

УДК 532.5.013–1

© 1997 г. Г.А. АТАНОВ, В.Г. ГУБСКИЙ, А.Н. СЕМКО

ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования внутренней баллистики гидропушки с пороховым приводом. Построена математическая модель процесса, приведены результаты расчетов для конкретной установки. Течение жидкости рассмотрено в квазиодномерном приближении, а горение пороха – в квазистационарном. Измерено давление жидкости и пороховых газов в различных частях установки. Сравнение теории с экспериментом показало достаточную точность математической модели.

1. Наиболее исследованными установками для получения импульсных струй жидкости являются импульсный водомет и гидропушка [1]. В этих устройствах, основанных на экструзионном (импульсный водомет) и инерционном (гидропушка) принципах, энергия передается струе от какого-либо источника энергии посредством поршня или без поршня непосредственно жидкости. Наиболее распространенными источниками энергии являются сжатый газ, продукты сгорания горючей смеси [2] или пороха [3], электрический разряд в жидкости [1]. Здесь исследуется гидропушка, работающая на энергии сгоревшего пороха.

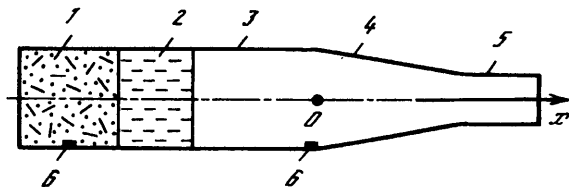
Рассматриваемая пороховая гидропушка (фиг. 1) состоит из ресивера 1, в котором происходит горение пороха; водяного заряда 2, зафиксированного тонкими пыжами; цилиндрического ствола 3; сужающегося сопла 4 и цилиндрического коллиматора 5. Процессы в гидропушке начинаются с момента воспламенения пороха. Образующиеся пороховые газы приводят в движение водяной заряд и разгоняют его в стволе. При втекании в сопло наиболее интенсивно ускоряются передние частицы жидкости, в то время как задние частицы могут даже тормозиться на определенной стадии процесса. Для стабилизации струи и выравнивания скорости по ее длине сопло заканчивается цилиндрическим коллиматором, из которого импульсная струя истекает наружу. В рассматриваемой конструкции гидропушки отсутствует поршень и пороховые газы непосредственно воздействуют на водяной заряд. Горение пороха происходит все время, пока вода втекает в сопло, и может продолжаться до завершения выстрела – вытеснения водяного заряда из гидропушки. Влияние на течение и истечение жидкости пыжей и воздуха в сопле гидропушки не учитывается.

Квазиодномерное изоэнтропическое течение идеальной сжимаемой жидкости в гидропушке описывалось системой уравнений нестационарной газовой динамики в следующей дивергентной форме:

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + p) = 0 \quad (1)$$

$$p = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right]$$



Фиг. 1. Пороховая гидропушка: 1 – ресивер, 2 – водяной заряд, 3 – ствол, 4 – сопло, 5 – коллиматор, 6 – датчики давления

где t – время, x – координата, u – скорость, F – площадь поперечного сечения, p и ρ – давление и плотность, $B = 304,5$ МПа, $n = 7,15$, $\rho_0 = 1000$ кг/м³ – постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта.

Начальные условия следующие:

$$u(0, x) = 0, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0 \quad (2)$$

$$-(L + L_f) \leq x \leq -L_f$$

где L – длина водяного заряда, L_f – начальное расстояние от свободной поверхности водяного заряда до входа в сопло, где расположено начало координат.

Граничные условия: на свободной поверхности

$$p(t, x_f) = 0 \quad (3)$$

на контактной поверхности пороховые газы – водяной заряд

$$p(t, x_g) = p_g, \quad u(t, x_g) = u_g \quad (4)$$

где x_f и x_g – координаты свободной и контактной поверхностей, p_g и u_g – давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности.

При дозвуковом истечении жидкости в выходном сечении установки ставится граничное условие вида (3); при сверхзвуковом истечении условие не ставится.

Энергия, необходимая для разгона жидкости, выделяется при горении пороха. Для расчета горения пороха сделаны допущения, характерные для задач внутренней баллистики в артиллерии [4]: порох воспламеняется мгновенно и горит адиабатически параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания постоянный, их параметры осредняются по объему; параметры состояния пороховых газов связаны упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса

$$p_g(v - \alpha) = q(k - 1) / T_0$$

где p_g – давление газа, v – удельный объем, α – поправка, учитывающая собственный объем молекул, q – удельная теплота сгорания, k – показатель адиабаты, T_0 – температура горения пороха. При давлении пороховых газов до 500 МПа поправку α можно считать постоянной, равной 0,001 м³/кг. Скорость горения пороха u_p пропорциональна давлению пороховых газов

$$u_p = u_1 p_g$$

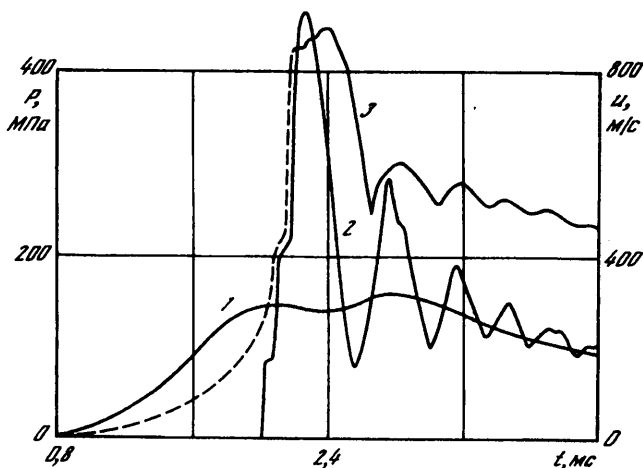
где u_1 – постоянная скорости горения.

Скорость прихода пороховых газов J_g – определяется текущей площадью поверхности s порохового зерна, скоростью горения u_p и плотностью пороха ρ_p

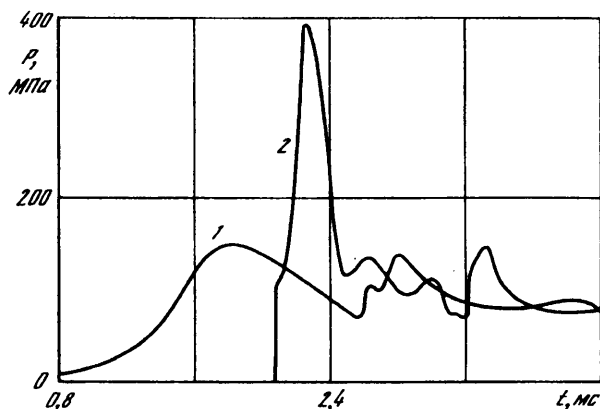
$$J_g = s \rho_p u_p$$

Уравнение баланса энергии пороховых газов имеет вид

$$qJ_g = \frac{k}{k-1} p_g \frac{dV}{dt} + \frac{V}{k-1} \frac{dp_g}{dt}$$



Фиг. 2. Расчетные значения давления и скорости: 1 и 2 – давление в ресивере и у входа в сопло; 3 – скорость втекания (штриховая кривая) и истечения (сплошная кривая)



Фиг. 3. Экспериментальные значения давления: 1 – в ресивере; 2 – у входа в сопло

где V – объем газа, который увеличивается при сгорании твердого пороха и перемещении водяного заряда и уменьшается из-за собственного объема молекул газа

$$\frac{dV}{dt} = J_g \left(\frac{1}{\rho_p} - \alpha \right) + u_p F$$

В начальный момент времени количество пороха и параметры газа следующие:

$$m_p(0) = m_{p0}, \quad p_g(0) = p_{gi}, \quad V(0) = V_0$$

где m_p – масса пороха, p_{gi} – давление газа после срабатывания воспламенителя.

2. Поставленная задача решалась численно конечно-разностным методом Годунова [5], обобщенным на случай нестационарных течений жидкости в [1]. Течение рассчитывалось с момента воспламенения пороха до окончания истечения струи жидкости. Расчеты проводились на подвижной сетке, которая одной границей опиралась на контактную, а другой – на свободную поверхность жидкости. При истечении жидкости правая граница расчетной сетки фиксировалась в выходном сечении

гидропушки. По мере вытекания жидкости из установки количество расчетных ячеек уменьшалось.

Ниже представлены некоторые результаты расчетов и экспериментов для пороховой гидропушки конкретной конструкции: радиус ствола 20 мм, радиус сопла и коллиматора 10 мм, длина ствола 400 мм, длина сопла вместе с коллиматором 156 мм, объем ресивера 135 см³, коническое сопло с углом схождения 13°, масса водяного заряда 400 г. Использовался трубчатый порох массой 100 г со следующими характеристиками: $T_0 = 2820$ К, $u_1 = 0,83$ м/(с · ГПа), $q = 3,62$ МДж/кг, $\rho_p = 1,6$ г/см³, $k = 1,235$. Давление измерялось датчиками 6 (фиг. 1), установленными в корпусе гидропушки в середине газового ресивера и у входа в сопло. Измерительная система запускалась при воспламенении пороха. Датчики и аппаратура удовлетворяли основным требованиям для измерений нестационарных давлений в импульсном водомете и гидропушке, сформулированным в [6, 7].

На фиг. 2 изображены расчетные зависимости давления от времени в ресивере и у входа в сопло и зависимости скорости свободной поверхности при втекании жидкости в сопло и скорости истечения струи. Экспериментальные зависимости давления от времени для тех же сечений изображены на фиг. 3.

Из сравнения расчетных и экспериментальных данных видно, что предложенная модель удовлетворительно передает основные черты протекающих в установке процессов. Как в расчете, так и в эксперименте наблюдается быстрое возрастание давления воды до предельного значения (за 0,4 мс с начала втекания в сопло давление возрастает до 400–450 МПа). В дальнейшем давление пульсирует около значения 100–150 МПа. Расчетные значения давления превышают экспериментальные на 10–20%, повторяя ход экспериментальных кривых. Давление пороховых газов в ресивере изменяется медленнее и на меньшую величину. Соответствие теории эксперименту в этой области лучше: максимальные значения давления в обоих случаях около 150 МПа. Пульсирующий характер изменения давления, зарегистрированный в эксперименте, отражает волновые процессы, происходящие внутри установки. Расхождение теории с экспериментом может быть связано с квазистационарным приближением, в котором рассчитывалось горение пороха.

Разгон водяного заряда в стволе гидропушки длится около 2 мс. К началу втекания в сопло скорость воды достигает 200 м/с. Втекание жидкости в сужающееся сопло приводит к быстрому увеличению ее скорости (за 0,2 мс скорость возрастает до 900 м/с). При переходе в коллиматор распределение скорости по длине водяного заряда становится более однородным, что позволяет получить компактную струю. Истечение жидкости начинается с максимальной скоростью. В дальнейшем скорость истечения уменьшается и головная часть струи отрывается от остальной массы. Струя разрушается, чем и объясняется резкое уменьшение эффективности струи гидропушки с увеличением расстояния до преграды, отмеченное рядом исследователей.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что при расчете гидропушки с пороховым приводом достаточную точность дает использование квазиодномерного приближения при нестационарной постановке для течения жидкости и квазистационарного – для продуктов сгорания пороха.

Авторы выражают благодарность В.А. Бигваве за помощь в организации и проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев: Вища шк., 1987. 155 с.
2. Mellors W., Mohaupt U.H., Burns D.J. Dynamic response and optimization of a pulsed water jet machine of the pressure extrusion type // Proc. 3rd Intern. Symp. on Jet Cutting Technology. Chicago. USA. 1976. P. B4-47–B4-58.

3. *Атанов Г.А.* Оптимизация выстрела импульсного водомета с пороховым приводом // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 6. С. 156–159.
4. Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 828 с.
5. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
6. *Атанов Г.А., Украинский Ю.Д.* Экспериментальное исследование внутренней баллистики импульсного водомета // Изв. АН СССР. МЖГ. 1979. № 3. С. 150–152.
7. *Атанов Г.А., Семко А.Н., Украинский Ю.Д.* Исследование внутренней баллистики гидропушки // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 168–170.

Донецк

Поступила в редакцию
3.IV.1996