

*А. Н. СЕМКО*, д-р. техн. наук, *В. В. РЕШЕТНЯК*, ДонНУ, г. Донецк

## ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ФАКТОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПОРШНЕВОЙ ГИДРОПУШКИ

У наведеній роботі досліджено вплив різних факторів на параметри поршневої гідрогармати з пневматичним приводом. Розглянуті такі фактори, як довжина сопла та водяного заряду, маса поршня, вхідний та вихідний діаметри сопла. Аналіз проводився числено методом другого порядку апроксимації у рамках моделі ідеальної стислої рідини. На підставі результатів дослідження проведена параметрична оптимізація конкретної гідрогармати та запропоновані дві оптимальні конструкції. Оптимальні гідрогармати при відносно невеликих розмірах та масі здатні генерувати компактні та потужні імпульсні струмені рідини, швидкістю до 1700 м/с.

In this paper influence of different factors on piston hydrocannon parameters investigated. So factors as nozzle and water charge length, piston mass, inlet and outlet nozzle diameters are observed. Investigation was pursued with ideal compressible flow model by second order accuracy numerical computations. On the ground of investigation results parametric optimization of concrete hydrocannon is pursued and two optimal constructions are proposed. Optimal hydrocannons, having comparative small bulk and mass, can generate compact and powerful impulsive jets with velocity near 1700 mps.

**Введение.** Гидроимпульсные технологии, использующие энергию импульсных высоконапорных струй жидкости, применяются для разрушения крепких горных пород и бетонных блоков, проходки горных выработок, обработки материалов, утилизации боеприпасов и т. д. [1, 2]. Для получения таких струй часто используются гидропушка (ГП) и импульсный водомет (ИВ) с поршневым или пороховым приводом, а так же электроимпульсный водомет (ЭИВ).

Многочисленные экспериментальные исследования ИВ и ГП, проведенные Б.В. Войцеховским [3], W. C. Cooley [4], Г. П. Черменским [5], А. И. Петраковым и О. Д. Криворотько [6, 7] по разрушению угля, горных пород, негабаритов, бетона и железобетона показали перспективность импульсных струй сверхвысокого давления. По результатам исследований сделаны выводы, что для эффективного разрушения динамическое давление струи должно в 10 раз превышать предел прочности материала на сжатие  $\sigma_{np}$ .

Президент Международной ассоциации водоструйных технологий (WJTA) М. М. Vijaу (Канада) отмечает перспективность применения импульсных высоконапорных струй жидкости. Гидроимпульсные установки компактны, мобильны, безопасны, требуют меньше энергии, чем устройства для получения непрерывных струй. По его мнению, дальнейшие работы в этом направлении должны быть направлены на повышение надежности, мобильности и компактности гидроимпульсных установок, оптимизацию сопла и других систем, понимание механизма разрушения материала [8].

В работах [9 – 14] разными авторами были проведены исследования поршневой и пороховой ГП с целью их оптимизации. В этих работах эффективность ГП характеризовалась ее компактностью и мобильностью, а так же

дальнобойностью и силовым воздействием струи на преграду. Давление воды в ГП ограничено ее прочностью, и должно быть минимальным, что способствует повышению надежности установки. Движение струи в воздухе и ее взаимодействие с преградой в работах не рассматривалось. Выводы о дальностью и силовом воздействии на преграду были сделаны качественно, по расчетным данным параметров внутренней баллистики ГП.

Целью работ [13, 14], посвященных поршневой ГП, так же является повышение мощности струи ГП и уменьшение давления воды в установке. Для этого исследовалось влияние формы сопла на гидродинамические параметры ГП. Сравнение сопел разной формы, проведенное в работе [14] для ГП конкретной конструкции, показало, что наиболее эффективным является сопло Витошинского.

В настоящей работе проведено численное исследование влияния на параметры поршневой ГП разных факторов, таких как масса поршня, масса и длина заряда воды, радиусы ствола и среза сопла ГП. По результатам исследования выполнена параметрическая оптимизация ГП. Как и в предыдущих работах, оценка силового воздействия струи на преграду проводилась качественно, без расчета внешней баллистики ГП. Критериями оптимизации были выбраны максимальная скорость и коэффициент компактности струи, характеризующие ее дальность и силовое воздействие на преграду. Так же, при отборе учитывались габариты и масса установок. Статическое давление воды внутри ГП, как и в работе [11] ограничивалось значением 1000 МПа. В результате многочисленных расчетов, были отобраны две установки, которые позволяют получить компактные струи, скоростью выше 1500 м/с.

Расчеты выполнены методом II порядка Родионова [15], обобщенным для расчета квазиодномерных движений идеальной сжимаемой жидкости [16] и развитым для сверхзвуковых течений [14]. В работе [17] показана эффективность метода Родионова для расчета различных гидроимпульсных установок, а апробация метода при многочисленных расчетах ГП разных конструкций в [14, 16, 17] и в настоящей работе подтвердила его высокую эффективность и надежность для таких задач.

**1. Критерии для оценки эффективности ГП.** Схема поршневой ГП, в которой реализуется инерционный принцип разгона жидкости, приведена рис. 1.

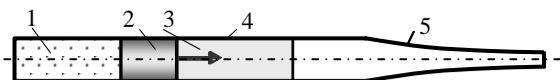


Рис. 1. Гидропушка.

1 – ресивер; 2 – поршень; 3 – вода; 4 – ствол; 5 – сопло

Под действием давления сжатого газа 1 тяжёлый поршень 2 разгоняется вместе с водой 3 в цилиндрическом стволе 4. Вода, достигая входа в сопло 5, начинает втекать в него, ускоряясь. Ускорение воды в сопле происходит из-за перераспределения энергии между частицами нестационарно движущейся жид-

кости. При этом кинетическая энергия частиц вблизи свободной поверхности значительно превышает среднюю по объему кинетическую энергию. Ускоряясь, передний фронт воды может достигать скорости, намного превышающей скорость звука в воде (до 3000 м/с). Достигнув среза сопла, вода истекает из него импульсной высоконапорной струей. При истечении скорость воды на срезе сопла, как правило, быстро уменьшается. Это приводит к возникновению градиента скорости по длине струи ее «растяжению» и дальнейшему разрушению из-за развития кавитации. В результате дальнобойность струи существенно уменьшается, что сильно ограничивает область применения ГП.

Работы [9 – 12] посвящены исследованию пороховой ГП, в которой, в отличие от поршневой установки, для разгона воды используется энергия продуктов сгорания пороха. Поршень в пороховой ГП может быть заменен пыжом. Основной идеей этих работ было получение надежной установки, обеспечивающей наибольшее давление струи на преграду. Поскольку скорость истечения струи из сопла быстро убывает с момента начала истечения, в работах исследовался высокоскоростной участок струи, минимальная скорость которого составляет 85% от максимальной скорости струи  $u_{\max}$ .

В работе [10] было введено понятие оптимального выстрела, который должен обеспечить получение струи скоростью 1500 м/с при максимальном давлении в сопле  $p_{\max} \leq 1200$  МПа, и проведен расчет оптимального выстрела пороховой ГП путем варьирования объема камеры сгорания и диаметра сопла.

В работе [11] был проведен прочностной расчет пороховой ГП. На основании данных прочностного расчета была решена задача оптимизации профиля сопла пороховой ГП. Прочностной расчет показал, что пороховая ГП указанной конструкции способна выдержать максимальное давление воды до 1500 МПа. Для того, чтобы ГП имела запас прочности, при оптимизации максимальное давление жидкости внутри установки ограничивалось значением 1 МПа. Критерием оптимизации был выбран импульс высокоскоростного участка струи, который определялся по формуле.

$$I = F_s \int_{t_{out}}^{t_e} \rho_0 u_s^2 dt, \quad (1)$$

где  $F_s$  - площадь среза сопла,  $u_s$  - скорость истечения,  $t_{out}$  и  $t_e$  - время начала истечения и время достижения струей скорости  $0,85 \cdot u_{\max}$ , соответственно.

В работе [12] проводилась функциональная и параметрическая оптимизация формы сопла ГП, данные для которой были взяты из [11]. Критерием оптимизации был выбран импульс высокоскоростного участка струи. Наибольшее давление воды, которое было получено в одной из оптимальных установок, составляло 1134 МПа.

Целью работ [13, 14], посвященных поршневой ГП, так же является повышение мощности струи ГП и уменьшение давления воды в ней путем из-

менения формы сопла. Функциональная оптимизация формы сопла, проведенная в работе [13], позволила повысить максимальную скорость струи на 23 %. Однако, при этом давление внутри установки и компактность струи не учитывались.

В работе [14] было проведено исследование влияния формы сопла на эффективность поршневой ГП. Эффективность ГП оценивалась по следующему комплексу критериев: максимальная скорость струи, максимальное давление внутри установки, коэффициент превышения давления  $k_p$ , коэффициент компактности струи  $k_v$  и коэффициент преобразования энергии  $k_e$ . За основу была взята ГП Cooley [4] с соплами разной формы [5]. Исследования показали, что наиболее эффективным для ГП данной конструкции является сопло Витошинского, которое позволяет получить наиболее компактную струю, обеспечивает наименьшее давление внутри установки и наиболее эффективную передачу энергии поршня струе воды.

Коэффициент превышения давления  $k_p = \rho u_{\max}^2 / 2p_{\max}$ , введенный Г.А. Атановым [1], показывает, во сколько раз динамическое давление струи  $p_c = \rho u_{\max}^2 / 2$  превышает максимальное давление  $p_{\max}$  внутри установки, где  $\rho$  - плотность воды.

Коэффициент компактности струи  $k_v$ , равный безразмерному градиенту скорости высокоскоростного участка струи, характеризует степень кавитации в струе и определяет ее дальнобойность и эффективность. Этот коэффициент рассчитывался по формуле:

$$k_v = \left( \left| \frac{du}{dx} \right| \frac{L_s}{u_{\max}} \right)^{-1} = \left( \frac{u_{\max} - u_{\min}}{\Delta L_{\max}} \frac{L_s}{u_{\max}} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Здесь  $L_s$  - длина сопла,  $\Delta L_{\max}$ ,  $u_{\max}$  и  $u_{\min}$  - длина, максимальная и минимальная скорости высокоскоростного участка струи.

Коэффициент преобразования энергии, характеризующий эффективность передачи энергии поршня струе, определялся как отношение кинетической энергии высокоскоростного участка струи  $E_{\max}$  к начальной кинетической энергии воды и поршня  $E_0$  по формуле:

$$k_e = E_{\max} / E_0, \quad E_0 = m_0 U_0^2 / 2, \quad E_{\max} = \int_{out}^{t_e} \rho F_s \frac{u_s^3}{2} dt, \quad (3)$$

где  $m_0$  - суммарная масса поршня и заряда воды,  $U_0$  - их начальная скорость.

В отличие от работ [11 – 13], в [14] в качестве минимального ограничения для высокоскоростного участка струи была выбрана скорость  $u_{\min} = 0,7 \cdot u_{\max}$ . Динамическое давление и удельная кинетическая энергия струи с такой скоростью меньше максимальных значений в 2 раза. Как пока-

зали расчеты, при таком ограничении по скорости, энергия высокоскоростного участка струи для разных сопел составляет 60-70% от полной кинетической энергии струи. Это позволяет сделать вывод, что основное влияние на эффективность струи, оказывает высокоскоростной участок.

В настоящей работе проведено численное исследование основных тенденций изменения характеристик выстрела, которые использовались в [14], при вариации разных конструктивных параметров ГП, таких как длина сопла и заряда воды, площадь ствола и среза сопла, масса и начальная скорость поршня и заряда воды. Для анализа была выбрана лабораторная ГП [18], легкость и компактность которой допускает изменение ее конструктивных параметров в широких пределах. По результатам исследований в работе проведена параметрическая оптимизация ГП. Целью оптимизации было получение наиболее легкой, компактной и мобильной установки, способной генерировать струю с максимальной скоростью выше 1500 м/с и коэффициентом компактности, не меньше, чем у струи оптимальной пороховой ГП [12]. Максимальное давление внутри установки при этом ограничивалось значением 1000 МПа.

Экспоненциальное сопло ГП, которое использовалось в [18], в настоящей работе было заменено соплом Витошинского [5], которое в [14] было отмечено как наиболее эффективное для ГП Cooley. Конструктивные параметры лабораторной ГП следующие: длина сопла  $L_s = 0,25$  м, радиусы ствола и сопла  $R_c = 33$  мм и  $R_s = 5$  мм, масса поршня  $m_p = 2,25$  кг, длина заряда воды  $L_c = 0,14$  м. Начальная скорость воды и поршня  $U_0 = 72,5$  м/с.

**2. Математическая постановка задачи и метод решения** Хорошие результаты для расчета параметров ГП дает модель, в которой жидкость считается идеальной и сжимаемой, течение предполагается квазиодномерным и изэнтропическим, влияние воздуха в сопле и деформации корпуса не учитываются [1, 2]. Тогда движение жидкости в ГП описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} &= -\frac{\rho u}{F} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial (p + \rho u^2)}{\partial x} &= -\frac{\rho u^2}{F} \frac{dF}{dx}, \\ p &= B \left[ (\rho / \rho_0)^n - 1 \right], \end{aligned} \quad (4)$$

со следующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} u(0, x) &= U_0, \quad p(0, x) = 0, \quad \rho(0, x) = \rho_0; \quad -L \leq x \leq 0; \\ u(t, x_p) &= u_p, \dots, \quad p(t, x_F) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $x, t$  – координата и время,  $u, p, \rho$  – скорость, давление и плотность,  $F$  – площадь поперечного сечения канала,  $x_p$  и  $u_p$  – координата и скорость поршня,  $x_F$  – координата свободной поверхности,  $L$  – длина водяного заря-

да,  $B = 304,5$  МПа,  $n = 7,15$  и  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта. Начало координат помещено у входа в сопло, за начальный принят момент времени, когда передний фронт жидкости достигает входа в сопло.

Движение поршня описывалось обыкновенными дифференциальными уравнениями с начальными условиями

$$\frac{du_p}{dt} = -\frac{p(t, x_p)}{m_p} F_p, \quad \frac{dx_p}{dt} = u_p, \quad u_p(0) = U_0, \quad x_p(0) = -L, \quad (6)$$

где  $F_p$  – площадь поршня.

При дозвуковом течении давление на правой границе постоянно и равно атмосферному. В случае сверхзвукового течения, на правую границу приходят только возмущения из сопла, а возмущения снаружи сносятся потоком, и параметры на границе определяются параметрами в сопле.

Поставленная задача решалась численно методом Родионова [16], обобщенным для расчета нестационарных квазиодномерных движений жидкости [17] и развитым для расчета сверхзвуковых течений жидкости [14]. Расчетная область подвижная, ограниченная слева поршнем, а справа – свободной поверхностью. Границы расчетной области движутся по неизвестным заранее законам, которые определяются в ходе решения задачи. При истечении струи граница расчетной области фиксировалась на срезе сопла, а движение струи не рассчитывалось.

Рассмотрим подвижную сеточную область, одна граница которой опирается на поршень, а другая – на свободную поверхность. Запишем разностную аппроксимацию уравнений баланса массы и импульса (4) методом Родионова для подвижной сетки в виде:

$$\rho_{i+1/2}^{m+1} = \frac{\left\{ \rho_{i+1/2}^m \Delta x_{i+1/2}^m - \Delta t [R(U - W)]_i^{i+1} - \left( \frac{\rho u}{F} \right)_{i+1/2}^m \frac{F_i^{i+1}}{\Delta x_{i+1/2}^m} \Delta t \Delta x_{i+1/2}^{m+1/2} \right\}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1}}, \quad (7)$$

$$(\rho u)_{i+1/2}^{m+1} = \frac{\left\{ (\rho u)_{i+1/2}^m \Delta x_{i+1/2}^m - \Delta t [(RU(U - W) + P)]_i^{i+1} - \left( \frac{\rho u^2}{F} \right)_{i+1/2}^m \frac{F_i^{i+1}}{\Delta x_{i+1/2}^m} \Delta t \Delta x_{i+1/2}^{m+1/2} \right\}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1}}$$

Здесь  $\Delta t$  – шаг по времени,  $\Delta x_{i+1/2}^m = (x_{i+1} - x_i)^m$  – шаг сетки по координате на  $m$  – том шаге по времени,  $W_i = (x_i^{m+1} - x_i^m) / \Delta t$  – скорость движения  $i$  – го узла сетки,  $F_i^{i+1} = F_{i+1} - F_i$ . Большими буквами  $R, U, P$  – обозначены параметры, которые рассчитываются на границах ячеек при решении обобщенной задачи Римана, или, на границах расчетной области из граничных условий. Параметры с целыми индексами  $i$  определяются в точках с координатами  $x_i$ , а

параметры с полуцелыми индексами  $i+1/2$  - в точках с координатами  $(x_i + x_{i+1})/2$ .

**3. Влияние разных факторов на параметры ГП.** По результатам исследований, в работе [14] сделан вывод, что форма сопла существенно влияет на гидродинамические параметры ГП. Особенно важна при этом крутизна сопла, определяемая по формуле:

$$K = \frac{dF}{dx},$$

где  $F$  - площадь сопла.

Поскольку, при фиксированных значениях радиусов входа и среза сопла, изменение длины сопла приведет к изменению его крутизны, влияние длины сопла на параметры ГП так же очень велико. Кроме того, изменение длины сопла приводит к изменению длительности втекания, что так же должно сказаться на параметрах выстрела.

Для определения закономерностей этого влияния в настоящей работе рассчитаны основные гидродинамические параметры ГП для сопел разной длины. При расчетах учтено следующее конструктивное ограничение. Если при определенной длине сопла отношение объема заряда воды  $V_c$  к объему сопла  $V_s$  окажется меньше единицы, поршень будет ударяться о вход в сопло, что приведет к существенному снижению надежности установки. Поэтому ограничивающим фактором при изменении длины сопла является отношение  $V_c/V_s$ , которое должно быть больше единицы.

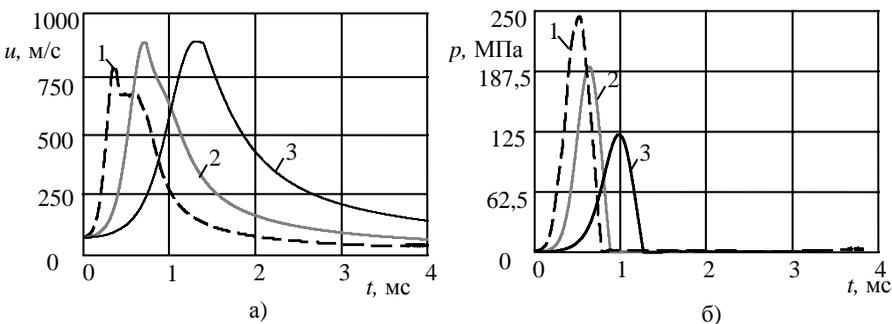


Рис. 2. Гидродинамические параметры ГП с соплами разной длины  
 а) – зависимость скорости втекания и истечения жидкости от времени,  
 б) – зависимость максимального давления внутри установки от времени.

1 –  $L_s = 0,125$  м, 2 –  $L_s = 0,25$  м, 3 –  $L_s = 0,5$  м

На рис. 2 представлены зависимости скорости втекания и истечения жидкости (а) и максимального давления (б) ГП от времени для сопел разной длины (кривые 1, 2 и 3 для сопел длиной  $L_s/2$ ,  $L_s$  и  $2L_s$ , для базового варианта  $L_{s0} = 250$  мм).

Табл. 1

$L_s$ , м	$V_c/V_s$	$u_{\max}$ , м/с	$p_{\max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	$k_e$
0,125	7,97	798	244	1,306	8,011	0,607
0,250	3,98	881	192	2,02	3,274	0,616
0,500	1,99	886	122	3,22	1,664	0,651

В табл. 1 представлены результаты расчетов гидродинамических параметров, характеризующих эффективность установки, в зависимости от длины сопла и отношения объемов заряда воды и сопла.

Увеличение длины сопла способствует незначительному повышению скорости струи (около 10%). Давление внутри установки при этом уменьшилось в два раза (около 66%). В результате, значение коэффициента превышения давления существенно увеличилось. Значение коэффициента компактности струи при этом, наоборот, уменьшилось. Наибольший коэффициент компактности струи у ГП с соплом длиной  $L_s = L_{s0}/2$  м, составляет  $k_v = 8,011$ , что в 6,1 раз больше, чем у ГП, длина сопла которой  $L_s = 4L_{s0}$ .

В большинстве случаев увеличение длины сопла не желательно, поскольку оно ведет к уменьшению компактности струи, увеличивает габариты и массу установки и снижает ее мобильность. Уменьшение же длины сопла, наоборот, позволит получить более мобильную и дальнобойную установку, способную генерировать компактные струи. Тем не менее, в случае необходимости повышения скорости струи и снижения давления в установке, нужного результата можно добиться, увеличив длину сопла.

Для тех же соотношений объемов сопла и заряда воды был проведен расчет ГП, без изменения исходного объема сопла. При этом уменьшалась длина заряда воды.

На рис. 3 представлены зависимости скоростей втекания и истечения и давлений от времени для ГП, длина заряда воды в которых различна, а в табл. 2 – расчетные значения критериев для этого варианта.

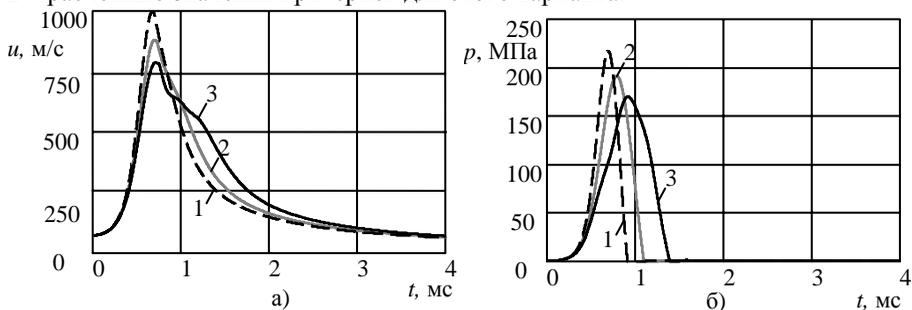


Рис. 3. Гидродинамические параметры ГП с зарядами воды разной длины  
а) – зависимость скорости втекания и истечения жидкости от времени,  
б) – зависимость максимального давления внутри установки от времени.

1 –  $L_c = 0,07$  м, 2 –  $L_c = 0,14$  м, 3 –  $L_c = 0,28$  м

Табл. 2

$L_c$ , м	$V_c/V_s$	$u_{\max}$ , м/с	$p_{\max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	$k_e$
0,28	7,97	787	170	1,82	4,77	0,54
0,14	3,98	881	192	2,02	3,27	0,62
0,07	1,99	997	218	2,28	2,39	0,67

При уменьшении длины водяного заряда увеличивается скорость струи и давление внутри установки. Компактность струи при этом повышается, а значение коэффициентов превышения давления и преобразования энергии - уменьшается. Поскольку при равных отношениях объемов заряда воды и сопла, значения критериев не равны, вариации увеличения длины сопла и уменьшения длины заряда воды в  $n$  раз не эквивалентны.

Увеличение длины заряда воды, как и длины сопла, снижает мобильность установки. Поэтому, используя тот факт, что увеличение длины заряда воды и уменьшение длины сопла позволяют достичь примерно аналогичных результатов, при необходимости повысить компактность струи предпочтительно уменьшение длины сопла, а не увеличение длины заряда воды.

Площадь ствола явно входит в граничное условие на поршне, и поэтому влияет на параметры ГП. Кроме того, изменение площади ствола приведет к изменению массы воды и крутизны сопла. Чтобы избавиться от влияния крутизны сопла при изменении площади ствола, в настоящей работе радиусы среза сопла и ствола изменялись одновременно, так, чтобы их отношение оставалось неизменным. Такой подход позволяет варьировать радиус ствола, сохранив крутизну профиля сопла и отношение объемов воды и сопла без изменений. Полученные результаты расчетов представлены на рис. 4 и в табл. 3.

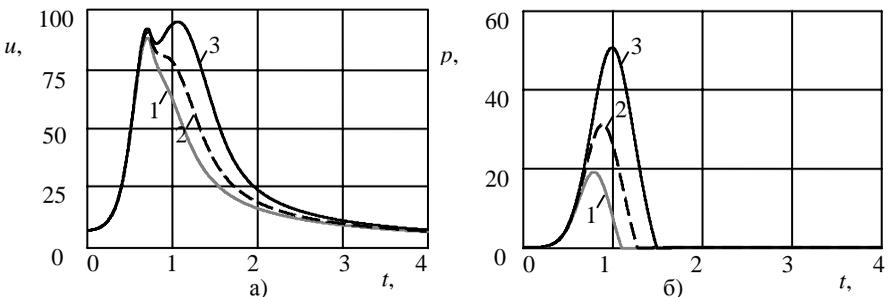


Рис. 4. Гидродинамические параметры ГП со стволами разных радиусов  
 а) – зависимость скорости втекания и истечения жидкости от времени,  
 б) – зависимость максимального давления внутри установки от времени.

1 –  $R_c = 33$  мм, 2 –  $R_c = 23,3$  мм, 3 –  $R_c = 16,5$  мм

Табл. 3.

$R_c$ , мм	$R_s$ , мм	$u_{\max}$ , м/с	$p_{\max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	$k_e$
33,0	5,0	881	192	2,02	3,27	0,62
23,3	3,5	908	312	1,32	5,65	0,67
16,5	2,5	950	506	0,89	8,77	0,74

Уменьшение площади ствола и сопла приводит к значительному увеличению коэффициента компактности струи  $k_v$  и уменьшению коэффициента превышения давления  $k_p$ . При уменьшении радиусов в 2 раза  $k_p$  становится меньше 1. Это объясняется тем, что уменьшение радиусов ствола и сопла усиливает влияние на процесс экструзионной фазы выстрела. После того, как  $k_p$  становится меньше 1, влияние экструзионных факторов на формирование струи начинает преобладать над влиянием инерционных факторов, и выстрел ГП приобретает особенности, характерные для выстрела ИВ. В таком случае можно говорить, что ГП, начинает работать в экструзионном режиме, характерном для ИВ, или в режиме ИВ.

Увеличение площади ствола и среза сопла может быть использовано для увеличения диаметра струи и уменьшения давления внутри установки. В остальных случаях, увеличение площади ствола не целесообразно, поскольку оно ведет к снижению мобильности и компактности струи ГП, а так же ее прочностных характеристик [11].

Еще один важный параметр ГП, который во многом определяет процесс выстрела, это масса поршня. Масса поршня, как и его площадь, входит в граничные условия (6) в явном виде. Будем изменять массу поршня, последовательно увеличивая ее в 2 и 4 раза. На рис. 5 представлены зависимости гидродинамических параметров от времени для ГП с поршнями разной массы, а в табл. 4 – значения критериев эффективности ГП для поршней разной массы.

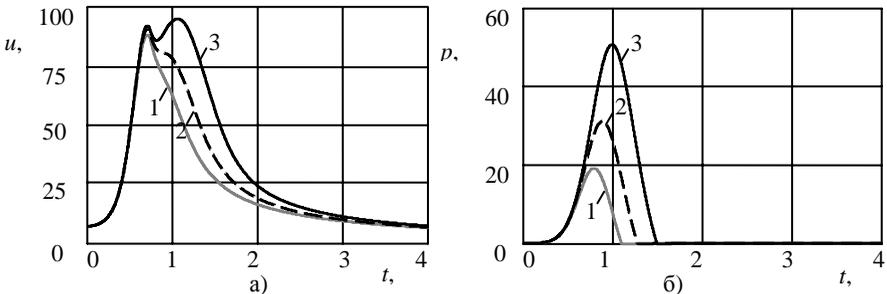


Рис. 5. Гидродинамические параметры ГП с поршнями разной массы  
а) – зависимость скорости втекания и истечения жидкости от времени,  
б) – зависимость максимального давления внутри установки от времени.

1 –  $m_p = 2,25$  кг, 2 –  $m_p = 4,5$  кг, 3 –  $m_p = 9$  кг

Увеличение массы поршня в  $n$  раз приводит к таким же изменениям параметров ГП, как и уменьшение площади сопла в такое же количество раз.

Табл. 4.

$m_p$ , кг	$u_{\max}$ , м/с	$P_{\max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	$k_e$
2,25	881	192	2,02	3,27	0,62
4,50	908	312	1,32	5,65	0,67
9,00	950	506	0,89	8,77	0,74

Значения критериев эффективности ГП для этих двух случаев, полностью совпадают. Это объясняется тем, что масса и площадь поршня определяют течение в ГП через граничное условие на поршне (6). Из уравнения (6) видно, что изменение со временем параметров на поршне зависит от отношения  $F_p/m_p$ . Учитывая, что площадь поршня ГП равна площади ствола, получим, что изменение только площади ствола в ГП эквивалентно изменению в ней массы поршня, если остальные параметры ГП остаются неизменными. Необходимо учитывать тот факт, что изменение массы поршня при одинаковой степени сжатия газа и длины участка ствола, в котором происходит разгон воды и поршня, приведет к изменению начальной скорости втекания воды в сопло. А если менять массу поршня, увеличивая его длину, необходимо учитывать изменение длины участка ствола, в котором происходит разгон воды и поршня.

Поскольку изменение радиуса ствола влечет за собой изменение массы заряда воды, входного и выходного радиусов сопла, можно сделать вывод, что гидродинамические параметры ГП не зависят от этих параметров, а зависят от длины заряда воды, формы сопла и его крутизны, как это следует из рис. 3 и табл. 2. Этот вывод относится только к локальным параметрам, таким, как скорость и давление жидкости в ГП в разных сечениях и в разные моменты времени, и не относится к интегральным параметрам энергии и импульсу струи, определяемые формулами (1), (3), в которые значение площади среза сопла входит явным образом.

Из анализа данных рис. 4, рис. 5, табл. 3 и табл. 4 следует, что в случае, если ГП генерирует струи достаточного диаметра, но давление в установке превышает допустимые значения, нужно уменьшать массу поршня, а если увеличение давления в установке и уменьшение диаметра струи допустимо, нужно уменьшать радиус ствола.

Начальная скорость воды и поршня входит в уравнения движения воды в ГП через начальные условия (5), и потому существенно влияет на ее гидродинамические параметры. Значения параметров ГП для разных начальных скоростей втекания представлены на рис. 6 и в табл. 5.

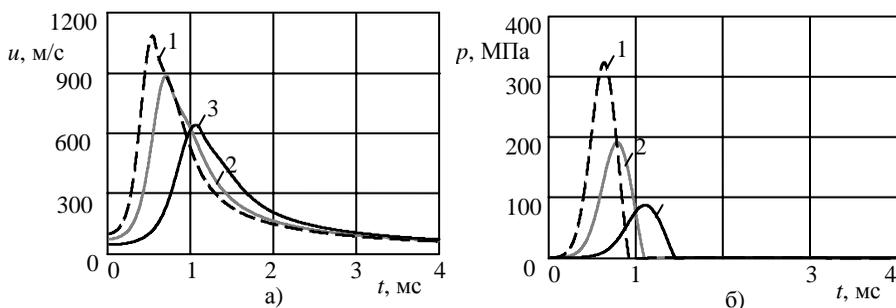


Рис. 6. Параметры ГП с разными начальными скоростями втекания  
 а) – зависимость скорости втекания и истечения жидкости от времени,  
 б) – зависимость максимального давления внутри установки от времени.  
 1 –  $U_0 = 100$  м/с, 2 –  $U_0 = 72,5$  м/с, 3 –  $U_0 = 40$  м/с

Табл. 5

$U_0$ , м/с	$u_{\max}$ , м/с	$p_{\max}$ , МПа	$k_p$	$k_v$	$k_e$
72,5	881	192	2,02	3,27	0,62
100	1081	324	1,80	3,87	0,58
45	638	88	2,31	2,54	0,66

Приведенные данные показывают, что увеличение начальной скорости заряда воды и поршня приводит к росту скорости струи, давлению внутри установки и компактности струи. Коэффициенты превышения давления и преобразования энергии при этом уменьшаются.

Для мишеней, которые отличаются прочностью, объемом и другими характеристиками, будет соответствовать свой, экономически наиболее оптимальный выстрел. ГП с фиксированными параметрами может обеспечить оптимальную экономическую эффективность в очень узком диапазоне задач, для которых требуется определенное давление струи мишень. При повышении прочности мишени будет снижаться эффективность ее разрушения, а при снижении прочности – эффективность расхода энергии [9 – 12]. Создание универсальной ГП позволит существенно повысить ее эффективность. Как наиболее простой путь повышения универсальности пороховой ГП, в работе [10] предлагается замена сопла. В поршневой ГП достичь требуемого результата можно увеличением или уменьшением степени сжатия газа, тем самым, задавая начальную скорость втекания воды в сопло.

**4. Оптимизация параметров конкретной гидропушки.** Зная основные закономерности изменения параметров течения в ГП при изменении ее конструктивных параметров, в настоящей работе была проведена оптимизация ГП Cooley [4]. Цель оптимизации – повышение мобильности ГП, дальности и силового воздействия струи на преграду. Исследования проведены для ГП с соплом Витошинского, которое является наиболее эффектив-

ным для ГП заданной конструкции [14]. Для удовлетворения прочностных требований давление внутри установки было ограничено значением 1000 МПа, которое, как показано в [11], обеспечивает достаточный запас прочности ГП.

Табл. 6

Установка	$L_s$ , м	$L_c$ , м	$m_p$ , кг	$R_c$ , мм	$R_s$ , мм	$U_0$ , м/с
ГП1	0,45	0,30	15,3	75	10	215
ГП2	0,40	0,20	15,3	75	10	190

В результате многочисленных расчетов, были отобраны две установки, конструктивные параметры которых представлены в табл. 6, а гидродинамические параметры и значения критериев – на рис. 7 и в табл. 7. На рис. 7а приведены зависимости скорости втекания и истечения жидкости от времени, а рис. 7б – зависимости максимального давления внутри установок от времени.

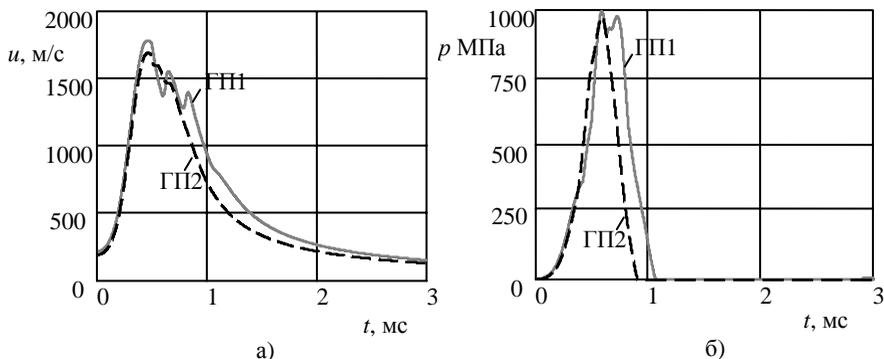


Рис. 7. Гидродинамические параметры оптимальных ГП

- а) – зависимость скорости втекания и истечения жидкости от времени,  
 б) – зависимость максимального давления внутри установки от времени.

Из графиков на рис. 7 видно, что предложенные установки позволяют генерировать компактные импульсные струи, скоростью до 1800 м/с, сохраняя давление внутри установки до 1000 МПа. ГП1 позволяет получить струи более высокой скорости и компактности, чем ГП2, в то время как ГП2 более мобильна и требует меньших энергетических затрат для разгона в стволе воды и поршня.

Пulsации параметров на рисунке имеют волновую природу, и не связаны с численными эффектами. Период пульсаций соответствует времени

распространения возмущения от поршня до свободной поверхности и обратно (около 0,22 мс).

Табл. 7

Установка	$u_{\max}$ , м/с	$P_{\max}$ , МПа	$k_v$	$k_e$	$R_s$ , мм	$m_p$ , кг	$L$ , мм
ГП1	1783	997	5,18	0,39	10,00	15,30	750
ГП2	1693	975	4,27	0,47	10,00	15,30	600
ППП	1580	1143	4,21	-----	10,00	-----	571
ГП Cooley	2090	530	2,67	0,68	4,18	61,27	1490
Лабораторная ГП	881	192	3,27	0,62	5,00	2,25	400

В табл. 7 представлены критерии эффективности оптимальных поршневых установок, а так же, для сравнения, ГП Cooley и лабораторной ГП с соплом Витошинского, обеспечивающим наиболее эффективный выстрел [14], и одной из оптимальных пороховых ГП, гидродинамические параметры которой взяты из [12].

Из табл. 7 видно, что ГП1 и ГП2 проигрывают оптимальной пороховой ГП в габаритах и массе, но выигрывают по остальным характеристикам. ГП1 обеспечивает большую эффективность струи, по сравнению с ГП2, но имеет больший объем и массу.

ГП Cooley и лабораторная ГП позволяет более эффективно передавать струе энергию поршня обеспечивают меньшее давление воды в установке. Кроме того, лабораторная ГП намного легче и мобильнее, чем ГП предложенных конструкций, но при этом не позволяет получить струи достаточной мощности.

Не смотря на то, что максимальная скорость струи ГП Cooley выше, чем у ГП1 и ГП2, эффективность воздействия на преграду и дальнобойность струи ГП Cooley значительно меньше, в силу меньшей компактности. Поэтому для разрушения крепких мишеней предпочтительнее использование ГП1 и ГП2.

**Выводы.** В работе численно исследовано влияния на основные гидродинамические параметры поршневой ГП таких факторов, как длина сопла и заряда воды, площадь ствола и среза сопла, масса поршня, начальная скорость втекания воды в сопло. Сформулированы критерии для оценки эффективности ГП. Движение жидкости в ГП описывалось уравнениями нестационарной газовой динамики в квазиодномерном приближении. Расчеты выполнены методом Родионова второго порядка аппроксимации, адаптированным для расчета квазиодномерных изэнтропических течений идеальной сжимаемой жидкости и развитым для сверхзвуковых течений жидкости в ГП. На основании закономерностей, выявленных в результате многочисленных расчетов, проведена параметрическая оптимизация поршневой ГП конкретной конструкции. В результате оптимизации были отобраны две поршневых ГП.

По мощности и дальности струи оптимальные поршневые ГП сравнимы с оптимальными пороховыми ГП [12], и значительно эффективнее исходной установки. Масса и габариты оптимальных поршневых ГП намного меньше, чем масса и габариты исходной установки, но больше оптимальной пороховой ГП.

**Список литературы:** 1. *Атанов Г. А.* Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. – К.: Вища школа, 1987. – 155с. 2. *Семко А.Н.* Импульсные струи жидкости высокого давления. - Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с. 3. *Войцеховский Б. В., Дудин Ю. А.* и др. Кавитационный эффект в экспоненциальном струйном насадке // Динамика сплошной среды. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР.- 1971.- Вып. 9.- С. 7 – 11. 4. *Cooley W. C.* Rock breakage by pulsed high pressure water jets // Proc. 1st International Symposium on Jet Cutting Technology.- Coventry (England), 1972. - Paper B7. - P. 101-112. 5. *Черменский Г. П.* Применение импульсных водометов в угольной промышленности // Технология добычи угля подземным способом. - 1972. - Вып. 4. - С. 83-87. 6. *Шехтман Н. В., Криворотько С. Д., Николаев В. П.* Опыт разрушения бетона и железобетона импульсными водометами на Днепротэс-II // Гидротехн. стр-во. - 1976. - № 5. - С. 18-21. 7. *Петраков А. И., Криворотько О. Д.* Разрушение горных пород импульсными струями воды // Уголь. - 1982. - № 3. - С. 12-15. 8. *Vijay M. M.* Pulsed jets: fundamentals and applications. // Processing of the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology. New Delhi, India, February 3 –5, 1998, pp. 610-627. 9. *Атанов Г. А., Семко А. Н.* и др. // О влиянии разных факторов на параметры гидропушки // Прикладные задачи математики и механики: Материалы XII науч. конф. ученых Украины, России, Беларуси (15 – 21 сентября, 2003 г.) – Севастополь.: Изд-во СевНТУ, 2003. – С. 134 – 137. 10. *Атанов Г. А., Гескин Э. С.* и др. Пороховая гидропушка широкого спектра действия // Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т. 6 (78). № 3. – С. 3 – 8. 11. *Гескин Э. С., Русанова О. А.* и др. Прочностной расчет и оптимизация сопла ствола пороховой гидропушки // Проблемы прочности. – 2006. - № 2. – С. 137 – 146. 12. *Атанов Г.А., Петренко О.П.* и др. Влияние формы сопла на параметры пороховой гидропушки // Прикладная гидромеханика. - 2007. - Т. 9 (81). № 4. - С. 3 –9. 13. *G A Atanov* The optimal control problem of profiling the hydrocannon nozzle to obtain the maximum outlet speed // Proc. American Water Jet Conference.- Minneapolis (Minnesota), August 18-21, 2001. – Paper 16. 14. *Решетняк В. В.* Влияние формы сопла на параметры сверхзвуковой гидропушки // Труды международного научно-практического семинара «Гидродинамика и экология». К 100-летию со дня рождения чл.-корр. НАН Украины, профессора И.Л. Повха (Донецк, 11-12 ноября 2009) / Под общ. ред. Ступина А.Б. – Донецк, ДонНУ, 2009. – С. 48 – 53. 15. *Родионов А. В.* Повышение порядка аппроксимации схемы Годунова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. - 1987. - Т. 27. № 12. – С. 1853 – 1860. 16. *Решетняк В. В., Семко А. Н.* Применение метода Родионова для расчета квазиодномерных движений идеальной сжимаемой жидкости» // Прикладная гидромеханика. - 2009. - Т. 9 (81). № 3. - С. 56 –64. 17. *Решетняк В. В., Семко А. Н.* Эффективность метода Родионова при расчете гидродимпульсных установок // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки.- 2008, № 2.- С. 587-593 18. *Атанов Г. А., Семко А. Н., Украинский Ю. Д.* Исследование внутренней баллистики гидропушки // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. N4. С. 168-170.

*Поступила в редколлегию 04.03.2010*