

УДК 532.522: 518.5

ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА ИМПУЛЬСНОГО ВОДОМЕТА С ПОРОХОВЫМ ПРИВОДОМ

А. Н. Семко

Донецкий государственный университет, 83055 Донецк (Украина)

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования внутренней баллистики импульсного водомета с пороховым приводом. Течение жидкости в установке рассмотрено в квазистационарной и нестационарной постановках. Определены условия применимости квазистационарного приближения. Оценено влияние сжимаемости жидкости на параметры импульсного водомета. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными на конкретной установке.

Первые конструкции импульсного водомета (ИВ) и гидропушки (ГП) — устройств для получения импульсных струй жидкости высокой скорости — разработаны в Институте гидродинамики Сибирского отделения РАН [1]. Там же под руководством Б. В. Войцеховского проведены экспериментальные и теоретические исследования первых гидроимпульсных установок. В работе [2] получено аналитическое решение задачи о втекании несжимаемой жидкости в сопло ГП. Дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования гидроимпульсных установок, описанные в [3], показали, что пренебрежение сжимаемостью жидкости может не только привести к существенным количественным ошибкам, но и качественно исказить процесс. Известно, что дальнобойность струи ГП составляет несколько дециметров, а дальнобойность струи ИВ может достигать нескольких метров, что является существенным преимуществом ИВ [4, 5]. К недостаткам ИВ можно отнести то, что динамическое давление струи ИВ меньше статического давления внутри установки, в то время как динамическое давление струи ГП может в несколько раз превышать статическое давление в установке [2, 3]. Максимальная скорость струи ИВ обычно не превышает 1500 м/с, а для ГП может достигать 3000 м/с. Для достижения больших скоростей сопло ГП должно иметь особую форму и достаточную длину, что накладывает ограничения на размеры и массу установки [2–4]. Малогабаритная переносная установка для получения импульсных струй жидкости диаметром 10–20 мм со скоростью до 1000 м/с может быть выполнена по схеме ИВ с пороховым приводом.

В работе [6] для ИВ с пороховым приводом в квазистационарной постановке решена вариационная задача оптимального управления горением пороха для получения импульса давления заданной формы. В работах [7, 8] теоретически и экспериментально изучена внутренняя баллистика пороховой ГП. В настоящей работе в разных гидродинамических постановках исследуется внутренняя баллистика ИВ с пороховым приводом.

Пороховой ИВ состоит из камеры сгорания 1, ствола 3 и сопла 5 (рис. 1). Ствол и сопло заполнены водой 4 и отделены от камеры сгорания пыжом 2. Давление измерялось датчиком 6, расположенным у входа в сопло. В начальный момент порох поджигается, образующиеся пороховые газы сжимают и выталкивают воду через выходное отверстие сужающегося сопла. Из сопла истекает импульсная высоконапорная струя жидкости, скорость которой может достигать 1500 м/с. Для стабилизации струи сопло заканчивается коллиматором.

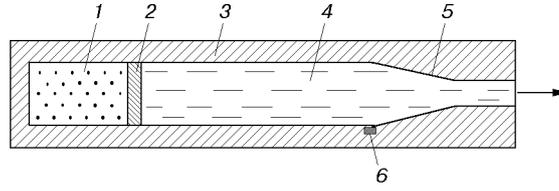


Рис. 1. Схема порохового импульсного водомета:

1 — камера сгорания, 2 — пыж, 3 — ствол, 4 — вода, 5 — сопло, 6 — датчик давления

Для построения математической модели выстрела порохового ИВ делаются следующие допущения. Жидкость считается идеальной и сжимаемой, вязкостью, теплопроводностью и влиянием пыжа можно пренебречь. Профиль сопла предполагается плавным, и радиальные компоненты потока не учитываются. За начало процесса принят момент воспламенения пороха. Начало координат совпадает с входом в сопло.

В принятой постановке квазиодномерное течение идеальной сжимаемой жидкости в водомете описывается системой уравнений нестационарной газовой динамики в следующей форме:

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p+B}{\rho} \right) = 0, \quad p = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right],$$

где t — время; x — координата; u — скорость; $F(x)$ — площадь поперечного сечения проточной части (ствола и сопла); p и ρ — давление и плотность; $B = 304,5$ МПа, $n = 7,15$, $\rho_0 = 10^3$ кг/м³ — постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта.

Начальные и граничные условия имеют вид

$$u(0, x) = 0, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0, \quad -L \leq x \leq L_s;$$

$$p(t, L) = 0, \quad p(t, x_g) = p_g, \quad u(t, x_g) = u_g,$$

где L и L_s — длина ствола и сопла с коллиматором; x_g — координата контактной поверхности; p_g и u_g — давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности.

Горение пороха рассчитывается по методике, изложенной в работе [8], при допущениях, стандартных для задач внутренней баллистики в артиллерии [9]. В квазистационарном приближении уравнения горения пороха и начальные условия имеют вид

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1 p_g}{h_1}, \quad Q_g = \frac{dm_g}{dt} = m_{p0} \sigma(z) \frac{dz}{dt}, \quad \frac{1}{k-1} \frac{d(p_g V_g)}{dt} + p_g F u_g = q Q_g,$$

$$\frac{dV_g}{dt} = Q_g \left(\frac{1}{\rho_p} - \alpha \right) + u_g F, \quad u_g = \frac{dx_g}{dt}; \quad (1)$$

$$z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad m_g = m_{g0}, \quad p_g = p_{g0}, \quad x_g = -L.$$

Здесь h_1 — половина толщины порохового зерна; z — толщина сгоревшего слоя, отнесенная к h_1 ; u_1 — постоянная скорости горения; p_g — давление пороховых газов; Q_g — скорость прихода пороховых газов; $\sigma(z) = 3(1 - 2z + z^2)$ — относительная площадь горения порохового зерна сферической формы; α — поправка на собственный объем молекул; m_g и m_{p0} — масса газа и начальная масса пороха; k — показатель адиабаты; q и ρ_p — удельная теплота сгорания и плотность пороха; V_g — объем пороховых газов; V_{g0} , m_{g0} , p_{g0} — параметры газа после срабатывания воспламенителя.

Как показано в работах [10, 11], при определенных условиях параметры ИВ с достаточной точностью могут быть рассчитаны в квазистационарном приближении. В этом

случае давление воды равно давлению газов и внутренняя баллистика ИВ описывается уравнениями

$$\frac{dm_b}{dt} = -\rho_0 u_s F_s, \quad u_s = a_0 \sqrt{\frac{2}{n-1} \left[\left(\frac{p+B}{B} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right]},$$

$$p = B \left[\left(\frac{m_b}{V_b \rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad V_b = V_{b0} - \int_{-L}^{xg} F dx, \quad m_b = m_{b0},$$

где m_{b0} и m_b — начальная и текущая масса воды; u_s — скорость истечения струи из сопла; F_s — площадь выходного сечения сопла; a_0 — скорость звука в воде при атмосферном давлении; V_b и V_{b0} — текущий и начальный объемы воды.

При расчете в нестационарной постановке уравнения движения жидкости интегрировались численно методом Годунова и сеточно-характеристическими методами двух модификаций [12–14]. Расчеты проводились на сетках с числом ячеек от 64 до 2048. В процессе расчетов контролировалось сохранение массы и энергии. При расчете на мелких сетках закон сохранения массы и энергии выполнялся с погрешностью 0,05 % и 0,2 % соответственно. Результаты расчетов, проведенных разными методами, совпадают в пределах погрешности. Обыкновенные дифференциальные уравнения интегрировались численно методами Эйлера или Рунге — Кутты четвертого порядка.

На основе предварительных расчетов была изготовлена экспериментальная установка (радиус ствола 20 мм, радиус сопла 10 мм, длина ствола 400 мм, длина сопла 86 мм, длина коллиматора 70 мм, объем камеры сгорания 135 см³). Общая длина установки 650 мм, диаметр 70 мм. Использовался порох с зерном сферической формы ($h_1 = 0,53$ мм; $u_1 = 0,91$ м/(с · ГПа); $q = 3,806$ МДж/кг; $\rho_p = 1,6$ г/см³; $k = 1,22$; $\alpha = 1,02$ дм³/кг). Исходные данные: $p_{g0} = 5$ МПа, $m_{p0} = 100$ г, $m_{b0} = 600$ г. Начальный объем и масса газа определялись по объему камеры сгорания V_k , массе пороха и давлению газов после срабатывания воспламенителя:

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

На рис. 2 приведены расчетные (кривые 1–3) и экспериментальная (кривая 4) зависимости давления от времени. Кривые 1 и 2 получены при расчете в нестационарной постановке и соответствуют давлению в камере сгорания и у входа в сопло. Кривая 3 получена при расчете в квазистационарном приближении. Измерение давления и скорости производилось аппаратурой, предназначенной для исследования внутренней баллистики ствольных орудий [8]. Расчет в нестационарной постановке хорошо соответствует экспериментальным данным (кривые 2 и 4 на рис. 2). Различие максимальных значений давления составляет менее 3%. Отметим, что при расчете в квазистационарной постановке давление осредняется по всему объему и является интегральной характеристикой. Различие максимальных значений давления для рассмотренных приближений составляет около 46% (кривые 3 и 4 на рис. 2).

На рис. 3 приведена зависимость скорости истечения струи от времени для расчета в нестационарной и квазистационарной постановках (кривые 1 и 2). Максимальные значения скорости различаются меньше, чем максимальные значения давления (примерно на 25%). Максимальная скорость истечения струи, зарегистрированная в эксперименте, равна 730 м/с (на 3,5% меньше расчетной). Коэффициент превышения давления k_p (отношение максимального давления торможения струи к максимальному давлению внутри установки) для данной конструкции ИВ, рассчитанный в более точной нестационарной

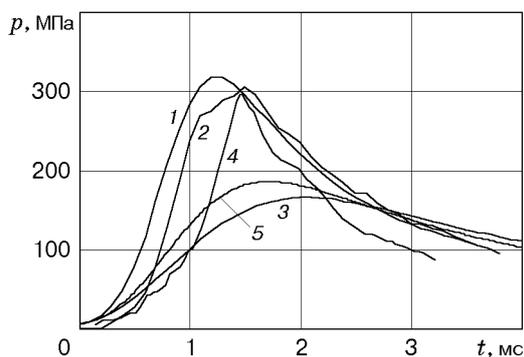


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость давления от времени:

1 — в камере сгорания (нестационарная постановка); 2 — у входа в сопло (нестационарная постановка); 3 — квазистационарное приближение; 4 — эксперимент; 5 — для несжимаемой жидкости

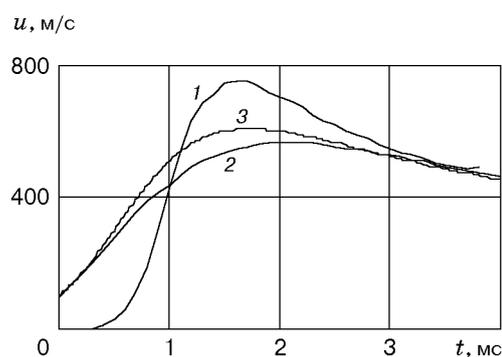


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость скорости истечения струи от времени:

1 — нестационарная постановка; 2 — квазистационарная постановка; 3 — для несжимаемой жидкости

постановке, равен 0,95. Отметим, что максимальное значение этого коэффициента для ИВ равно 1, если процесс является квазистационарным [10].

Для оценки допустимости квазистационарного приближения исследовался выстрел ИВ при различных значениях отношения радиусов ствола и сопла и разной массе пороха. Ниже представлены результаты расчетов для порохового ИВ со следующими параметрами: радиус ствола 20 мм, радиус сопла 4 мм, длина ствола 400 мм, длина сопла 150 мм, длина коллиматора 50 мм, объем камеры сгорания 135 см^3 , масса пороха 100 г.

На рис. 4 приведены зависимости давления у входа в сопло от времени для расчета в нестационарной и квазистационарной постановках (кривые 1 и 2). При расчете в нестационарной постановке наблюдаются пульсации давления, связанные с волновыми процессами в жидкости (кривая 1). Период пульсаций (около 0,55 мс) соответствует времени распространения звуковых волн от контактной поверхности до среза сопла и обратно (при давлении около 500 МПа скорость звука в воде равна 2240 м/с). Максимальная амплитуда пульсаций равна 62 МПа, что составляет 12% максимального среднего значения давления. Со временем пульсации давления затухают, и оно стремится к квазистационарному значению. Расчеты в квазистационарной постановке хорошо согласуются с осредненными значениями давления, полученными в нестационарной постановке.

На рис. 5 показано распределение давления и скорости жидкости по длине установки в момент времени $t = 1 \text{ мс}$, полученное при расчете в нестационарной постановке (кривые 1 и 2 соответственно). Видно, что в стволе давление практически одинаково и равно среднему. В сопле давление незначительно повышается, а затем быстро уменьшается до нуля в коллиматоре. Характер изменения скорости соответствует зависимости $p(x)$. В стволе скорость практически постоянная, а в сопле быстро достигает максимального значения. На графике распределения скорости видно стабилизирующее действие коллиматора при $x \geq 150 \text{ мм}$. Скорость жидкости в коллиматоре практически не меняется. Допустимость квазистационарной постановки объясняется описанным выше характером изменения давления. Дополнительные исследования показали, что точность расчетов в квазистационар-

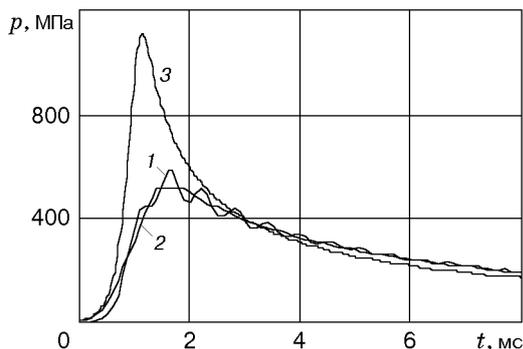


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость давления от времени:

1 — у входа в сопло (нестационарная постановка); 2 — в камере сгорания и у входа в сопло (квазистационарная постановка); 3 — для несжимаемой жидкости

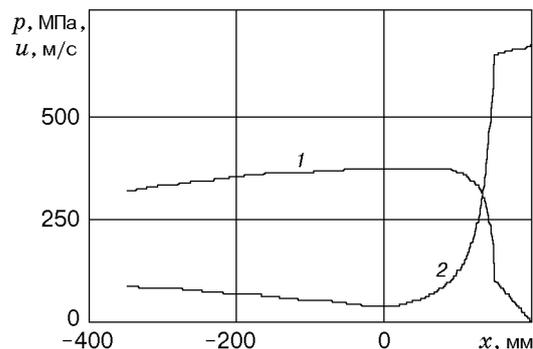


Рис. 5

Рис. 5. Распределение давления и скорости жидкости по длине установки в момент времени $t = 1$ мс:

1 — давление, 2 — скорость

ной постановке существенно зависит от отношения радиусов ствола и сопла $k_R = R_c/R_s$. При отношении радиусов $k_R > 6$ различие результатов, полученных при расчете в разных постановках, не превышает 2%.

Для оценки влияния сжимаемости воды на параметры порохового ИВ проведены расчеты для несжимаемой жидкости. Рассчитывался выстрел ИВ, близкий по параметрам к квазистационарному. В квазистационарном приближении внутренняя баллистика ИВ с несжимаемой жидкостью описывалась системой уравнений

$$\frac{dV_b}{dt} = -u_s F_s, \quad u_s = \sqrt{\frac{2p}{\rho_0}}, \quad u_s F_s = u_g F(x_g). \quad (2)$$

Уравнения (1), (2) решались численно методом Рунге — Кутты. На рис. 4 расчетная зависимость для несжимаемой жидкости показана кривой 3. Видно, что максимальное давление для несжимаемой жидкости почти в 2 раза превышает давление для сжимаемой жидкости. По окончании горения пороха результаты согласуются лучше, а на заключительной стадии совпадают. Аналогично изменяются скорости истечения, однако различие значений меньше. Максимальная скорость истечения для несжимаемой жидкости составляет около 1500 м/с, а для сжимаемой — 1000 м/с. Это явление можно объяснить тем, что для несжимаемой жидкости горение пороха происходит в меньшем объеме и протекает намного интенсивнее. Если выходной радиус сопла больше, например 10 мм, как в экспериментальной установке, то соотношение величин иное. На рис. 2, 3 зависимости давления и скорости для несжимаемой жидкости показаны кривыми 5 и 3 соответственно. Для экспериментальной установки расчеты без учета сжимаемости жидкости дают заниженные значения параметров по сравнению со сжимаемой жидкостью. Максимальное давление на 40%, а скорость истечения на 20% меньше, чем для сжимаемой жидкости. Заниженные значения давления и скорости связаны с тем, что через сопло большего радиуса вытекает больше воды, пороховые газы быстрее расширяются и горение пороха происходит менее интенсивно. Из приведенных примеров следует, что пренебрежение сжимаемостью жидкости может привести как к завышенным, так и к заниженным результатам в зависимости от размеров конкретной установки.

Исследована зависимость максимального давления p_{\max} в водомете и скорости истечения струи u_{\max} от массы пороха для ИВ с отношением радиусов $k_R = 5$. Установлено, что $u_{\max} \sim m_{p0}$, а $p_{\max} \sim m_{p0}^{1,5}$. Например, для пороха массой 180 г скорость истечения составляет 1580 м/с при максимальном давлении 1460 МПа.

В данной работе внутренняя баллистика порохового ИВ рассчитана в нестационарной и квазистационарной постановках. Сравнение с экспериментом и расчетом в нестационарной постановке показало допустимость применения упрощенного квазистационарного приближения, если $R_c/R_s > 6$. Пороховой ИВ достаточно эффективен, его коэффициент превышения давления близок к единице. Оценено влияние сжимаемости жидкости на параметры ИВ. Показано, что пренебрежение сжимаемостью жидкости может привести к большим ошибкам.

Автор выражает благодарность В. И. Губскому за обсуждение результатов экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лаврентьев М. А., Антонов Э. А., Войцеховский Б. В.** Вопросы теории и практики импульсных водяных струй. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1961.
2. **Войцеховский Б. В., Дудин Ю. А., Николаев Ю. А. и др.** Кавитационный эффект в экспоненциальном струйном насадке // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1971. Вып. 9. С. 7–11.
3. **Атанов Г. А.** Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев: Вища шк., 1987.
4. **Cooley W. C., Lucke W. N.** Development and testing of a water cannon for tunnelling // Proc. of the 2nd Intern. symp. on jet cutting technology, Cambridge (England), Apr. 2–4, 1974. BHRA Fluid Engng, 1974. Paper J3.
5. **Петраков А. И., Криворотько О. Д.** Разрушение горных пород импульсными струями // Уголь. 1982. № 3. С. 12–15.
6. **Атанов Г. А.** Оптимизация выстрела импульсного водомета с пороховым приводом // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1993. № 6. С. 156–159.
7. **Atanov G., Gubsky V., Semko A.** The pressure rise factor for powder hydro-cannon // Proc. of the 13th Intern. conf. on jetting technology, Sardinia (Italy), Oct. 29–31, 1996. BHRA Fluid Engng, 1996. P. 91–103.
8. **Атанов Г. А., Губский В. И., Семко А. Н.** Внутренняя баллистика пороховой гидропушки // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1997. № 6. С. 175–179.
9. **Проектирование ракетных и ствольных систем** / Под ред. Б. В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974.
10. **Атанов Г. А.** Расчет выстрела импульсного водомета с учетом волновых процессов // Изв. вузов. Энергетика. 1975. № 3. С. 102–104.
11. **Атанов Г. А., Украинский Ю. Д.** Экспериментальное исследование внутренней баллистики импульсного водомета // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1979. № 3. С. 150–152.
12. **Численное решение многомерных задач газовой динамики** / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
13. **Атанов Г. А.** Расчет выстрела гидропушки методом “распада разрыва” // Гидромеханика: Сб. науч. тр. Киев: Наук. думка, 1974. Вып. 30. С. 51–54.

14. **Атанов Г. А., Семко А. Н.** О соотношении между динамическим давлением ультраструктуры и статическим давлением в установке // Аэрогазодинамика нестационарных процессов: Сб. науч. тр. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1987. С. 9–13.
15. **Хоскин Н. Э.** Метод характеристик для решения уравнений одномерного неустановившегося течения // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 264–291.

*Поступила в редакцию 11/І 1999 г.,
в окончательном варианте — 27/VIІ 1999 г.*
