

УДК 539.374

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ

О. А. Русанова, А. Н. Семко

Предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния корпуса пороховой гидропушки, которая учитывает упруго-пластические деформации, динамику процесса и кавитацию жидкости. При конструировании гидропушек с заданной формой сопла на первом этапе рассчитывается давление жидкости на поверхность сопла в разные моменты времени. Из гидродинамического расчета определяется поле давления и его максимальное значение в процессе выстрела, по величине которого делается оценка внешнего радиуса корпуса гидропушки. На втором этапе в стационарной постановке по заданному давлению рассчитывается напряженно-деформируемое состояние корпуса гидропушки с помощью пакета ANSYS. На третьем этапе проводится динамический расчет напряженно-деформированного состояния корпуса гидропушки численным методом с искусственной вязкостью с учетом упруго-пластических деформаций и нестационарной кавитации. На основании этого расчета делается окончательный вывод о геометрических размерах корпуса гидропушки.

*Ключевые слова:* импульсные струи жидкости, гидропушка, напряженно-деформированное состояние, численные методы, метод с искусственной вязкостью.

**Введение.** Импульсные и пульсирующие высокоскоростных струи жидкости имеют много практических приложений и хорошие перспективы дальнейшего использования. В частности они используются для высокоскоростной резки металлов, при обработке труднообрабатываемых материалов, фрагментации, разрушении горных пород. Все перечисленное становится возможным благодаря большому кратковременному давлению импульсной струи.

Наиболее распространенной конструкцией для получения импульсных высокоскоростных струй жидкости является гидропушка. При выстреле в гидропушке создается высокое давление, которое приводит к возникновению напряжений в корпусе близких к пределу прочности [1-3]. Например, давление в корпусе гидропушки [4] составляет 1,4 ГПа, динамическое давление головы струи – 5,6 ГПа, скорость водяной струи – 3000 м/с.

Импульсные технологии не получили широкого распространения по причине низкой мобильности и надежности, что является следствием пренебрежения при расчетах импульсным характером процессов, динамикой, упруго-пластическими деформациями. В данной работе приводится методика расчета напряжений в корпусе пороховой гидропушки, которая учитывает упруго-пластические деформации, динамику процесса и кавитацию жидкости.

**Математическая модель пороховой гидропушки.** Характерной особенностью выстрела гидропушки традиционной конструкции с поршневым приводом является резкое уменьшение скорости истечения струи сразу же после начала истечения. В экспериментах было обнаружено, что струя пороховой гидропушки эффективно разрушает преграду и имеет большую дальность, что позволяет расширить применение пороховой гидропушки, которая является объектом исследования в настоящей работе.

Пороховая гидропушка по сравнению с пневматической обладает следующими существенными преимуществами: простота конструкции, малые габариты и масса, большая удельная мощность, обусловленная компактным источником энергии, и возможность существенного увеличения дальности. Источником энергии в пороховой гидропушке являются продукты сгорания пороха. Пороховая гидропушка (рис. 1) состоит из камеры сгорания 1, цилиндрического ствола 3, в котором между пыжами 6 находится водяной заряд 2, сужающегося сопла 4, которое заканчивается цилиндрическим коллиматором 5. Процесс в такой гидропушке начинается с момента воспламенения пороха с помощью капсюля 7. Пороховые газы приводят в движение водяной заряд и разгоняют его в стволе. При втекании в сужающееся сопло вода продолжает ускоряться, увеличивая скорость многократно, и истекает наружу с большой скоростью. Обычно сопло заканчивается коллиматором – цилиндрическим участком, который служит для стабилизации струи и выравнивания скорости по ее длине.

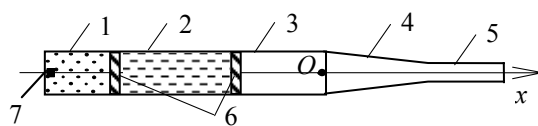


Рис. 1. Пороховая гидропушка

Математическая модель пороховой гидропушки обычно строится при следующих допущениях:

- жидкость считается идеальной и сжимаемой, вязкостью, теплопроводностью и радиальным течением пренебрегается (квазиодномерное приближение) [1, 5];
- влияние пыжей не учитывается;
- граница раздела “пороховые газы - вода” считается плоской в течение всего выстрела.

За начальный принимается момент воспламенения пороха. Начало координат расположено у входа в сопло, ось  $x$  направлена вдоль оси установки.

В принятой постановке квазиодномерное движение воды в пороховой гидропушке описывалось системой уравнений нестационарной газовой динамики [5, 6]

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho v F}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho v F}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v^2 + p) F}{\partial x} = p \frac{dF}{dx}, \quad (1)$$

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

с начальными и граничными условиями

$$v(0, x) = 0, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0, \quad x_{g0} \leq x \leq x_{f0}; \quad (2)$$

$$p(t, x_f) = 0, \quad p(t, x_g) = p_g, \quad v(t, x_g) = v_g, \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $x$  – координата,  $v$  – скорость,  $F$  – площадь поперечного сечения сопла,  $p$  и  $\rho$  – давление и плотность,  $B = 304,5$  МПа,  $n = 7,15$ ,  $\rho_0 = 1$  г/см<sup>3</sup> – постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта,  $x_{g0}$ ,  $x_{f0}$  и  $x_g$ ,  $x_f$  – начальные и текущие координаты контактной и свободной поверхностей,  $p_g$  и  $v_g$  – давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности.

Горение пороха рассматривалось в квазистационарном приближении при допущениях, характерных для задач внутренней баллистики в артиллерии [8]:

- порох воспламеняется мгновенно и горит адиабатически параллельными слоями по геометрическому закону;
- химический состав продуктов сгорания постоянный;
- параметры продуктов сгорания одинаковые по объему и связаны упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса, учитывающим только собственный объем молекул.

Система уравнений и начальные условия, описывающие квазистационарное горение пороха, имеют вид

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1 p_g}{h_1}, \quad Q_g = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{u_1 p_g}{h_1},$$

$$\frac{1}{k-1} \frac{d(p_g V_g)}{dt} + p_g F u_g = q Q_g, \quad (4)$$

$$\frac{dV_g}{dt} = Q_g (1/\rho_p - \alpha) + v_g F, \quad v_g = \frac{dx_g}{dt},$$

$$z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad p_g = p_{g0}, \quad x_g = x_{g0}.$$

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;  $\chi_1$  и  $\sigma(z)$  – коэффициент и функция, зависящие от формы порохового зерна; например, для зерна трубчатой формы  $\chi_1 = 1 + h_1/c$ ,  $\sigma(z) = 1 - 2h_1 z / (c + h_1)$ ;  $c$  – половина длины порохового зерна;  $\alpha$  – коэффциент (поправка на собственный объем молекул);  $m_{p0}$  – начальная масса пороха;  $k$  – показатель адиабаты пороховых газов;  $q$  и  $\rho_p$  – удельная теплота сгорания и плотность пороха;  $V_g$  – объем пороховых газов;  $V_{g0}$ ,  $p_{g0}$  – параметры газа после срабатывания воспламенителя.

Осесимметричное напряженно-деформируемое состояние корпуса гидропушки описывается следующими уравнениями в лагранжевой форме

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\sigma_{xy}}{y} = \rho \ddot{x}, \quad \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\sigma_{yy} - \sigma_{\theta\theta}}{y} = \rho \ddot{y},$$

$$\sigma_{xx} = -p + s_{xx}, \quad \sigma_{yy} = -p + s_{yy}, \quad \sigma_{\theta\theta} = -p + s_{\theta\theta},$$

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\dot{y}}{y}, \quad \dot{E} = -p \dot{V} + V (s_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + s_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + s_{\theta\theta} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + \sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy}), \quad (5)$$

$$\dot{s}_{xx} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + \delta_{xx}, \quad \dot{s}_{yy} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right) + \delta_{yy}, \quad \dot{s}_{xy} = 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xy} - \frac{1}{3} \frac{\dot{V}}{V} \right),$$

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial y}, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{\dot{y}}{y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial x},$$

где  $x, y$  – осевая и радиальная пространственные координаты,  $\rho$  – плотность,  $V$  – относительный объем,  $p$  – гидростатическое давление,  $E$  – внутренняя энергия на единицу объема,  $\sigma_{ii}, s_{ii}, \varepsilon_{ii}, i = x, y, \theta$  – соответственно полные напряжения, компоненты деватора напряжений и деформации,  $\sigma_{xy}$  – касательное напряжение,  $\delta$  – поправка на поворот ячейки разностной сетки. Точка над величинами, входящими в уравнения, означает производную по времени вдоль траектории частицы.

Данная система уравнений замыкается уравнением состояния в форме Тэта

$$p = nB(\rho/\rho_0 - 1) + e(n-1)\rho,$$

где  $B$  – постоянная Тэта,  $n$  – показатель адиабаты,  $\rho_0$  – плотность при нормальных условиях.

Будем считать, что при выполнении неравенства Мизеса, материал переходит в пластическую стадию, а эквивалентные напряжения становятся равными пределу текучести и остаются постоянными при выполнении указанного условия

$$\sigma_{eq} = \sqrt{1/2((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2)} \leq [\sigma], \quad (6)$$

$\sigma_i, i = 1, 2, 3$  – главные напряжения,  $[\sigma] = 1520$  МПа – предел текучести.

**Методика расчета параметров гидропушки.** Данная методика предназначена для расчета напряженно-деформированного состояния корпуса гидропушки или других гидроимпульсных устройств при неоднородных динамических нагрузках, с заданной геометрией проточной части установки и максимальных значениях гидродинамических параметров. Методика расчета основана на математической модели, приведенной в предыдущем пункте, и учитывает упруго-пластические деформации, динамику процесса, кавитацию жидкости и справедлива в рамках нелинейной теории упругости. Данная методика позволяет получить поля всех главных и эквивалентных напряжений, интенсивность напряжений, а также распределение давления жидкости по длине установки и скорость истечения струи в любой момент времени. Результаты расчетов могут быть использованы для рационального конструирования гидроимпульсных устройств.

При конструировании гидроимпульсных устройств на первом этапе рассчитываются гидродинамические параметры и определяется давление воды на поверхность сопла и ствола установки в разные моменты времени. По этим расчетам определяется максимальное давление воды в процессе выстрела, по которому делается оценка внешнего радиуса корпуса гидропушки на основании теории сопротивления материалов для толстостенного цилиндра. Кроме того, находится распределение давления по поверхности установки на этот момент. На втором этапе в стационарной постановке рассчитывается напряженно-деформированное состояние корпуса установки при помощи пакета ANSYS по распределению давления и размерам корпуса, полученным на предыдущем этапе. Расчетные значения напряжений сравниваются с пределом текучести материала корпуса. На основании этого анализа корректируются внешние размеры корпуса конструкции, и проводится повторный расчет напряженного состояния.

На третьем этапе проводится динамический расчет напряженно-деформированного состояния корпуса установки численным методом с искусственной вязкостью с учетом упруго-пластического характера деформации и нестационарной кавитации. На основании этого расчета делается окончательное заключение о размерах устройства.

Для расчета гидродинамических параметров гидропушки нужно задать длину разгона водяного заряда, массу воды, длину водяного заряда, координаты свободной поверхности воды и границы газ-вода. Кроме того, следует задать показатель адиабаты, плотность при нормальных условиях и постоянную Тэта для воды, а также критические значения плотности и давления при которых возникает кавитация. Для построения геометрии проточной части установки необходимы значения координат узловых точек сопла, радиусы ствола и частей сопла, длина частей сопла и коллиматора.

По заданным значениям координат вычисляются объем и плотность

$$\Delta V_{i+1/2} = \frac{\Delta x_{i+1/2}}{3} (F_i + F_{i+1} + \sqrt{F_i \cdot F_{i+1}}),$$

$$\rho_i^j = \frac{(\rho \Delta V)_{i-1/2}^j + (\rho \Delta V)_{i+1/2}^j}{\Delta V_{i-1/2}^j + \Delta V_{i+1/2}^j}.$$

где  $F_i$  – площадь поперечного сечения.

Искусственная вязкость определяется по формуле

$$q_{i+1/2}^{j+1/2} = \begin{cases} \rho_{i+1/2}^{j+1/2} \left( \lambda_1 a_{i+1/2}^{j+1/2} |u_{i+1}^{j+1/2} - u_i^{j+1/2}| + \lambda_2 (u_{i+1}^{j+1/2} - u_i^{j+1/2})^2 \right), & u_{i+1}^{j+1/2} - u_i^{j+1/2} \geq 0; \\ 0, & u_{i+1}^{j+1/2} - u_i^{j+1/2} < 0; \end{cases}$$

Тогда давление и энергия определяются соответственно как

$$e_{i+1/2}^{j+1} = e_{i+1/2}^j - \Delta t^j \left( \frac{p+q}{\rho} \right)_{i+1/2}^j \left( \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x_{i+1/2}} + \frac{u_{i+1} + u_i}{2\Delta x_{i+1/2}} \ln \frac{F_{i+1}}{F_i} \right)_{i+1/2}^{j+1/2},$$

$$p_{i+1/2}^{j+1} = \begin{cases} n_{жид} B_{жид} \left( \rho_{i+1/2}^{j+1} / \rho_{0жид} - 1 \right) + (n_{жид} - 1) \rho_{i+1/2}^{j+1} e_{i+1/2}^{j+1}, & \rho_{i+1/2}^{j+1} \geq \rho_{kr}; \\ p_{kr}, & \rho_{i+1/2}^{j+1} < \rho_{kr}. \end{cases}$$

Используя, полученные значения находим скорости и координаты как

$$u_i^{j+1} = u_i^j - 2\Delta t^j \frac{(p+q)_{i+1/2}^j - (p+q)_{i-1/2}^j}{(x_{i+1} - x_{i-1})\rho_i^j},$$

$$x_i^{j+1} = x_i^j + u_i^{j+1/2} \Delta t^j, \quad \rho_{i+1/2}^{j+1} = \rho_{i+1/2}^j \frac{\Delta x_{i+1/2}^j}{\Delta x_{i+1/2}^{j+1}}.$$

Здесь  $\rho_i^n$  – плотность, отнесенная к основному узлу  $i$ , которая определяется как среднее с весом;  $\Delta V_{i+1/2}$  – объем ячейки в форме усеченного конуса. Оптимальные значения коэффициентов линейной и квадратичной вязкости, подобранные экспериментально для гидропушки, равны  $\lambda_1 = 3$  и  $\lambda_2 = 10$ .

Далее необходимо провести расчет напряженно-деформированного состояния корпуса гидропушки при помощи программы ANSYS/Structural. На данном этапе производится предварительная оценка параметров конструкции гидропушки по стационарному распределению давления, полученного при гидродинамическом расчете.

Расчет гидропушки в программном комплексе ANSYS для пользователей имеющих опыт работы с этой программой не представляет особых трудностей. В виду симметрии данную задачу удобно решать в осесимметричной постановке. Заметим, что в качестве элемента рекомендуется выбрать PLANE82, который позволяет решать задачи в такой постановки, и кроме этого обладает свойствами пластичности. Кроме того, данный элемент обладает более чем одной формой, что позволяет создать преимущественно прямоугольную сетку и использовать треугольные элементы, там, где это сделать невозможно. Для того, что бы задать переменное по координате давление удобно воспользоваться функцией в виде \*SET,PAR, координата, величина давления. В результате расчета можно получить поле напряжений по Мизесу (6).

Расчетные значения напряжений сравниваются с пределом текучести материала корпуса. Определяются зоны, в которых эквивалентные напряжения далеки от предела текучести, и внешние размеры корпуса в местах расположения этих зон уменьшается. Таким способом корректируются внешние размеры гидроимпульсной установки, и осуществляется оптимизация ее массогабаритных параметров. Проводится повторный расчет напряженного состояния.

Затем выполняется расчет напряженно-деформированного состояния корпуса гидропушки при помощи численного метода с искусственной вязкостью. На этом этапе проводится расчет конструкции гидропушки с размерами, определенными в предыдущем пункте, с учетом упруго-пластических деформаций, импульсного характера нагрузки и нестационарной кавитации.

Для расчета напряженно-деформированного состояния необходимо задать следующие постоянные: показатель адиабаты, плотность материала при нормальных условиях, постоянную Гэта для материала конструкции, модуль сдвига, коэффициент Пуассона, предел текучести. Аппроксимация уравнений (5) проводится так же как описано в пункте 2.1 [9].

Поля главных напряжений по Мизесу и интенсивности напряжений удобно анализировать, если результаты представлены в графическом виде. Для этого используется пакет MatLab 7. На основании данных расчета делается заключение о дальнейшей возможности изменения параметров конструкции. Для того, что бы убедиться в безопасности полученной конструкции, необходимо повторить описанную в этом пункте процедуру для измененной геометрии и после анализа полученных результатов сделать окончательный вывод о надежности конструкции.

**Анализ результатов расчета.** Для примера рассмотрим пороховую гидропушку, описанную в [10]. Процессы в гидропушке начинаются с момента воспламенения пороха. Пороховые газы приводят в движение водяной заряд, появляется давление в жидкости, которое вызывает напряжения в корпусе. На основании гидродинамического расчета были получены распределения давления по длине установки на различные моменты времени. Наибольшие давления возникают в моменты времени 0,7-0,75 мс, максимальное давление достигает величины порядка 1400 МПа (рис. 2).

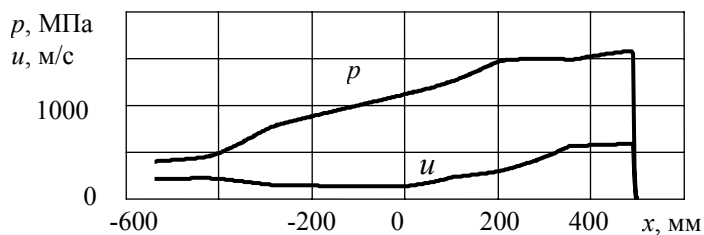


Рис. 2. Распределение давления и скорости истечения вдоль длины установки,  $t = 0,75$

Далее, проведем расчет напряженно-деформированного состояния корпуса гидропушки, считая, что в любой момент времени распределение давления имеет вид, приведенный на рис. 2, т.е. по максимально-стационарному распределению давления, полученному на основании гидродинамического расчета течения внутри гидропушки. Результаты расчетов, полученные с помощью коммерческого пакета ANSYS, показывают, что максимальные напряжения, возникающие в корпусе, равны 1050 МПа. Зона с большими напряжениями незначительна, и казалось бы можно под корректировать внешние размеры. Однако, динамический расчет приведенный на рис. 3, показывает, что напряжения, полученные по статическому распределению меньше максимального значения напряжения при динамическом расчете на 30 %.

Зона с опасными напряжениями, по статическому расчету, также меньше зоны при динамическом

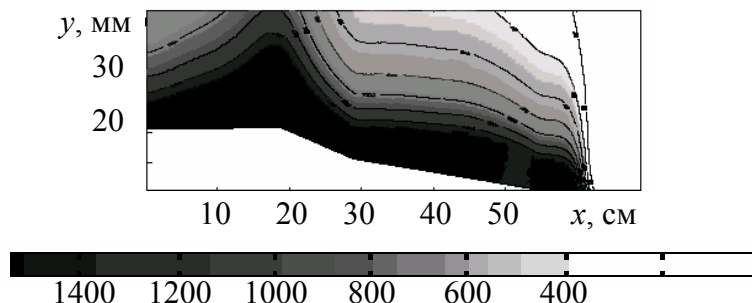


Рис. 3. Динамический расчет методом с искусственной вязкостью,  $t = 0,75$  мс

расчете. На данном примере, наглядно видна необходимость учета динамики процесса.

**Заключение.** В данной работе приведена методика расчета напряжений корпуса пороховой гидропушки, которая учитывает упруго-пластические деформации, динамику процесса и кавитацию жидкости. На основании данной методики рассчитана пороховая гидропушка широкого спектра действия. Показана работоспособность алгоритма и обоснована необходимость учета динамики процесса.

## РЕЗЮМЕ

Методика розрахунку порохової гідрогармати, яка враховує пружно-пластичні деформації, динаміку процесу та кавітацію рідини представлена у даній роботі. Для конструювання гідроімпульсних приладів з заданою формою проточної частини на першому етапі розраховується тиск води на внутрішню поверхню приладу на різні моменти часу. Визначається максимальний тиск води у процесі вистрілу, по якому робиться оцінка зовнішнього радіуса на підставі формул опору матеріалів для товстостінного циліндру. Також, знаходиться розподіл тиску на поверхню установки на цей момент часу. На другому етапі у стаціонарній постановці розраховуються напружено-деформований стан за допомогою пакету ANSYS за розподілом тиску і розмірами корпусу, які отримані на попередньому етапі. На третьому етапі проводиться динамічний розрахунок напружено-деформованого стану чисельним методом зі штучною в'язкістю з урахуванням пружно-пластичних деформацій і нестационарної кавітації. На підставі цього розрахунку робиться остаточний висновок про розміри пристрою.

*Ключові слова:* гідрогармата, напружено-деформований стан, методом зі штучною в'язкістю.

## SUMMARY

The principles of calculation of powder hydrocannon are presented. For design of hydrocannon devices for given form of running part on the first stage the pressure of the water on inside surface of devise is calculated at different time. The maximum value of pressure during the shot is determined and the approximate value of outer radius is calculated on the basis of the strength of materials theory. On the second stage the deflected mode is defined by ANSYS according to stationary distributing of pressure and radius which obtained earlier. When the correction of the dimensions are done. And finally, the dynamic calculation of the deflected mode is realised by numerical method with artificial viscosity taking into account plasto-elastic deformation, the dynamic of the process, cavitation of the liquid. The experimental hydrocannon is elaborated.

*Keywords:* hydrocannon, deflected mode, method with artificial viscosity.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ**

1. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород / Г. А. Атанов – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.
2. Прочностной расчет и оптимизация ствола пороховой гидропушки / Е. С. Гескин, О. П. Петренко, О. А. Русанова, А. Н. Семко // Проблемы прочности. – 2006. – № 2. – С. 137-146.
3. Семко А. Н. Расчет течения жидкости в гидропушке численным методом с искусственной вязкостью / А. Н. Семко // Прикладная гидромеханика. – 2000. – Т. 2, № 74. – С. 88-91.
4. Cooley W. C. Advances in the technology of fluid jets: past, present and targets for the 21st century / W. C. Cooley // Proc. of the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, WJTSJ. – Tokyo (Japan). – 1998. – P. 1-8.
5. Атанов Г. А. Внутренняя баллистика пороховой гидропушки / Г. А. Атанов, А. Н. Губский, А. Н. Семко // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 1997. – № 6. – С. 191-194.
6. Atanov G. A. The powder water cannon / G. A. Atanov, A. N. Semko // Proc. of the Int. Summer Science School on High-Speed Hydrodynamics (HSH 2002). – Cheboksary (Russia), Washington (USA). – 2002. – P. 419-424.
7. Glenn L. A. The mechanics of the impulsive water cannon / L. A. Glenn // Comp. Fluids. – 1975. Vol. 3. – P. 197-215.
8. Peculiarities of the powder water cannon operation / G. A. Atanov, A. N. Semko, O.P. Petrenko et al. // Proc. of the ASME Int. Mechanical Engineering Congress & Exp. – Washington (USA). – 2003. – P. 1-11.
9. Уилкинс М. Л. Расчет упруго пластических течений / М. Л. Уилкинс // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212-263.
10. Пороховая гидропушка широкого спектра действия / Г. А. Атанов, Э. С. Гескин, А. Н. Ковалев, А. Н. Семко // Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т. 6 (78), № 3. – С. 3-9.

*Поступила в редакцию 14.05.2010 г.*