

Дослідження проблем кінематики, динаміки, міцності та надійності машин і їх вузлів

УДК 532.5:518.5

ОСОБЕННОСТИ ВЫСТРЕЛА ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ

Атанов Г.А. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Гескин Э.С., Петренко О.П. (Нью Джерси технологический ин-т, г. Ньюарк, США)

Семко А.Н. (ДонНУ, г. Донецк, Украина)

Введение. Для получения импульсных струй жидкости высокой скорости (ультраструй) применяются импульсный водомет (ИВ) и гидропушка (ГП) [1, 2]. В импульсном водомете реализуется экструзионный принцип, вода через небольшое отверстие вытесняется с помощью предварительно разогнанного тяжелого поршня. Процесс внутри ствола импульсного водомета хорошо моделируется квазистационарным приближением, а это значит, что динамическое давление (динамический напор) струи ИВ равен статическому давлению в стволе. Отношение указанных давлений получило название коэффициента превышения давления (k_p), и для ИВ $k_p = 1$ [1, 3]. В отличие от ИВ в ГП реализуется инерционный принцип разгона воды, при котором ускорение воды происходит в процессе ее втекания в длинное сужающееся сопло. Это свойство позволяет с помощью ГП получать ультраструи большей скорости, чем для ИВ.

1. Особенности гидропушек. Принципиальной особенностью ГП является возможность получения струй, динамический напор которых намного превышает статическое давление в стволе установки. Это значит, что для гидропушки коэффициент повышения давления $k_p > 1$. Была проведена серия специальных расчетов с целью определения наибольшего возможного значения k_p , при этом получено $k_{p \max} = 3,6$ [3]. Отсюда следует, что вполне возможно при приемлемых внутренних давлениях получать скорости импульсных струй свыше 2000 м/с, динамический напор которых превышает 30-35 ГПа.

Наиболее распространенной схемой гидропушки, исследуемой как теоретически, так и практически, является гидропушка с пневматическим приводом (рис. 1). Ее основные части следующие: 1 - ресивер со сжатым газом, 2 – поршень, 3 – водяной заряд, 4 – ствол, в котором перемещается поршень с водой, 5 – сужающееся сопло. Источником энергии здесь является 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 часть затем переходит в кинетическую энергию струи.

Процессу выстрела такой ГП свойственна жесткая детерминированность, обусловленная тем, что движение поршня подчинено определенным законам и не может корректироваться. Этим обоснована слабая возможность управления параметрами выстрела пневматической ГП.

Одной из характерных особенностей выстрела пневматической ГП является резкое уменьшение скорости истечения струи, причиной которого является торможение поршня [1, 3, 4, 5]. В свою очередь, уменьшение скорости истечения приводит к разрушению

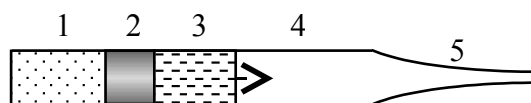


Рис. 1. Гидропушка

струи, так как ее передние частицы движутся быстрее, чем задние. Это вызывает растягивающие напряжения, в струе возникает нестационарная кавитация [1, 6, 7], а затем и разрушение. В результате расстояние эффективного разрушения, или дальнобойность, для ГП крайне низки. В экспериментах было обнаружено, что оно составляет величину порядка 15 см при диаметре сопла 10 мм.

Для увеличения дальнобойности ГП необходимо предотвратить резкое уменьшение скорости истечения жидкости. С этой целью было предложено на выходе сопла ГП использовать так называемый коллиматор – цилиндрический участок определенной длины [8, 9]. При движении в коллиматоре у фронта течения наблюдается выравнивание скоростей, и в течение некоторого отрезка времени истечение струи происходит с более-менее постоянной или слабо меняющейся скоростью. Таким образом, можно получить струю некоторой длины, цилиндрический столбик воды, движущийся со скоростью, равной 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 будет струя, тем больше будут ее дальнобойность и разрушающая способность. Однако расчеты показывают, что в ГП 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 ГП с пневматическим приводом должна удовлетворять некоторым требованиям. В частности, должно быть относительно большое значение отношения диаметра ствола к выходному диаметру сопла (ориентировочно около 10). Следствием этого является относительно малый диаметр струи (около 10-12 мм). Увеличение диаметра струи крайне желательно, так как при сохранении скорости истечения в этом случае 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. Это приводит к существенному увеличению габаритов и массы установки. При этом надо учесть, что изготовление длинного специально спроектированного сопла ГП с небольшим внутренним диаметром является очень сложной технологической задачей.

Применение пневматического привода требует наличия системы взвода поршня, т.е. возврата его в исходное положение для производства следующего 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 предъявляются к системе подачи воды в ГП. Если она откажет и вода не будет залита, может произойти так называемый «сухой» выстрел. Поршень разгонится без воды, и затем произойдет его удар по корпусу установки, что может привести к очень серьезным последствиям. Поэтому необходимо предусматривать специальные меры по предотвращению «сухого» выстрела.

На рис. 2 для иллюстрации приведены распределения давления и скорости

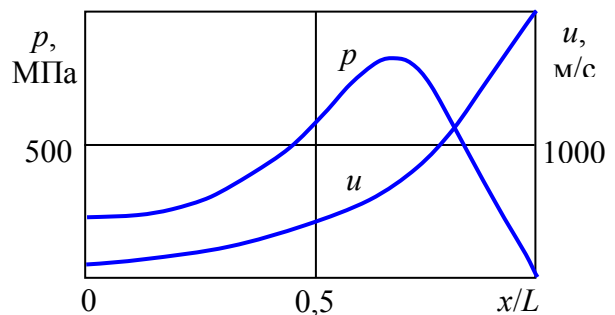


Рис. 2. Распределение давления и скорости по длине ГП

по длине ГП на начало истечения струи (кривые 1 и 2) для установки с параметрами [3]: масса поршня 63 кг, скорость поршня 62 м/с, масса воды 2 кг, диаметр ствола 80 мм, диаметр входа в сопло 30 мм, диаметр выхода из сопла 10 мм, длина сопла 1000 мм, длина ствола 700 мм, масса установки около 2000 кг. Расчетная скорость струи 2000 м/с, максимальное давление в сопле 830 МПа, динамическое давление струи 3000 МПа, коэффициент превышения давления равен 3,6, энергия поршня 121 кДж. Примерно такие же габариты и параметры имеют гидропушки других конструкций [10, 11].

2. Пороховая гидропушка. Пороховая ГП, по сравнению с пневматической, обладает следующими существенными преимуществами:

- малые габариты и масса,
- большая удельная мощность, обусловленная компактным источником энергии,
- простота получения ультраструй большого диаметра (до 30-50 мм),
- возможность получения ультраструй относительно большой длины,
- большая удельная энергия и импульс ультраструй,
- возможность существенного увеличения дальности.

При тех же гидродинамических параметрах пороховая ГП значительно легче и меньше по размерам, чем традиционная ГП с поршнем.

Пороховая ГП состоит из камеры сгорания 1, цилиндрического ствола 3, в котором находится водяной заряд 2, зафиксированный пыжами 6, сужающегося сопла 4, которое для стабилизации скорости струи заканчивается коллиматором 5 (рис. 3). Процессы в пороховой ГП начинаются с момента воспламенения пороха. Пороховые газы приводят в движение водяной заряд и разгоняют его в стволе. При втекании в сужающееся сопло вода продолжает ускоряться и истекает наружу с большой скоростью. Обычно сопло заканчивается коллиматором, который служит для стабилизации струи и выравнивания скорости по ее длине. В рассматриваемой конструкции ГП отсутствует поршень, и пороховые газы непосредственно воздействуют на водяной заряд. Горение пороха происходит все время, пока вода втекает в сопло, и может продолжаться до завершения выстрела – вытеснения водяного заряда из ГП. Варьируя процесс горения пороха можно в определенных интервалах влиять на гидродинамические параметры пороховой ГП. Для построения математической модели пороховой ГП сделаем следующие допущения. Жидкость считаем идеальной и сжимаемой, вязкостью и теплопроводностью пренебрегаем [1]. Влияние пыжей не учитываем, профиль сопла предполагаем плавным и радиальным течение пренебрегаем, рассматривая движение воды в квазиодномерном приближении, влиянием воздуха в сопле пренебрегаем. Границу раздела “пороховые газы – вода” считаем плоской в течение всего выстрела. За начальный принимаем момент воспламенения пороха. Начало координат поместим у входа в сопло, ось x направим вдоль оси установки.

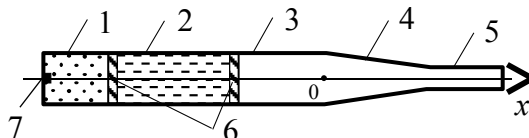


Рис. 3. Пороховая гидропушка

В принятой постановке квазиодномерное движение идеальной сжимаемой жидкости в гидропушке описывалось системой уравнений нестационарной газовой динамики [10, 11]

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

с начальными и граничными условиями

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

$$p(t, x_f) = 0, \quad p(t, x_g) = p_g, \quad u(t, x_g) = u_g, \quad (3)$$

где t – время, x – координата, u – скорость, F – площадь поперечного сечения сопла, p и ρ – давление и плотность, $B = 304,5$ МПа, $n = 7,15$, $\rho_0 = 1$ г/см³ – 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 u_g – давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности.

Горение пороха рассматривалось в квазистационарном приближении при допущениях, характерных для задач внутренней баллистики в артиллерии [14]: порох воспламеняется мгновенно и горит адиабатически параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания постоянный, их параметры 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

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{u_1 p_g}{h_1}, \quad Q_g = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{u_1 p_g}{h_1}, \\ \frac{1}{k-1} \frac{d(p_g V_g)}{dt} + p_g F u_g &= q Q_g, \\ \frac{dV_g}{dt} &= Q_g (1/\rho_p - \alpha) + u_g F, \quad u_g = \frac{dx_g}{dt}, \\ z = 0, \quad V_g &= V_{g0}, \quad p_g = p_{g0}, \quad x_g = x_{g0}. \end{aligned} \quad (4)$$

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

Поставленная задача решалась численно методом Годунова [15], обобщенным на случай нестационарных движений жидкости [1, 3, 12, 13]. Течение рассчитывалось с момента воспламенения пороха до окончания вытеснения жидкости из сопла гидропушки. Расчетная сетка равномерная и подвижная, перемещающаяся вместе со свободной и контактной поверхностями. При истечении струи на срезе сопла ставилось граничное условие такое же, как на свободной поверхности (3). Система обыкновенных дифференциальных уравнений (4) решалась численно улучшенным методом Эйлера второго порядка аппроксимации.

3. Результаты расчетов. Ниже приведены результаты расчетов для пороховой ГП конкретной конструкции [13] со следующими параметрами: диаметр ствола 32 мм, диаметр сопла и коллиматора 15 мм, длина сопла 70 мм, угол конического сопла 13°, длина коллиматора 75 мм, объем камеры сгорания 47 см³, масса водяного заряда 230 г, длина разгона водяного заряда 105 мм. Масса снаряженной установки 16 кг, длина 650 мм, энергия выстрела 145 кДж. Использовался трубчатый порох массой 40 г со следующими характеристиками: $u_1 = 0,83$ м/(с·ГПа), $q = 3,62$ МДж/кг, $\rho_p = 1,6$ г/см³, $k = 1,235$, α

$= 0,001 \text{ м}^3/\text{кг}$. Начальное давление пороховых газов после срабатывания воспламенителя $p_{g0} = 5 \text{ МПа}$.

На рис. 4 представлены зависимости давления от времени в камере сгорания, у входа в сопло и в коллиматор (кривые 1, 2, 3) и скорости втекания и истечения жидкости от времени (кривая 4). Расчетная скорость струи составляла 1120 м/с , а максимальное давление в сопле достигало 628 МПа , давление пороховых газов не превышало 190 МПа . Скорость струи, измеренная бесконтактными лазерными измерителями на расстоянии $10\text{-}15 \text{ см}$ от среза сопла составляла $1110\text{-}1210 \text{ м/с}$.

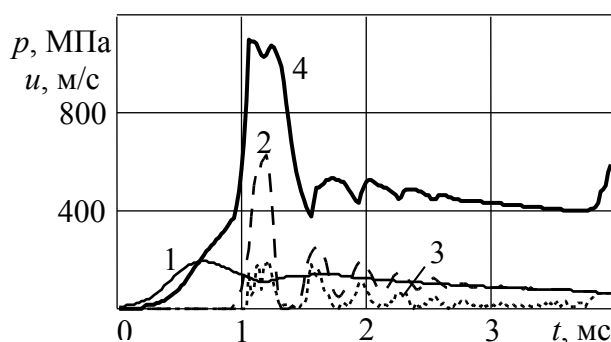


Рис. 4. Зависимость параметров от времени

На рис. 5 приведено распределение давления и скорости по длине установки на начало истечения струи (кривые 1 и 2). Разгон водяного заряда в стволе ГП длится около $0,9 \text{ мс}$. К началу втекания в сопло скорость водяного заряда достигает 350 м/с . Втекание воды в сужающееся сопло приводит к быстрому увеличению ее скорости - за $0,2 \text{ мс}$ скорость фронтальных частиц возрастает до 1100 м/с . При переходе в коллиматор распределение скорости по длине водяного заряда выравнивается и гидродинамические параметры струи стабилизируются. Это позволяет получить компактную высокоскоростную струю жидкости, обладающую большим удельным импульсом и энергией. Движению жидкости в коллиматоре на рис. 5 соответствует участок АВ. Из графика видно, что на этом участке давление значительно меньше, чем в сопле, поэтому изменение скорости по длине коллиматора незначительное.

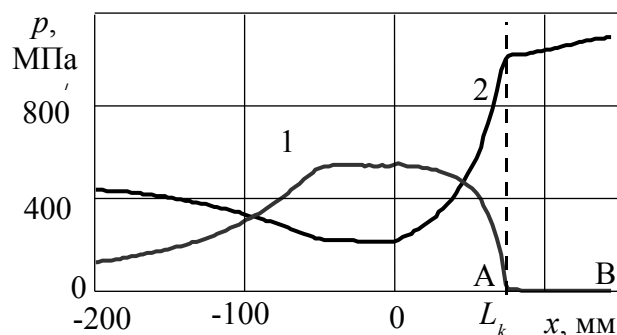


Рис. 5. Распределение давления и скорости по длине ГП

В этом состоит одно из назначений коллиматора – выравнивание скорости по длине струи. Небольшой градиент скорости вдоль оси коллиматора способствует получению более компактной струи, которая обладает большей дальностью и разрушающей способностью. Второе назначение коллиматора состоит в подавлении радиального течения, которое возникает при движении жидкости в сужающемся сопле. Расчеты в квазиодномерном приближении, которое использовалось для пороховой ГП, не учитывают радиальное течение, поэтому роль коллиматора в нивелировании радиального движения в этих расчетах не проявляется. Более точные расчеты, проведенные в осесимметричной

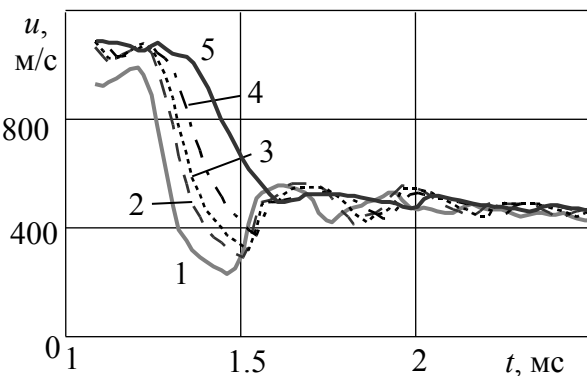


Рис. 6. Зависимость скорости истечения струи от времени

постановке, подтвердили стабилизирующую роль коллиматора, которая способствует подавлению радиального течения и выравниванию гидродинамических параметров в поперечном сечении коллиматора. Как правило, длина коллиматора составляет около 5-10 диаметров сопла. При такой длине коллиматора получается оптимальная струя с точки зрения ее компактности и скорости [8, 9]. При увеличении длины коллиматора струя становится более компактной, но ее скорость из-за потерь на трение уменьшается.

На рис. 6 приведена зависимость скорости истечения струи от времени для безразмерных длин коллиматора: $L_k = 0, 2, 3, 5$ и 10 , отнесенных к диаметру сопла (кривые 1 – 5 соответственно). Из графиков видно, что для коллиматора длиной $L_k = 10$ истечение струи ГП начинается в момент времени $t = 1,08$ мс практически с максимальной скоростью, которая мало изменяется в течение времени истечения высокоскоростного участка струи, которое длится около 0.3 мс (кривая 5). За это время формируется высокоскоростная компактная струя длиной около 350 мм. В дальнейшем скорость истечения быстро уменьшается, головная часть струи отрывается и струя разрушается.

Как видно, при уменьшении длины коллиматора длина высокоскоростного участка струи уменьшается. Наблюдаемые пульсации скорости истечения связаны с волновыми процессами внутри установки, которые происходят при отражении волн от среза сопла и контактной поверхности – границы раздела «пороховые газы – вода». При увеличении длины коллиматора длина струи возрастает, а пульсации скорости сглаживаются.

Заключение. Рассмотрены конструктивные и физические особенности выстрела гидропушки с пороховым приводом. Показаны преимущества пороховой гидропушки по сравнению с пневматическими гидропушками, использующими энергию поршня. Оценено влияние коллиматора на параметры струи пороховой гидропушки. Показано, что, изменяя длину коллиматора, можно в определенных пределах влиять на параметры струи, увеличивая эффективность выстрела пороховой гидропушки.

Список литературы: 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. Vol. 1, No 2, 1996. – P. 85-91. 3. 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. 4. Glenn L. A. The mechanics of the impulsive water cannon. – Computers and Fluids, vol. 3, 1975. – P. 197-215. 5. Ryhming J. L. Analysis of unsteady incompressible jet nozzle flow. – J. of Appl. Mathematics and Physics (ZAMP), vol.24, 1973. – P. 149-164. 6. Атанов Г. А. Расчет течения с отколами в гидропушке // Изв. ВУЗов СССР, Энергетика. – 1974. – № 5. – С. 108-113. 7. Semko A.N. Non-stationary cavitation of a liquid in pulse processes // Proceediings of International Summer Scientific School “High Speed Hydrodynamics” (HSH 2002). – Cheboksary, Russian/ Washington, USA: Cheboksary, Russian, June 16-23, 2002. – P. 377-381. 8. Leach S.J., Walker G.L. The application of high speed liquid jets to cutting // Phil. Trans. Roy Soc. of London 260. – A, 295 (1966). 9. Daniel I.M. et al. Photoelastic study of water jet impact // Proc. of the 2nd Intern. Symp.on Jet Cutting Technology (Cambridge, England: 2nd-4th April, 1974). – Paper A1, pp. A1 - 1, A1 - 18. 10. Cooley W.C. and 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, Paper J3. 11. Voitsekhovskiy B.V.

Jet nozzle for obtaining high pulse dynamic pressure heads, U.S. Patent № 3, 343, 794, 26 Sept. 1967. **12.** Атанов Г.А., Губский А.Н., Семко А.Н. Внутренняя баллистика пороховой гидропушки // Изв. РАН, Механика жидкости и газа. – 1997, № 6. – С. 191-194. **13.** Atanov G.A., Semko A.N. The powder hydro-cannon // Proceedings of International Summer Scientific School “High Speed Hydrodynamics” (HSH 2002). – Cheboksary, Russian/ Washington, USA: Cheboksary, Russian, June 16-23, 2002. – P. 419 – 424. **14.** Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Орлова Б.В. – М.: Машиностроение. 1974. – 828 с. **15.** Численное решение многомерных задач газовой динамики/ Под ред. Годунова С.К. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

ОСОБЛИВОСТІ ПОСТРІЛУ ПОРОХОВОЇ ГІДРОГАРМАТИ

Атанов Г.А., Гескін Е.С., Петренко О.П., Семко А.Н.

Розглянуто конструктивні і фізичні особливості пострілу порохової гідрогармати. Показано переваги цій гідрогармати в порівнянні із пневматичними гідрогарматами, що використовують енергію поршня. Оцінено вплив колиматора на параметри струменя порохової гідрогармати. Показано, що, змінюючи довжину колиматора, можна в певних межах впливати на параметри струменя, збільшуючи ефективність пострілу порохової гідрогармати.

ОСОБЕННОСТИ ВЫСТРЕЛА ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ

Атанов Г.А., Гескин Э.С., Петренко О.П., Семко А.Н.

Рассмотрены конструктивные и физические особенности выстрела пороховой гидропушки. Показаны преимущества этой гидропушки по сравнению с пневматическими гидропушками, использующими энергию поршня. Оценено влияние коллиматора на параметры струи пороховой гидропушки. Показано, что, изменяя длину коллиматора, можно в определенных пределах влиять на параметры струи, увеличивая эффективность выстрела пороховой гидропушки.

PECULIARITIES OF A SHOT OF A POWDER HYDROCANNON

Atanov G.A., Geskin E.S., Petrenko O.P., Semko A.N.

Constructive and physical features of a shot of a powder hydrocannon are considered. Advantages of this hydrocannon in comparison with the pneumatic hydrocannons, which use an energy of the piston are shown. Influence of a collimator on parameters of a jet of a powder hydrocannon is estimated. It is shown, that changing length of the collimator make it possible to influence in the certain limits in parameters of a jet and to increase efficiency of a shot of a powder hydrocannon.

Рецензент: д.т.н., проф. Шевченко Ф.Л.