

*И.Н. Грицына, к.т.н., доц., зам. начальника каф., УГЗУ,
С.А Виноградов, адъюнкт, УГЗУ*

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВНУТРЕННЕЙ
БАЛЛИСТИКИ УСТРОЙСТВА ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ
ЖИДКОСТИ ДЛЯ ТУШЕНИЯ ГАЗОВЫХ ФОНТАНОВ В
КВАЗИСТАЦИОНАРНОЙ ПОСТАНОВКЕ**

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

В статье приведена математическая модель внутренней баллистики импульсного водомета для подачи высокоскоростных струй жидкости на тушение газовых фонтанов в квазистационарной постановке.

Постановка проблемы. Для эффективного тушения газовых фонтанов с помощью срыва пламени с безопасного расстояния необходимо обеспечить большую скорость жидкости на выходе из устройства. Из известных на сегодняшний день установок наибольшие скорости истечения можно получить из гидропушки (ГП) и импульсного водомета (ИВ) [1]. При прочих равных условиях в импульсном водомете за выстрел можно подать большее количество воды, чем в гидропушке, поэтому применение ИВ для тушения газовых фонтанов более перспективно.

Анализ последних исследований и публикаций. Устройства импульсной подачи ультраструй ранее использовались для разрушения горных пород, негабаритов, бетонных блоков и т.д. Наибольший вклад в развитие подобных установок сделали Семко А.Н. [1], Атанов Г.А. [2], Гескин Э.С. и др. В большинстве случаев рабочий процесс ИВ рассматривают в нестационарной постановке с учетом волновых процессов. Применительно к нашей задаче возможно рассматривать квазистационарную постановку [1].

Постановка задачи и ее решение. Для определения дальности подачи жидкости и параметров у становки необходимо получить зависимость для давления, массы и скорости жидкости в устройстве от времени. Процесс выстрела импульсного водомета обладает рядом особенностей, позволяющим сделать допущение о квазистационарности процесса движения жидкости [2, 3]. 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 пренебрегаем, 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.

Учитывая сформулированные выше допущения, можно получить уравнения внутренней баллистики импульсного водомета, расчетная схема которого показана на рис. 1 (а и б - положение поршня соответственно перед выстрелом и во время него).

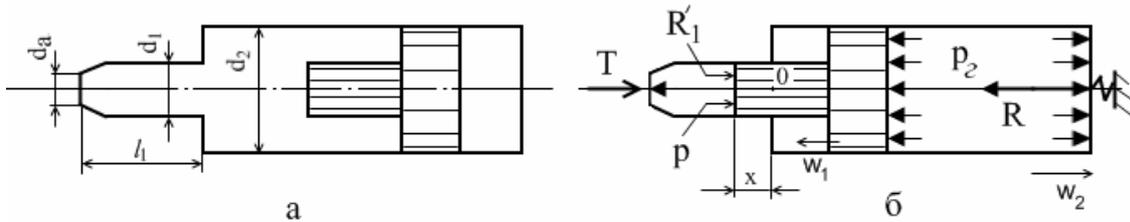


Рисунок 1 – Расчетная схема импульсного водомета.

Масса воды в стволе уменьшается за счет истечения. Секундное ее изменение $dm/dt = -\rho_a u_a F_a$, где ρ_a , u_a и F_a – плотность жидкости, скорость жидкости и площадь поперечного сечения на срезе сопла. Скорость истечения жидкости определяется по формуле [3]

$$u_a = \sqrt{\frac{2}{n-1} \frac{p_o + B}{\rho_o} \left[1 - \left(\frac{p_a + B}{p_o + B} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (1)$$

где $n = 7,15$ – показатель адиабаты; p_o – давление торможения жидкости, Па.

Величина ρ_a зависит от характера истечения (до- или сверхзвуковой). Скорость звука при начальном давлении определяется по формуле

$$c_s = \sqrt{\frac{nB}{\rho}}, \quad (2)$$

где ρ_n - начальная плотность жидкости, $кг/м^3$.

С учетом (2) выражение (1) при условии $p_a = 0$, $\rho_a = \rho_n$ [3] примет вид

$$\frac{dm}{dt} = -F_a \rho_n c_s \sqrt{\frac{2}{n-1} \left[\left(\frac{p + B}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]}, \quad (3)$$

Текущее значение массы находим как интеграл этого уравнения, а объем определяем по относительному перемещению ствола и поршня [2]

$$V = F_1(l_1 - x), \quad (4)$$

где F_1 - площадь поперечного сечения ствола, m^2 ; l_1 - приведенная длина ствола, м.

Для определения изменения давления жидкости во время выстрела запишем уравнение изоэнтропы в виде

$$(p + B) \left(\frac{V}{m} \right)^n = \text{const}, \quad (5)$$

где V - объем воды в стволе, m^3 ; m - масса воды, кг; p - давление воды, Па; B - энтропийная функция, Па.

Представив (5) в дифференциальной форме и, исключив объем, получим

$$\frac{dp}{dt} = n(p + B) \left(\frac{1}{m} \frac{dm}{dt} + \frac{1}{l_1 - x} \frac{dx}{dt} \right). \quad (6)$$

В общем случае поршень и корпус водомета подвижны. На систему корпус - поршень кроме внутренних сил, обусловленных давлением воды и газа, действуют две внешние силы (рис. 1, б): реакция амортизатора R и сила реакции струи (сила тяги T). Для определения силы тяги примем параметры в стволе заторможенными и осредненными по объему. Тогда

$$T = \frac{dm}{dt} u_a. \quad (6)$$

С помощью (1), (3) и (6) получим T зависимость $T=f(p)$

$$T = F_a \rho \cdot c^2 \frac{2}{n-1} \left[\left(\frac{p+B}{B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (7)$$

Для определения силы давления воды на сопло используем теорему об изменении количества движения [2]

$$m_1 \frac{dw_1}{dt} + m_2 \frac{dw_2}{dt} = -T + R, \quad (8)$$

где m_1 и w_1 - масса и скорость поршня; m_2 и w_2 - масса и скорость корпуса.

Изменение количества движения поршня и корпуса представим в виде

$$m_1 \frac{dw_1}{dt} = F_2 p_r - F_1 p; \quad (9)$$

$$m_2 \frac{dw_2}{dt} = -F_2 p_r + R', \quad (10)$$

где F_2 - площадь поперечного сечения поршня; p_r - давление газа; R' - сила давления воды на сопло.

Введем переменную $w = w_1 - w_2$ - относительная скорость, и пренебрегая членом $(T-R)/m_2$ ввиду его малости [2], из уравнений (8), (10) находим

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{m_1} (F_2 p_r - F_1 p) \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right). \quad (11)$$

Относительное перемещение x определится как интеграл уравнения

$$\frac{dx}{dt} = w. \quad (12)$$

Таким образом, получим систему уравнений (3), (6), (11) и (12) для определения четырех неизвестных p , m , w , и x .

Выводы. В работе предложена система уравнений внутренней баллистики импульсного водомета в квазистационарной постановке, которую возможно использовать для определения рабочих параметров установки тушения газовых фонтанов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления. – Донецк: Вебер, 2007. – 149 с.
2. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород.- К.: Вища школа, 1987.- 155 с.
3. Кавитационный эффект в экспоненциальном струйном насадке/Б. В. Войцеховский, Ю. А. Дудин, Ю. А. Николаев и др. // Динамика сплошной среды. - Новосибирск, 1971. - Вып. 9. - С. 7-11.

puszu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 18.03.2009 г.