

УДК 532.525.2:518.5

© 2002 г. Г.А. АТАНОВ, А.Н. СЕМКО

РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНОЙ СТРУИ ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ ПОД ВОДОЙ

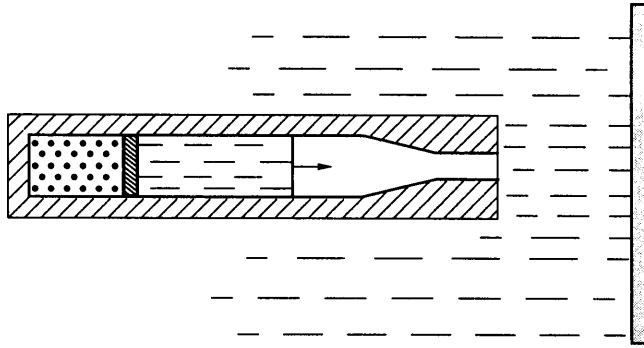
Представлены результаты численного исследования импульсной затопленной струи воды, истекающей из сопла пороховой гидропушки. Построена математическая модель процесса, приведены результаты расчетов для гидропушки конкретной конструкции. Течение воды в гидропушке рассматривалось в квазиодномерной постановке, а распространение и взаимодействие затопленной струи с преградой – в осесимметричной. Показано, что внешние условия практически не влияют на параметры гидропушки, а максимальное давление импульсной струи на преграду близко к начальному скоростному напору струи для разных расстояний до преграды.

Взаимодействие импульсных струй жидкости с преградой под водой исследовалось экспериментально и теоретически на модельных задачах [1–3]. Эти результаты экспериментов и расчетов показали эффективность импульсных струй под водой. В то же время развитие этих исследований требует более глубокого понимания протекающих при этом процессов, в частности взаимодействия затопленной импульсной струи с преградой. Теоретические и экспериментальные исследования малогабаритной гидропушки с пороховым приводом, которая может быть использована для разрушения конкретных объектов как на воздухе, так и под водой, показали ее эффективность в различных условиях [4].

В настоящей статье теоретически исследуется взаимодействие с преградой затопленной импульсной струи жидкости, истекающей из сопла реальной гидропушки с пороховым приводом. Здесь сохранены параметры экспериментальной установки, на которой проводились исследования [4].

1. Импульсная гидропушка с пороховым приводом, конструкция которой описана в [4], своим торцом выходит в объем, заполненный водой, как показано на фиг. 1. В жидкости на некотором расстоянии от торца установки перпендикулярно к ее оси расположена плоская жесткая преграда. Сопло гидропушки закрыто тонкой диафрагмой от проникания в него внешней жидкости. В начальный момент пороховой заряд поджигается. Пороховые газы ускоряют воду в гидропушке, и она истекает в виде затопленной импульсной струи. Оценим действие струи на преграду в зависимости от расстояния между преградой и установкой.

В задаче можно выделить два этапа: 1) втекание жидкости в сопло гидропушки; 2) истечение импульсной струи воды. На первом этапе движение жидкости происходит только внутри установки. На втором этапе часть жидкости продолжает двигаться внутри установки, а другая ее часть в виде затопленной струи истекает из сопла. Движение жидкости внутри гидропушки с достаточной точностью описывается в квазиодномерном приближении, что существенно упрощает решение задачи [4–6]. Истечение импульсной струи жидкости должно рассматриваться только в осесимметричной постановке. Эти особенности течения учтем при построении математической модели процесса, который описывается в газодинамическом приближении.



Фиг. 1. Схема установки

Жидкость считается идеальной и сжимаемой, влияние воздуха в сопле и диафрагме в выходном сечении не учитывается. В принятой постановке квазиодномерное изоэнтропическое течение жидкости в гидропушке описывается системой уравнений нестационарной газовой динамики при заданных начальных и граничных условиях [4–6]:

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \frac{\partial \rho u F}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{n}{n-1} \frac{p+B}{\rho} \right) = 0 \quad (1.1)$$

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

$$u(0, x) = 0, \quad p(0, x) = 0, \quad -(L + L_f) \leq x \leq -L_f \quad (1.2)$$

$$p(t, x_f) = 0 \quad (1.3)$$

$$p(t, x_g) = p_g, \quad u(t, x_g) = u_g \quad (1.4)$$

Здесь t – время; x – координата; u , p и ρ – скорость, давление и плотность; F – площадь поперечного сечения сопла; L – длина водяного заряда; L_f – начальное расстояние от свободной поверхности водяного заряда до входа в сопло, где расположено начало координат; x_f и x_g – координаты свободной и контактной (пороховые газы – вода) поверхностей; p_g и u_g – давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности. Граничное условие (1.3) соответствует свободной поверхности и ставится только при втекании жидкости в сопло, когда эта поверхность существует. Когда вода достигает выходного сечения установки и начинается истечение струи, то никакие граничные условия в этом сечении не ставятся; на этом этапе совместно решается задача течения жидкости внутри и снаружи установки.

Распространение затопленной струи жидкости и взаимодействие ее с преградой в осесимметричной постановке описывается уравнениями с начальными и граничными условиями

$$\frac{\partial \mathbf{r}\mathbf{a}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{r}\mathbf{b}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{r}\mathbf{c}}{\partial r} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{a} = \{\rho, \rho u, \rho v\}^T, \quad \mathbf{b} = \{\rho u, p + \rho u^2, \rho uv\}^T \quad (1.5)$$

$$\mathbf{c} = \{\rho v, \rho uv, p + \rho v^2\}^T, \quad \mathbf{f} = \{0, 0, p\}^T$$

$$u(0, x, r) = 0, \quad v(0, x, r) = 0, \quad p(0, x, r) = p_a, \quad 0 < x \leq L_T, \quad r \geq 0 \quad (1.6)$$

$$u(t, x, r) = 0, \quad v(t, x, r) = 0, \quad p(t, x, r) = p_a, \quad 0 \leq x \leq L_T, \quad r \rightarrow \infty \quad (1.7)$$

$$u(t, 0, R_S) = 0, \quad r > R_S, \quad u(t, L_T, r) = 0, \quad r > 0 \quad (1.8)$$

Здесь x и r – осевая и радиальная координаты; u и v – осевая и радиальная компоненты скорости; p_a – начальное давление жидкости; L_T – расстояние от гидропушки до преграды, R_S – радиус выходного сечения сопла гидропушки. Начало цилиндрической системы координат для этой области располагается на оси гидропушки в выходном сечении. На срезе сопла гидропушки решения для двух расчетных областей сшиваются.

Горение пороха рассчитывается в квазистационарном приближении при допущениях, характерных для задач внутренней баллистики в артиллерии [7]: порох воспламеняется мгновенно и горит адиабатически параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания постоянный, их параметры одинаковы по объему; параметры состояния пороховых газов связаны упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса, учитывающим только собственный объем молекул. Система уравнений и начальные условия, описывающие квазистационарное горение пороха, задаются в виде

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{u_1 p_g}{h_1}, \quad Q_g = \frac{dm_g}{dt} = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{dz}{dt} \\ \frac{1}{k-1} \frac{d(p_g V_g)}{dt} + p_g F u_g &= q Q_g \\ \frac{dV_g}{dt} &= Q_g (1/\rho_p - \alpha) + u_g F, \quad u_g = \frac{dx_g}{dt} \\ z=0, \quad V_g &= V_{g0}, \quad m_g = m_{g0}, \quad p_g = p_{g0}, \quad x_g = -L \end{aligned} \quad (1.9)$$

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; χ_1 и $\sigma(z)$ – коэффициент и функция, зависящие от формы порохового зерна; для зерна трубчатой формы $\chi_1 = 1 + h_1/c$, $\sigma(z) = 1 - 2h_1z/(c + h_1)$; c – половина длины порохового зерна; α – поправка на собственный объем молекул; m_g – масса газа; m_{p0} – 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.

2. Поставленная задача (1.1) – (1.9) решалась конечно-разностным методом Годунова [8], обобщенным на случай нестационарных квазиодномерных и осесимметричных течений жидкости [4, 5, 9, 10]. Течение рассчитывалось с момента воспламенения пороха до окончания вытеснения жидкости из сопла гидропушки.

Расчетная сетка состояла из двух частей: подвижной и регулярной внутри установки и неподвижной прямоугольной в наружном объеме жидкости. Сетка внутри гидропушки перестраивалась по мере движения свободной и контактной поверхностей. Шаг сетки через шаг по времени определялся по формуле $h^{\tau} = (x^f - x^g)/N$, где x^f и x^g – координаты свободной и контактной поверхностей через шаг по времени; N – число расчетных ячеек. Когда свободная поверхность достигала среза сопла, ее координата фиксировалась, а перемещалась только контактная поверхность. При истечении струи объем жидкости внутри установки и соответственно шаги сетки уменьшались. Когда шаг сетки становился меньше заданного, две соседние ячейки объединялись в одну, параметры в которой определялись усреднением с весом. В расчетах использовались сетки с начальным числом ячеек N , равным 128, 256 и 512.

Распространение и взаимодействие импульсной затопленной струи жидкости с преградой рассчитывалось на прямоугольной сетке с одинаковыми шагами по обоим направлениям. Использовались сетки с $h = R_S/8, R_S/16, R_S/24$. Детализация течения проводилась на мелких сетках, длительные процессы рассчитывались на более крупных сетках. Границы расчетной области, на которых ставились условия на бесконечности, удалялись на такое расстояние, чтобы их влияние не сказывалось в центре преграды за расчетное время процесса.

При расчете вблизи оси симметрии использовалась улучшенная аппроксимация [11], опробованная на модельной задаче [3]. Считается, что разностная схема, построенная на основе однородных уравнений (1.5), дает менее точные результаты, чем схема, использующая неоднородные уравнения вида

$$\frac{da}{dt} + \frac{db}{dx} + \frac{dc}{dr} = f, \quad f = \frac{1}{r} \{ \rho v, \rho u v, \rho v^2 \}^T \quad (2.1)$$

В отличие от системы (1.5) уравнения (2.1) все неоднородные, и соответствующая разностная схема является полностью неконсервативной [12]. Все законы сохранения в разностной форме для такой схемы выполняются приближенно. Однако этот недостаток схемы часто игнорируют, если вопрос стоит о точности результатов вблизи оси симметрии. Расчеты, проведенные на модельной задаче [3], полностью подтвердили эти соображения, в них контролировался баланс массы и энергии. Дисбаланс величин для двух видов аппроксимации был одного порядка и не превышал 0.5%.

При исследовании длительных процессов использовались так называемые "неотражающие" условия [13], которые слабо влияют на параметры течения вблизи преграды. Для реализации таких условий вводился фиктивный слой приграничных ячеек, параметры в которых задавались несколькими способами: 1) $f_F = f_\infty$, 2) $f_F = f_G$, 3) $f_F = 2f_G - f_{G-1}$, где индексы "F" и "G" относятся к фиктивной и граничной ячейкам [3]. При расчетах использовалось второе условие, соответствующее равенству текущих параметров в фиктивной и граничной ячейках, которое меньше всего влияло на параметры течения.

Для стыковки расчетных сеток в коллиматоре гидропушки (цилиндрический участок, которым заканчивается сопло) вводилась неподвижная переходная область, течение жидкости в которой описывалось в осесимметричной постановке. Справа по торцу коллиматора эта область граничила с внешним объемом жидкости, в котором движение также предполагалось осесимметричным. Слева от сечения, проходящего по середине коллиматора, переходная область стыковалась с объемом жидкости внутри гидропушки, в котором течение принималось квазиодномерным. Параметры на правой границе переходной области рассчитывались по единому алгоритму, как для обычных внутренних ячеек.

Расчет на левой границе переходной области производился по особому алгоритму. Распад произвольного разрыва на этой границе рассчитывался для каждой отдельной ячейки справа и единственной ячейки слева от границы. "Большие величины", необходимые для нахождения параметров течения, определялись из равенства потоков массы и импульса в этом сечении:

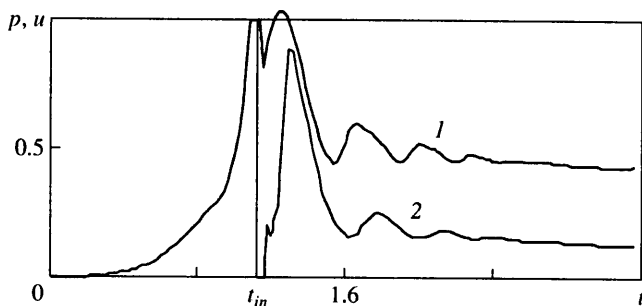
$$F_L = (\sum F_{p_{j+1/2}} S_{j+1/2}) (\sum S_{j+1/2})^{-1}, \quad F = \{RU, RU^2, P\}^T$$

где F_L и F_p – значения вектора больших величин слева и справа от границы; R, U, P – плотность, осевая скорость и давление на границе после распада произвольного разрыва; $S_{j+1/2} = \pi(r_{j+1}^2 - r_j^2)$ – площадь кольца; r_j – расстояние от узла сетки с номером j до оси x .

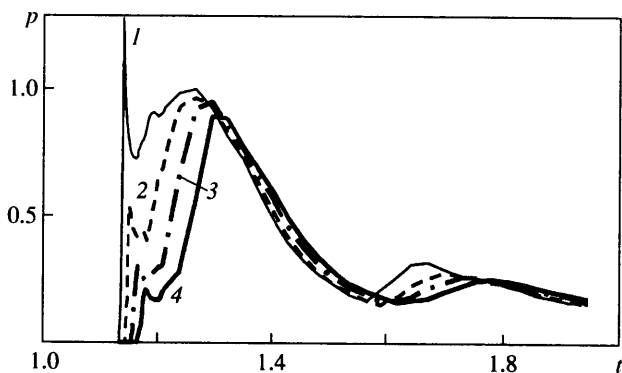
Исследования движения жидкости в круглой трубе радиусом R_s с внезапным расширением площади поперечного сечения трубы показали, что на расстоянии, большем, чем $5R_s$, течение является практически одномерным [14]. Из этих соображений выбирались длины коллиматора и переходной области.

Расчет выстрела гидропушки проводился в такой последовательности. Сначала определялся разгон водяного заряда в стволе и втекание воды в сопло установки. При достижении передним фронтом воды среза сопла происходил удар о неподвижную массу внешней жидкости. С этого момента течение внутри и снаружи установки рассчитывалось совместно. В коллиматоре вводилась переходная расчетная область длиной $5R_s$. Параметры в ячейках этой области задавались равными параметрам жидкости в момент удара.

3. Ниже приведены результаты расчетов для пороховой гидропушки с параметрами [4]: 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 конуса 13°, масса водяного заряда 400 г. Использовался трубчатый порох массой 100 г с характеристиками: постоянная скорости горения $u_1 = 0.83$ м/(с · ГПА), удельная теплота сгорания $q = 3.62$ МДж/кг, плотность пороха $\rho_p = 1.6$ г/см³, показатель адиабаты $k = 1.235$; поправка на собственный объем



Фиг. 2. Зависимости давления (2) в центре преграды и скорости истечения струи (1) от времени t , мс



Фиг. 3. Зависимости давления p от t на преграде для разных расстояний до преграды: 1–4 для $L_T = 2, 4, 6$ и $8R_S$

молекул $\alpha = 0.001 \text{ м}^3/\text{кг}$; геометрические размеры порохового зерна $h_1 = 0.16 \text{ мм}$; $c = 1.075 \text{ мм}$. Начальные параметры пороховых газов после срабатывания воспламенителя составляли: $p_{g0} = 5 \text{ МПа}$, $V_{g0} = 72.5 \text{ см}^3$, $m_{g0} = 0.424 \text{ г}$. Начальное давление воды 1 МПа , что соответствует глубине погружения установки на 100 м .

На фиг. 2 кривая 1 изображает зависимость скорости втекания (скорость свободной поверхности жидкости) и истечения струи из сопла от времени. Кривая 2 дает зависимость давления от времени в центре преграды, находящейся на расстоянии $L_T = 8R_S$ от гидропушки. Скорость отнесена к начальной скорости истечения u_0 , а давление – к скоростному напору $p_0 = \rho_0 u_0^2 / 2$.

В истечении струи пороховой гидропушки можно выделить две стадии: короткую инерционную, характерную для гидропушек, и длинную экструзионную, свойственную импульсным водометам [5]. Струя начинает истекать в момент времени $t_{in} = 1.13 \text{ мс}$ с начальной скоростью $u_0 = 1140 \text{ м/с}$. При ударе струи о наружную жидкость возникает ударная волна с давлением на фронте $p_{ud} = 2.42$ (1580 МПа). Скорость истечения струи резко уменьшается. Но разгрузка через торцевое сечение, вызванная интенсивным радиальным течением жидкости, и напор втекающей в сопло воды приводят к увеличению скорости истечения. На графике этой стадии процесса соответствует провал на кривой для скорости. Горение пороха еще продолжается до времени $t = 1.28 \text{ мс}$, поэтому скорость истечения увеличивается. На этом высокоскоростная инерционная стадия истечения струи заканчивается и начинается экструзионная стадия: выдавливание жидкости пороховыми газами из сосуда через

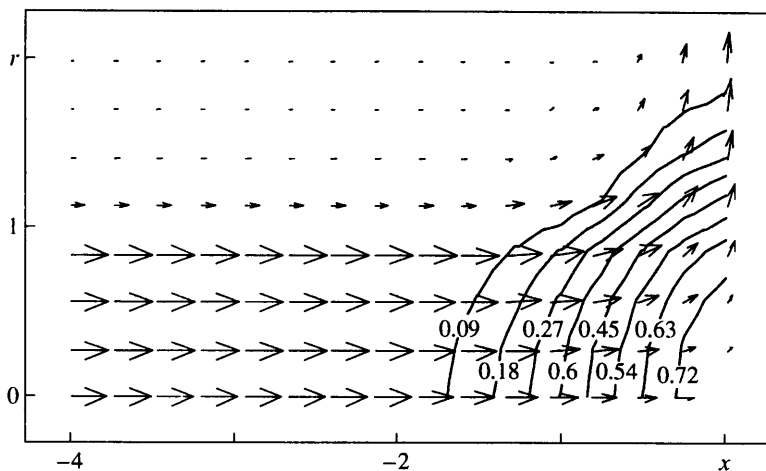
отверстие. После сгорания пороха скорость истечения струи быстро уменьшается почти в 2 раза. На этой стадии скорость истечения струи и давление жидкости на преграду, рассчитанные по стационарному уравнению Бернулли, соответствуют давлению пороховых газов. Например, к завершению расчета ($t = 3.16$ мс) давление пороховых газов составляет около $p_g = 96$ МПа, скорость истечения струи $u_s = 494$ м/с, скоростной напор струи $p_c = 122$ МПа ($0.188 p_0$). Давление на преграде мало отличается от скоростного напора струи. Можно отметить, что сжимаемость жидкости на этой фазе истечения проявляется слабо и для разных сечений в стволе и сопле секундный расход практически одинаков, т.е. выполняется условие $u(x)F(x) = \text{const}$.

По мере распространения в направлении преграды интенсивность ударной волны убывает из-за радиального течения приблизительно обратно пропорционально пройденному расстоянию. Через время $t = 0.054$ мс с начала истечения ударная волна достигает преграды и скачком повышает давление на ней до величины $p = 0.185$ (120 МПа). Затем на преграду начинает натекать струя, и давление на преграде увеличивается. Максимальное давление около $p = 0.9$ (580 МПа) наблюдается через время $t_{st} = 0.156$ мс, которое соответствует времени установления параметров на преграде, рассчитанному по начальной скорости истечения струи: $t_{st} = 2L/u_0$. График изменения давления в общих чертах повторяет график изменения скорости истечения струи с соответствующим запаздыванием по времени. После сгорания пороха давление быстро уменьшается, стабилизируясь на заключительной стадии. Пульсации давления и скорости потока на этой стадии истечения связаны с отражением волн от границы раздела пороховые газы – вода.

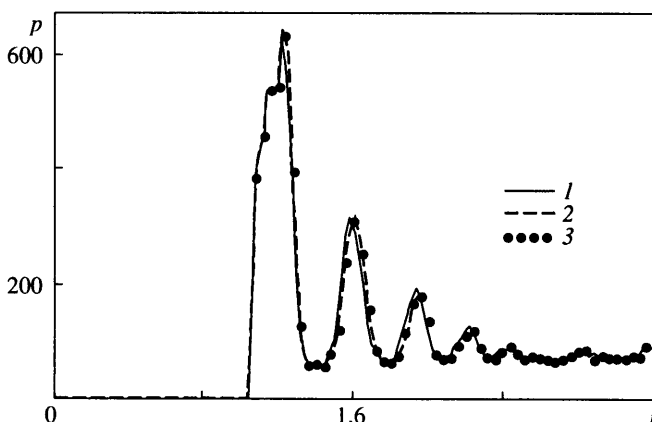
Зависимости давления в центре преграды от времени для разных расстояний $L_T = 2, 4, 6$ и $8R_S$ (кривые 1–4), приведенные на фиг. 3, показывают, что характер изменения давления на преграде для импульсной струи гидропушки такой же, как и в модельной задаче [4]. Давление на графиках отнесено к скоростному напору p_0 , а время отсчитывается с момента воспламенения пороха. Ударная волна, достигнув преграды, скачком повышает давление на ней (первый пик на кривых). Радиальное растекание потока за отраженной волной приводит к некоторому понижению давления. Затем на преграду начинает натекать струя, и давление здесь повышается практически до величины, равной скоростному напору. Пик "ударного" давления на преграде быстро уменьшается при удалении преграды. Однако максимальное значение давления струи на преграду близко к скоростному напору, который составляет около 650 МПа. Такого давления достаточно для разрушения многих материалов при импульсном локальном воздействии. При ударе струи о преграду на воздухе, когда нет торможения окружающей жидкостью, характер изменения давления на преграде подобный [5]. Из этого следует, что затопленная импульсная струя гидропушки может эффективно воздействовать на преграду. Можно отметить, что максимальное давление струи на преграду слабо зависит от расстояния до преграды L_T и близко к скоростному напору p_0 .

Поля давлений и скоростей на момент времени $t = 0.203$ мс после начала истечения для преграды, расположенной на расстоянии $L_T = 8R_S$, приведены на фиг. 4. Координаты отнесены к радиусу сопла R_S , давление, обезразмеренное на скоростной напор p_0 , указано возле изобар. Из графиков видно, что область повышенного давления локализована вблизи центра преграды и имеет размеры порядка $2R_S$. В толще воды сформировалась четко выраженная затопленная струя. Со временем картины полей остаются подобными, только уменьшаются значения скорости и давления.

Оценивалось влияние внешних условий на параметры внутренней баллистики гидропушки. На фиг. 5 приведена зависимость давления от времени в сечении $x = 80$ мм, расположенном у входа в коллиматор. Кривая 1 соответствует свободному истечению струи в воздух, кривая 2 и символы 3 – затопленной струе для двух расстояний



Фиг. 4. Поля скоростей и давлений в момент времени $t = 0.203$ мс



Фиг. 5. Зависимости давления от t у входа в коллиматор при разных условиях истечения струи: 1 – истечение в воздух; 2 и 3 – затопленная струя на расстояниях $L_T = 2$ и $8R_S$.

до преграды $L_T = 2$ и $8R_S$. Из результатов расчетов следует, что внешние условия незначительно влияют на внутренние параметры гидропушки – кривые на графиках совпадают практически полностью. Небольшое повышение давления внутри установки наблюдается только на начальной стадии истечения затопленной струи, когда она ударяется о внешний объем жидкости.

Заключение. Показано, что импульсная струя гидропушки под водой может, как и на воздухе, эффективно воздействовать на преграду, расположенную на расстоянии нескольких калибров установки. В жидкости формируется импульсная затопленная струя с радиусом, равным радиусу выходного сечения сопла. Внешние условия слабо влияют на параметры внутренней баллистики гидропушки. Основные параметры гидропушки можно рассчитать, принимая, что выстрел происходит в воздухе, а не в жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cooley W., Clipp L.* High-pressure water jets for undersea rock excavation // Ser.: Teans ASM J. Eng. Ind. u str. 1970. V. 92. № 2. P. 281–287.
2. *Atanov G.A., Semko A.N.* Impulsive water jet under water // Proc. 8th Amer. Water Jet Conf.; Houston (Texas), 1995. Paper 62. P. 845–853.
3. *Атанов Г.А., Семко А.Н.* Импульсная струя жидкости под водой // Теоретическая и прикладная механика. Харьков: Основа, 1999. Вып. 29. С. 169–174.
4. *Атанов Г.А., Губский В.Г., Семко А.Н.* Внутренняя баллистика пороховой гидропушки // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 6. С. 175–179.
5. *Атанов Г.А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. Киев.: Вища шк., 1987. 155 с.
6. *Атанов Г.А., Семко А.Н., Украинский Ю.Д.* Исследование внутренней баллистики гидропушки // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 168–170.
7. Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Б.В. Орлова. М.: Машиностроение, 1974. 328 с.
8. *Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
9. *Атанов Г.А., Семко А.Н.* Распространение ударной волны по струе воды // Изв. АН СССР. МЖГ. 1977. № 1. С. 190–192.
10. *Атанов Г.А., Семко А.Н.* О соотношении между динамическим давлением ультраструи и статическим давлением в установке // Аэрогазодинамика. Томск: Изд-во ТГУ, 1987. С. 9–13.
11. *Матвеев С.К.* Некоторые аспекты применения метода Годунова к решению задач нестационарной газовой динамики // Уч. зап. ЛГУ. 1977. № 393. С. 41–54.
12. *Самарский А.А., Попов Ю.П.* Разностные схемы газовой динамики. М.: Наука, 1975. 351 с.
13. *Ильгамов М.А.* О неотражающих условиях на границах расчетной области // Динамика оболочек в потоке: Тр. семинара Казан. физ.-техн. ин-та. 1985. Вып. 18. С. 4–76.
14. *Семко А.Н.* Выход ударной волны из цилиндрической трубы в открытый объем, заполненный жидкостью // Вестн. ХГПУ. Харьков: ХГПУ, 1998. Вып. 8. С. 169–172.

Донецк

Поступила в редакцию
14.XI.2000