пренебре-

гаем, жидкость примем идеальной, течение будем считать квазиодномерным, отсутствует вращение, конструкция абсолютно жесткая и упругих деформаций нет, течение воды в зазоре между поршнем и стволом отсутствует.

Система уравнений внутренней баллистики порохового импульсного водомета с учетом принятых допущений имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{u_1}{h_1} p_g = u_{p1}, \\ \frac{dm_g}{dt} &= m_{p0} \chi_1 \sigma u_{p1} = Q_g, \\ \frac{dp_g}{dt} &= \frac{(k-1)qQ_g + ka_1 p_g Q_w - \alpha_1 p_g Q_g}{V_g + ka_2 p_g}, \\ \frac{dm_w}{dt} &= -u_s F_s \rho_0 = Q_w, \\ V_g &= V_{g0} + (V_{w0} - \alpha_1 m_w) + \alpha_1 m_g, \end{aligned} \quad (1)$$

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;

χ_1, λ_1, μ_1 – коэффициенты, определяемые формой порохового зерна;

$\sigma(z)$ – относительная площадь поверхности горения;

k – показатель адиабаты продуктов сгорания пороха;

$\alpha_1 = 1 / \rho_p - a$ – поправка, учитывающая собственный объем молекул пороховых газов;

ρ_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;

ρ_0 – плотность жидкости;

V_{w0} – начальный объем воды.

Переменные величины

$$\alpha_1 = \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{B}{p_g + B} \right)^{1/n}, \quad \alpha_2 = \frac{m_w}{nB\rho_0} \left(\frac{B}{p_g + B} \right)^{\frac{n+1}{n}}, \quad (2)$$

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:

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

Поскольку аналитически решить задачу внутренней баллистики устройств импульсной подачи высокоскоростных струй жидкости не представляется возможным, для этих целей разработан программный комплекс WaterCannonSimulator 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.

Для увеличения производительности программы во время разработки применялся Meta Object Compiler (МОС) – система предварительной обработки исходного кода [3]. Использование МОС позволило во много раз увеличить мощь библиотек. Кроме того, это позволило сделать код более лаконичным. Был создан дополнительный исходный файл на C++, содержащий мета-объектный код.

Исходными данными для расчета являются: начальная масса пороха, вид пороха, показатель адиабаты продуктов горения, плотность жидкости, длины ствола, сопла, коллиматора и их радиусы.

Интерфейс программы (рисунок 2) состоит из двух частей. В левой части находится окно ввода переменных. 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 моделирования при помощи кнопки сохранить / загрузить, находящейся в нижней части экрана. Также можно экспортировать полученный график в известные форматы графических объектов: bmp, jpg, png.

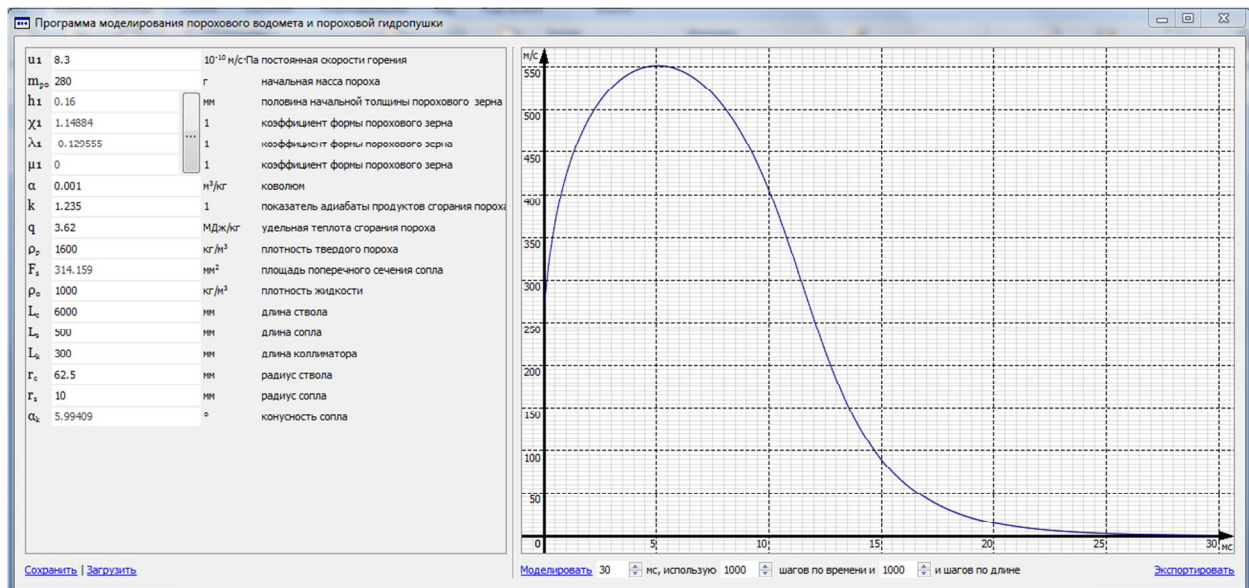


Рисунок 2 – Интерфейс программы WaterCannonSimulator

При решении системы уравнений использовались численные методы Эйлера – наиболее простой численный метод решения (систем) обыкновенных дифференциальных уравнений, и прямой метод Рунге–Кутты – метод, позволяющий получить результат высокой точности. 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.

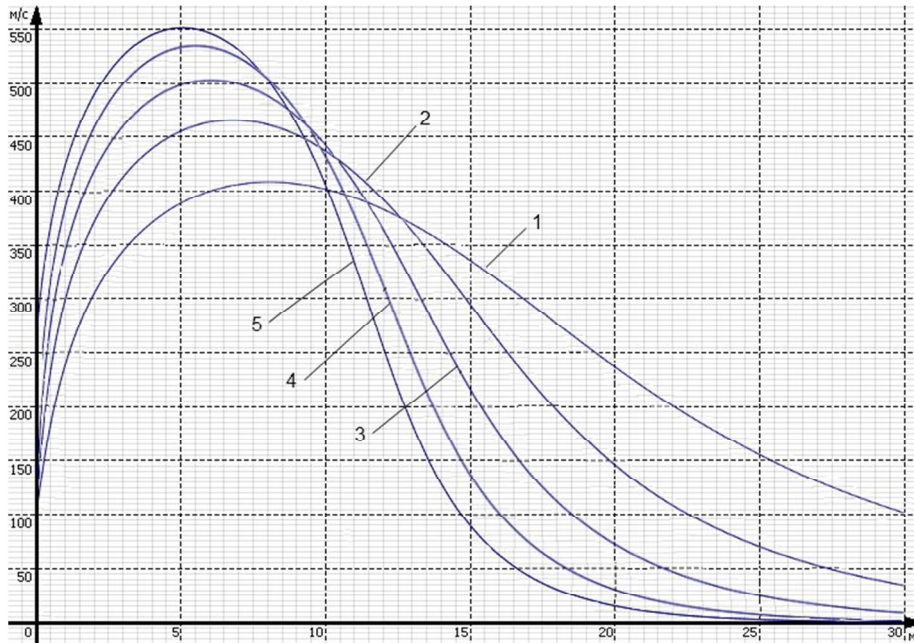


Рисунок 3 – Зависимость скорости истечения от массы пороха:

$$R_c = 62,5 \text{ мм}, R_s = 10 \text{ мм}, L_c = 6000 \text{ мм}, L_s = 300 \text{ мм}, L_k = 300 \text{ мм}.$$

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 графиков на рисунке 3 и 4 видно, что изменение массы пороха и радиуса сопла оказывает существенное влияние на параметры выстрела.

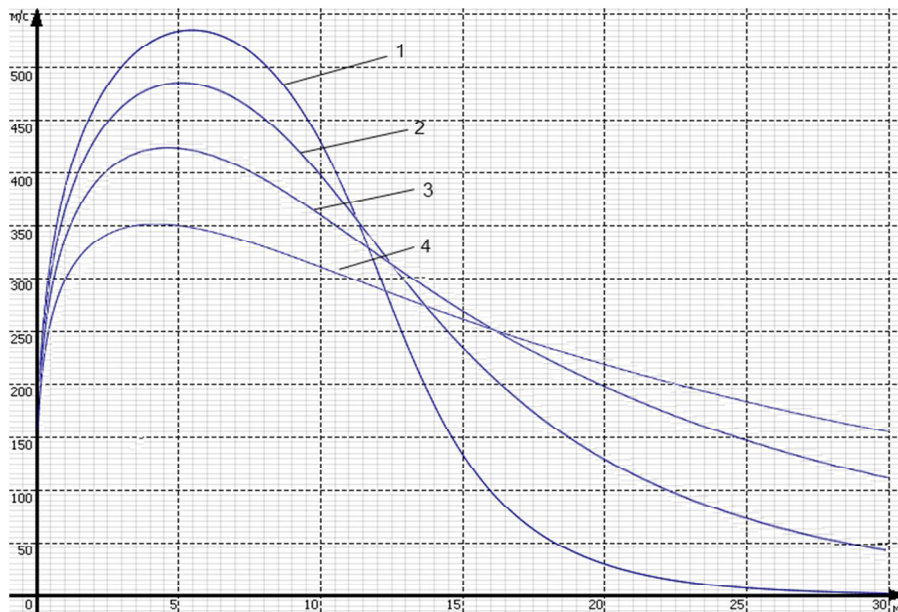


Рисунок 4 – Зависимость скорости истечения от радиуса сопла:

$$R_c = 62,5 \text{ мм}, L_c = 6000 \text{ мм}, L_s = 300 \text{ мм}, L_k = 300 \text{ мм}, m_{p0} = 250 \text{ г}.$$

1 – $R_s = 10$ мм; 2 – $R_s = 15$ мм; 3 – $R_s = 20$ мм; 4 – $R_s = 25$ мм

Влияния длины ствола и длины сопла (рисунок 5, 6) напротив, являются незначительными, и могут не учитываться при расчете, например, оптимальных параметров устройств.

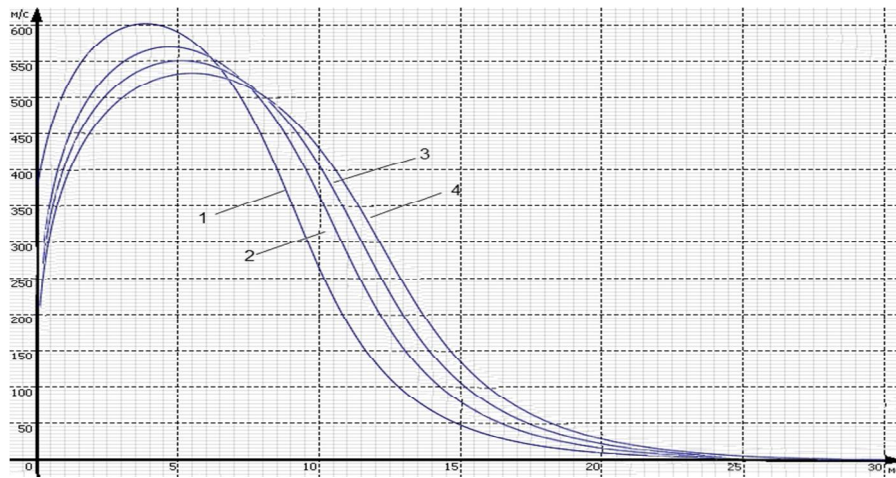


Рисунок 5 – Зависимость скорости истечения от длины ствола: $R_c = 62,5$ мм; $R_s = 10$ мм; $L_s = 300$ мм; $L_k = 300$ мм; $m_{p0} = 250$ г.
1 – $L_c = 3000$ мм; 2 – $L_c = 4000$ мм; 3 – $L_c = 5000$ мм; 4 – $L_c = 6000$ мм.

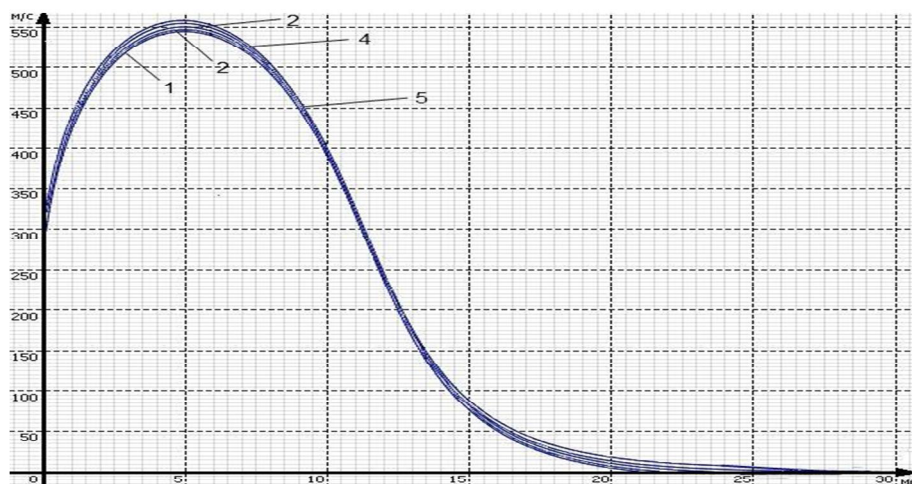


Рисунок 6 – Зависимость скорости истечения от длины сопла: $R_c = 62,5$ мм; $R_s = 10$ мм; $L_c = 6000$ мм; $L_k = 300$ мм; $m_{p0} = 250$ г.
1 – $L_s = 100$ мм; 2 – $L_s = 200$ мм; 3 – $L_s = 300$ мм; 4 – $L_s = 400$ мм; 5 – $L_s = 500$ мм.

Выводы

Таким образом установлено, что изменение массы пороха и радиуса сопла оказывает решающее влияние на параметры выстрела импульсного водомета. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию устройства.

Список литературы

1. Атанов Г.А. Внутренняя баллистика гидропушки и импульсного водомета: дис...д-ра физ.-мат. наук: 01.02.05 / Г.А. Атанов. – Донецк, 1977. – 220 с.
2. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / А.Н. Семко. – Донецк: Вебер, 2007. – 149 с.
3. Газодинамические основы внутренней баллистики / С.А. Бетехтин, А.П. Виноцкий, М.С. Горохов, и др. / под общей ред. К.П. Станюковича. – М.: Оборонгиз. – 1957. – 384 с.

Рецензент: к.т.н., доц. А.В. Хімченко, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 05.09.12
© Виноградов С.А., 2012