

УДК 532.5:518:5

ПОРОХОВАЯ ГИДРОПУШКА ШИРОКОГО СПЕКТРА ДЕЙСТВИЯ

Г. А. АТАНОВ*, Э. С. ГЕСКИН**, А. Н. СЕМКО***,
А. В. КОВАЛЕВ*

* Донецкий открытый университет,

** Нью-Джерси Технологический Институт,

*** Донецкий национальный университет

Получено 30.01.2004

Рассматриваются некоторые аспекты проектирования пороховой гидропушки как эффективного инструмента для разрушения твердых материалов. Сформулированы преимущества пороховой гидропушки, введено понятие оптимального выстрела. Предложен путь уменьшения затрат при производстве работ с помощью пороховой гидропушки. Приведены результаты численного расчета, подтверждающие рациональность предложенного подхода.

Розглянуто деякі аспекти проектування порохової гідрогармати як ефективного інструменту для руйнування твердих матеріалів. Сформульовано переваги порохової гідрогармати, введено поняття оптимального пострілу. Запропоновано шлях зменшення витрат при провадженні робіт за допомогою гідрогармати. Наведені результати чисельних розрахунків, що підтверджують запропонований підхід.

The paper deals with projection of the ponder hydro-cannon as an effective tool for demolition of hard materials. Advantages of the ponder hydro-cannon are formulated; a concept of the optimum shot is entered. A way to reduce expenses while executing the work with the help of the hydro-cannon is offered. Results of numerical calculation confirming rationality of the approach offered are given.

ВВЕДЕНИЕ

Гидропушка как устройство для получения импульсных струй жидкости широко исследована теоретически и экспериментально [1 - 3]. В ней реализуется инерционный принцип разгона воды: ускорение воды происходит в процессе ее втекания в длинное сужающееся сопло. Наиболее распространенной и исследованной является гидропушка с пневматическим приводом (рис. 1).

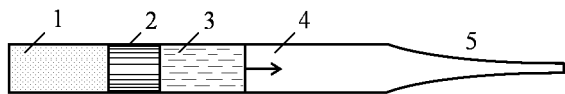


Рис. 1. Схема установки:

1 – ресивер со сжатым газом, 2 – поршень, 3 – водяной заряд, 4 – ствол, в котором перемещается поршень с водой, 5 – сужающееся сопло

Источником энергии в пушке служит сжатый газ. Под его действием на значительном пути в цилиндрическом стволе разгоняется поршень с примыкающей к нему водой, которая затем втекает в сужающееся сопло, ускоряясь. Таким образом, потенциальная энергия сжатого газа преобразуется в кинетическую энергию поршня, а ее определенная часть затем переходит в кинетическую энергию струи.

Принципиальная особенность гидропушки – возможность получения струй, динамический напор которых намного превышает статическое давление в стволе установки. Отношение указанных давлений получило название коэффициента превышения давления k_r , и для гидропушки этот коэффициент больше единицы: $k_r > 1$. Была проведена серия специальных расчетов с целью определения наибольшего возможного значения k_r , при этом получено $k_{r\max} = 3.6$ [4, 5]. Отсюда следует, что вполне возможно при приемлемых внутренних давлениях получать скорости свыше 2000 м/с, при этом динамический напор струи будет превышать 30 ГПа.

Процессу выстрела пневматической гидропушки свойственна жесткая детерминированность, обусловленная тем, что движение поршня подчинено определенным законам и не может корректироваться. Это оказывается причиной слабой возможности управления параметрами выстрела.

Одной из характерных особенностей выстрела гидропушки является резкое уменьшение скорости истечения струи [1, 3–7] сразу же после начала истечения. Причиной этого служит торможение поршня и генерирование им мощных волн разрежения. В свою очередь, уменьшение скорости истечения приводит к разрушению струи, так как ее передние частицы движутся быстрее, чем задние. Это вызывает растягивающие напряжения, в

струе возникает нестационарная кавитация [1, 8], а затем струя разрушается. В результате расстояние эффективного разрушения, или дальность, крайне низкое. В экспериментах обнаружено, что оно составляет величину не более 15 см для экспоненциального сопла с выходным диаметром 10 мм [6].

Для увеличения дальности необходимо предотвратить резкое уменьшение скорости истечения, и с этой целью было предложено на выходе сопла использовать так называемый коллиматор – цилиндрический участок определенной длины [9]. При движении в коллиматоре у фронта течения наблюдалось выравнивание скоростей, и в течение некоторого времени истечение струи происходило с более-менее постоянной или слабо меняющейся скоростью. Таким образом, можно получить струю некоторой длины: цилиндрический столбик воды, движущийся со скоростью, близкой к скорости воды в коллиматоре. При уменьшении скорости истечения струя оторвется. Длина ее при сохранении скорости истечения и диаметра выходного сечения является показателем совершенства установки. Чем длиннее струя, тем больше ее дальность и разрушающая способность. Однако расчеты показывают, что в гидропушке с пневматическим приводом существенного увеличения длины струи за счет применения коллиматора получить не удастся. Причина этого кроется в упомянутой выше детерминированности процесса выстрела.

Для получения высоких скоростей гидропушка с пневматическим приводом должна удовлетворять некоторым требованиям. В частности, должно быть относительно большое значение отношения диаметра ствола к выходному диаметру сопла (ориентировочно 10). Следствием этого является относительно малый диаметр струи (до 10–12 мм). Увеличение же диаметра струи крайне желательно, так как при сохранении скорости истечения при этом резко возрастает импульс и энергия струи, а следовательно, и ее разрушающая способность.

Большое значение отношения диаметра ствола к выходному диаметру сопла может быть обеспечено только за счет длинного сопла, что приводит к увеличению габаритов и массы установки. При этом надо учесть, что изготовление длинного сопла гидропушки с небольшим внутренним выходным диаметром – очень сложная технологическая задача.

Применение пневматического привода требует наличия системы взвода поршня, т. е. возврата его в исходное положение для производства следу-

ющего выстрела. Эта система должна обладать большой мощностью и, главное, развивать большие усилия, так как должна обеспечить сжатие газа в ресивере до начального давления. Это также приводит к увеличению габаритов и массы установки.

Высокие требования в пневматической гидропушке предъявляются к системе подачи воды. Если она откажет, то вода не будет залита, и может произойти так называемый "сухой" выстрел. Поршень разгонится без воды, и затем произойдет его удар по корпусу установки. Необходимо предусматривать специальные меры по предотвращению "сухого" выстрела.

Во многих случаях альтернативой пневматической гидропушке может быть пороховая, источником энергии в которой являются продукты сгорания пороха [9–11]. Она проще конструктивно и, главное, имеет некоторые возможности управления выстрелом.

1. ПОРОХОВАЯ ГИДРОПУШКА

Пороховая гидропушка состоит из камеры сгорания 1, цилиндрического ствола 3, в котором находится водяной заряд 2, отделенный от камеры сгорания пыжами 6, сужающегося сопла 4, которое для стабилизации скорости истечения заканчивается коллиматором 5 (рис. 2).

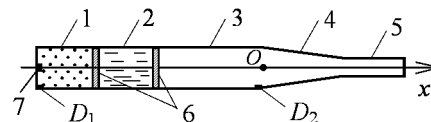


Рис. 2. Пороховая гидропушка:

- 1 – камера сгорания, 2 – водяной заряд, 3 – ствол,
4 – сужающееся сопло, 5 – коллиматор,
6 – пыжи, 7 – воспламенитель

Процессы в пороховой гидропушке начинаются с момента воспламенения пороха. Продукты сгорания пороха приводят в движение водяной заряд и разгоняют его в стволе. При втекании в сужающееся сопло вода продолжает ускоряться и истекает наружу с большой скоростью. В рассматриваемой конструкции гидропушки отсутствует поршень, и пороховые газы воздействуют на водяной заряд через тонкий пыж, влиянием которого при расчетах можно пренебречь. Время горения пороха зависит от многих факторов (например, характеристик пороха, геометрии его частиц, плотности заряжания, давления) и может изменяться в широких пределах. В общем случае, процесс горения

пороха может заканчиваться на различных стадиях выстрела: при ускорении воды в стволе, при втекании воды в сопло, при истечении струи.

Пороховая гидропушка по сравнению с пневматической обладает следующими существенными преимуществами:

- простотой конструкции,
- малыми габаритами и массой,
- большой удельной мощностью, обусловленной компактным источником энергии,
- простотой получения высокоскоростных импульсных струй большого диаметра (до 30 – 50 мм), обладающих громадной удельной энергией и импульсом,
- возможностью получения струй относительно большой длины,
- возможностью существенного увеличения дальности.

Выше указывалось, что коллиматор способствует стабилизации течения у выхода из сопла и, следовательно, увеличивает время истечения струи. Струя в этом случае представляет собой водяной шнур определенной длины, который с увеличением времени истечения увеличивается.

Длина струи – основной параметр совершенства выстрела гидропушки. Чем больше эта длина, тем больше энергия, импульс и дальность струи при сохранении прочих параметров. Назовем выстрел, позволяющий при заданных некоторых параметрах получить струю наибольшей длины, оптимальным (не в математическом, а в некотором условном смысле). Особенности пороховой гидропушки позволяют поставить задачу о поиске оптимального выстрела. Такой поиск можно осуществить путем варьирования в расчетах некоторых параметров.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Для построения математической модели гидропушки обычно принимают следующие допущения [1, 3, 4]. Вода считается идеальной и сжимаемой, теплообмен отсутствует, течение рассматривается в квазиодномерном приближении, влияние пыжей не учитывается, контактная поверхность "продукты сгорания-вода" является плоской, в сопле отсутствует воздух. Начальным является момент воспламенения пороха после срабатывания воспламенителя. При принятых допущени-

ях течение воды в гидропушке описывается следующей системой уравнений нестационарной газовой динамики:

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

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

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

где t – время; x – координата; u – скорость; F – площадь поперечного сечения сопла; p и ρ – давление и плотность; $B = 304.5$ МПа, $n = 7.15$, $\rho_0 = 1000$ кг/м³ – константы в уравнении состояния воды, в качестве которого взято уравнение Тэга.

Начальные условия следующие:

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

$$x_{g0} \leq x \leq x_{f0},$$

где x_{g0} и x_{f0} – начальные координаты контактной и свободной поверхностей.

Граничные условия ставятся на свободной поверхности:

$$p(t, x_f) = 0;$$

на контактной поверхности:

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

где x_f и x_g – текущие координаты свободной и контактной поверхностей; p_g и u_g – давление и скорость продуктов сгорания на контактной поверхности соответственно.

Горение пороха рассматривается в квазистационарном приближении, общепринятом для внутренней баллистики артиллерийских орудий [12]: порох воспламеняется мгновенно и горит параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания не меняется, а их состав однороден по объему; уравнение состояния продуктов сгорания учитывает собственный объем молекул. Система уравнений, описывающая квазистационарное горение пороха, и начальные условия для нее выглядят следующим образом:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1 p_g}{h_1},$$

$$Q_g = \frac{dm_g}{dt} = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{dz}{dt},$$

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

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

$$u_g = \frac{dx_g}{dt},$$

$$z = 0, \quad V_g = V_{g0}, \quad m_g = m_{g0},$$

$$p_g = p_{g0}, \quad x_g = -x_{g0}.$$

Здесь h_1 – половина толщины порохового зерна; z – толщина сгоревшего слоя; u_1 – константа скорости горения; p_g – давление продуктов сгорания; Q_g – скорость производства продуктов сгорания; χ_1 и $\sigma(z)$ – коэффициент и функция, зависящие от формы порохового зерна (для зерна трубчатой формы $\chi_1 = 1 + \frac{h_1}{c}$; $\sigma(z) = 1 - \frac{2h_1 z}{c + h_1}$; c – половина длины зерна); α – коволюм, учитывающий собственный объём молекул; m_g – масса продуктов сгорания; m_{p0} – начальная масса пороха; k – показатель адиабаты продуктов сгорания; q и ρ_p – удельная теплота сгорания и плотность пороха; V_g – объём продуктов сгорания; V_{g0} , m_{g0} и p_{g0} – начальные параметры (после срабатывания воспламенителя).

3. АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ

Расчеты проводились численно методом Годунова [13], обобщенном на течение воды в работах [1, 3–5, 10, 11, 14]. Процесс выстрела рассчитывался до истечения всей воды.

Расчетная сетка была подвижна, опиралась на контактную и на свободную поверхности и двигалась вместе с ними. Шаг сетки был однороден, но изменялся со временем. При этом задавался минимальный и максимальный шаг. По достижении свободной поверхностью среза сопла координата правой границы фиксировалась, и подвижной оставалась лишь левая граница. При втекании воды в сопло шаг сетки возрастал, в процессе истечения он уменьшался. Если величина шага выходила за пределы минимального или максимального значения, сетка модифицировалась, число ее ячеек или увеличивалось, или уменьшалось в два раза. В расчетах использовались сетки с начальным числом ячеек 256 и 512.

Параметры продуктов сгорания усреднялись по объему камеры сгорания.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ

Ниже проводится сравнение расчетных и экспериментальных результатов для пороховой гидропушки конкретной конструкции со следующими параметрами [10]: диаметр ствола 20 мм, радиус коллиматора и выходного сечения сопла 10 мм, длина ствола 400 мм, общая длина сопла и коллиматора 156 мм, объем камеры сгорания 0.135 л, масса водяного заряда 0.4 кг. Сопло имело форму конуса с углом раскрытия 13° . Использовался трубчатый порох со следующими параметрами: масса 0.08 кг, $u_1 = 0.83$ м/(с·ГПа), $q = 3.62$ МДж/кг, $\rho_p = 1600$ кг/м³, $k = 1.235$. Начальные параметры продуктов сгорания после срабатывания воспламенителя составляли: $p_{g0} = 5$ МПа, $V_{g0} = 0.0725$ л.

4.1. Измерение давления

Давление измерялось с помощью датчиков D_1 и D_2 , установленных в соответствии с рис. 2. Измерительная система запускалась в момент срабатывания воспламенителя. Датчики и аппаратура отвечали необходимым требованиям к измерению нестационарного давления в гидропушке, сформулированным в работах [3, 15]. На рис. 3 сплошные линии соответствуют расчету, а штриховые – эксперименту. Линии 1 и 2 показывают зависимости давления от времени в камере сгорания и на входе в сопло соответственно. Как видно, совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей достаточно хорошее как качественно, так и количественно.

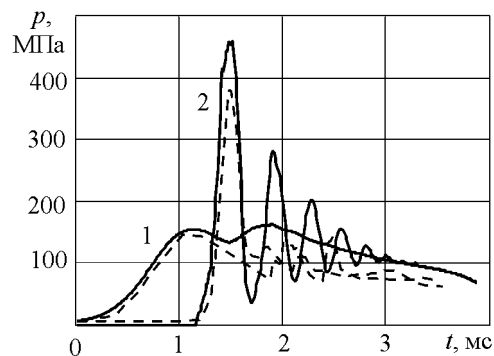


Рис. 3. Расчетные (сплошные) и экспериментальные (штриховые) зависимости давления от времени: 1 – в камере сгорания, 2 – у входа в сопло

Табл. 1.

Скорости	N эксперимента				
	1	2	3	4	5
v_1 , м/с	1111	1020	1163	1064	1020
v_2 , м/с	1148	1107	1240	1107	1000

4.2. Измерение скорости струи

Скорость головы струи измерялась бесконтактным методом. Его суть заключалась в том, что струя последовательно пересекала два лазерных луча, и с помощью частотомера фиксировалось время между прерываниями этих лучей. Использовались две идентичные системы, лучи которых были взаимно перпендикулярны. Система измерения скорости устанавливалась таким образом, что первый луч лазера находился в плоскости сечения среза сопла. Данные измерений приведены в табл. 1, где скорость v_1 соответствует первой системе, а скорость v_2 – второй.

Среднее значение скорости составило 1098 ± 65 м/с. Рассчитанное значение скорости истечения составило 1070 м/с. Таким образом, рассчитанное и измеренное значения скорости отличаются на 2 %.

5. РАСЧЕТЫ ОПТИМАЛЬНОГО ВЫСТРЕЛА

Промышленный образец гидропушки представляет собой довольно сложное техническое устройство. Его функционирование в технологических процессах обеспечивают специальные системы: зарядания, разрядания, отката, наведения. Кроме того, гидропушка должна быть установлена на манипуляторах, обеспечивающих перемещение устройства в нужное, с точки зрения технологического процесса, положение. Для обеспечения необходимой мобильности гидропушка должна быть установлена на самоходной машине.

Параметры выстрела гидропушки фиксированы; в то же время, она должна применяться к разрушению различных объектов, которые могут отличаться по прочности, объему, размерам, другим характеристикам. Это значит, что каждому объекту отвечает свой, наиболее рациональный с экономической точки зрения выстрел гидропушки. Конкретная же гидропушка будет обеспечивать расчетный экономический эффект только в довольно узком диапазоне изменения размеров объектов разрушения и их свойств. При выходе

из этого диапазона экономическая эффективность применения гидропушки будет уменьшаться. Таким образом, для обеспечения требуемой эффективности разрушения в общем случае необходим немалый спектр сменных гидропушек различных параметров. Конкретная гидропушка определяется в зависимости от свойств заданного объекта разрушения.

Более рациональным здесь может быть подход, когда расширение диапазона эффективности машины достигается не сменой гидропушки, а только определенных ее частей. Наиболее простой путь – это замена сопла.

Ниже приводятся результаты расчетов оптимального выстрела гидропушки. Оптимизация осуществлялась путем варьирования начального объема камеры сгорания и выходного диаметра сопла. При этом варианты отличались друг от друга массой порохового заряда, определяющего мощность установки.

Рассматривались три варианта установок с массой порохового заряда 100, 75 и 50 г. Фиксировались следующие параметры: диаметр ствола 40 мм, масса водяного заряда 500 г (при этом его длина составляла 398 мм), длина коллиматора 250 мм, начальное давление газов 5 МПа. Использовался охотничий порох "Крук" со следующими параметрами: показатель адиабаты 1.257, коволюм 0.00121 м³/кг, удельная теплота горения 3.693 МДж/кг, константа скорости горения 750 кг/м³, плотность 1360 кг/м³. Сопло имело форму конуса, угол которого определялся его длиной, входным и выходным радиусами. Оптимальный выстрел должен был обеспечить скорость струи 1500 м/с при давлении воды не более 1.2 ГПа.

Изменяемые параметры выстрела приведены в табл. 2, где m_n – масса пороха; u_{\max} – максимальная скорость истечения; p_{\max} – максимальное давление воды; V_{k0} – начальный объем камеры сгорания; R_a – радиус выходного сечения сопла; L_p – путь разгона воды; t_c – время истечения струи; L_c – длина струи.

Оптимальный характер выстрелов проиллюстрирован на рис. 4, где показаны зависимости скорости втекания в сопло и скорости истечения от времени. Горизонтальные участки кривых соответствуют истечению струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введено понятие оптимального выстрела гидропушки, для которого при некоторых условиях длина струи является наибольшей. Однако выстрел

Табл. 2.

m_p , г	u_{max} , М/с	p_{max} , ГПа	V_{ko} , см ³	R_a , мм	L_p , мм	t_c мс	L_c мм
100	1566	1.120	132	10	300	0.18	260
75	1560	1.024	94	9.1	330	0.16	235
50	1490	0.867	60	7.9	355	0.13	170

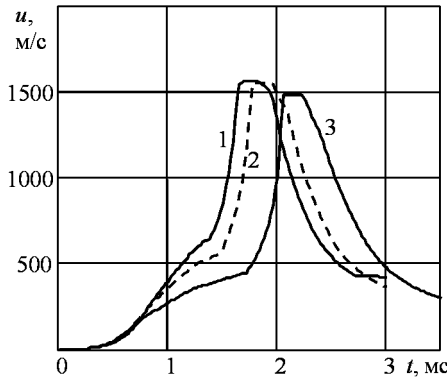


Рис. 4. Зависимость скоростей втекания и истечения от времени при массе пороха: 1 – 100 г, 2 – 50 г и 3 – 50 г

может быть экономически оптимальным в реальном технологическом процессе только в узком диапазоне значений, когда запасенная энергия и мощность гидропушки близка к необходимым для данного процесса разрушения. Предложен путь для увеличения экономичного диапазона для гидропушки с пороховым приводом. Это достигается использованием сменного сопла гидропушки, которое позволяет изменять энергию и мощность установки в соответствии с необходимыми требованиями для разрушения конкретного объекта с учетом его свойств.

Работа выполнена при поддержке фонда CRDF Project No: UE2-2441-DO-02.

1. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород.– К.: Вища школа, 1987.– 155 с.
2. Atanov G. The Impulsiv Water Jet Device: A New Machine For Breaking Rock // International Journal of Watwr Jet Technolgy.– 1996.– V 1, N 2.– P. 85–91.

3. Атанов Г. А., Семко А. Н., Украинский Ю. Д. Исследование внутренней баллистики гидропушки // Изв. АН СССР. МЖГ.– 1983.– N 4.– С. 168–170.
4. Атанов Г. А., Семко А. Н. О соотношении между динамическим давлением ультраструи и статическим давлением в установке // Аэрогазодинамика нестационарных процессов.– Томск, ТГУ.– 1987.– С. 9–13.
5. Atanov G., Gubsky V., Semko A. The Pressure Rise Factor For Powder Hydro-cannon // Proceeding of the 13 th International Conference on Jetting Technology.– Sardinia, Italy, 1996.– P. 91–103.
6. Cooley W. C., Lucke W. N. Development and Testing of a Water Cannon for Tunneling // Proc. of the 2nd International Symposium on Jet Cutting Technology.– Cambridge, England, 1974.– P. Paper J3.
7. Glenn L. A. The mechanics of the impulsive water cannon // Computers and Fluids.– 1975.– V. 3.– P. 197–215.
8. Semko A. N. Non-stationary cavitation of a liquid in pulse processes // Proceedings of International Summer Scientific Scool "High Speed Hydrodynamics"(HSH 2002).– Cheboksary, Russian, 2002.– С. 377–381.
9. Atanov G. A., Semko A. N., Petrenko O. P., Geskin E. S., and other Peculiarities of the powder hydrocannon operation // Proceedings of 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress, Exposition.– Washington.–2003.–P.
10. Атанов Г. А., Губский А. Н., Семко А. Н., Внутренняя баллистика пороховой гидропушки // Изв. РАН, Механика жидкости и газа.– 1997.– N 6.– С. 191–194.
11. Atanov G. A., Semko A. N. The powder hydro-cannon // Proceedings of International Summer Scientific School "High Speed Hydrodynamics" (HSH 2002).– Cheboksary, Russian, 2002.– P. 419–424.
12. Орлова Б. В. Проектирование ракетных и ствольных систем.– М.: Машиностроение, 1974.– 828 с.
13. Годунова С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики.– М.: Наука, 1976.– 400 с.
14. Атанов Г. А. Расчет выстрела гидропушки методом "распада разрыва" // Гидромеханика.– 1974.– Вып. 30.– С. 51–54.
15. Атанов Г. А., Украинский Ю. Д. Экспериментальное исследование внутренней баллистики импульсного водомета // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа.– 1979.– N 3.– С. 150–152.