

УДК 532.5:518.5

Г.А. Атанов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Э.С. Гескин, проф., Нью-Джерси Технологический институт,
Нью-Джерси, США, **А.В. Ковалев**, инженер, **О.А. Русанова**,
канд. техн. наук, доц., Донецкий национальный университет
В. Самарджич, асп., Нью-Джерси Технологический
институт, Нью-Джерси, США, **А.Н. Семко**, д-р техн. наук,
проф., Донецкий национальный университет

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОПУШКИ ПО ПРОБИВАНИЮ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН

В статье описываются экспериментальные исследования по пробиванию стальных пластин разной толщины импульсной струей жидкости высокой скорости. Для получения импульсных струй жидкости используется гидропушка с пороховым приводом. В экспериментах измерялась скорость головы струи перед ударом о пластину. Измерения проводились при помощи специально разработанного бесконтактного лазерного измерителя скорости. В отдельных опытах скорость головы импульсной струи достигала 1300 м/с. По результатам пробивания отверстий в пластинах делается заключение об эффективности импульсной струи пороховой гидропушки в зависимости от расстояния до преграды.

пробивание стальных пластин, импульсная струя, пороховая гидропушка

Проблема и ее связь с научными или практическими задачами. Импульсные высокоскоростные струи жидкости имеют много практических приложений. Интерес в инженерном деле к импульсным и пульсирующим струям связан с тем, что водяной заряд, ударяющий о мишень, может передавать кратковременное давление большой интенсивности. Интересным приложением является фрагментация различных типов материалов. Особенно перспективным является разрушение негабаритов и бетонных блоков в случае невозможности использования взрывотехники. Импульсные струи воды высокой скорости используются для разрушения горных пород и крепких материалов [1 - 4] и угля [5 - 9].

Инструментом разрушения в этих процессах является импульсная струя жидкости, которая ударяет по преграде, при этом скорость удара может достигать 2000 м/с. Тот факт, что в природе нет материала, который мог бы выдержать удар такой струи, расширяет возможности применения импульсной струи для разрушения.

Для получения импульсных струй воды используют различные методы: экструзионный, инерционный, кумуляционный, подводный электрический взрыв и др.

Гидродинамические задачи, связанные с импульсным гидродинамическим способом разрушения, можно разделить на три группы:

- задачи внутренней баллистики, посвященные процессам внутри установок для получения импульсных струй;
- задачи внешней баллистики, связанные с процессами движения струи в воздухе;
- задачи взаимодействия струи с преградой.

Наиболее исследованными являются задачи внутренней баллистики. Развитые методы численных расчетов позволяют с достаточной точностью определять характеристики установок различных типов [1]. Задачи внешней баллистики и взаимодействия струи с преградой в теоретическом плане очень сложны, и основным методом исследования здесь является эксперимент.

Анализ исследований и публикаций. Использование энергии высокоскоростных струй воды для резания горных пород и твердых материалов получило признание во всем мире как одно из перспективных направлений развития техники. Совместное воздействие на массив крепкой породы механического инструмента и высокоскоростной струи воды может обеспечить расширение области применения комбайнов на породы повышенной крепости и увеличить темпы производства горных выработок [6 - 9]. Оценивая современное состояние науки и практики в области гидромеханического способа разрушения горных пород и создания на его основе гидромеханических исполнительных органов проходческих комбайнов можно сделать вывод о том, что для расширения области применения проходческих машин на более крепкие породы требуется или использовать импульсные струи воды высокого давления, или повышать давление воды до сверхвысоких значений [6, 9].

Анализ и обобщение экспериментальных данных [1], полученных в лабораторных и шахтных исследованиях по разрушению углей и пород различных марок и крепости, показывает, что при взаимодействии высокоскоростной импульсной струи с горной породой протекают различные физические процессы, каждый из которых может вызвать разрушение. В качестве основных причин можно выделить распространение и взаимодействие ударных волн и волн разрежения, которые приводят к появлению растягивающих напряжений;

действие гидравлического клина на трещиноватые породы, воздействие локального гидравлического удар, сопровождающего захлопывание каверн; понижение прочностных свойств массива вследствие переменной нагрузки. Степень влияния каждого фактора на разрушение породы зависит от ее свойств, а также усталости массива.

Эффективность разрушения преграды импульсной струей зависит от многих параметров, характеризующих струю. Это, в первую очередь, давление, которое струя развивает на преграде. При этом надо говорить об ударном давлении, или давлении за ударной волной, возникающем при ударе струи, но действующем только в начальной стадии процесса, и о динамическом напоре струи, существующем в течение всего периода взаимодействия. Оба эти давления определяются скоростью струи. Таким образом, эффективность разрушения существенно зависит от скорости струи. Поскольку речь идет об импульсном воздействии, существенным параметром взаимодействия являются также еще одна интегральная характеристика струи, учитывающая время взаимодействия, - импульс. Указанные характеристики определяются в процессе расчета внутренней баллистики в выходном сечении сопла. Однако в процессе движения струи они существенно изменяются.

Постановка задачи. Для оценки разрушающей способности струи необходимо знать, каковы скорость и импульс струи при взаимодействии ее с преградой. Данная задача ввиду ее сложности может быть решена только экспериментально. Таким образом, ставится задача измерения скорости и импульса струи в процессе ее полета.

Изложение материала и результаты.

Характерной особенностью выстрела гидропушки (ГП) традиционной конструкции с поршневым приводом является резкое уменьшение скорости истечения струи сразу же после начала истечения. В экспериментах было обнаружено, что расстояние, на котором ГП эффективно разрушает преграду, составляет величину не более 15 см при выходном диаметре сопла 10 мм [10]. Существенно повысить дальноточность импульсной струи позволяет применение пороховой ГП, которая является объектом исследования в настоящей работе ГП.

Эффективность пороховой ГП определялась по пробиванию стальных пластин разной толщины, которые располагались на разных расстояниях от ГП. Для этой цели было разработано специальное экспериментальное устройство. Полученные результаты позволяют

лучше оценить возможности ГП и определить пути повышения ее эффективности.

Для получения импульсных струй жидкости высокой скорости использовалась ГП с пороховым приводом [11]. Пороховая ГП (рис. 1) состоит из камеры сгорания 1, цилиндрического ствола 3, в котором между пыжами 6 находится

водяной заряда 2, сужающегося сопла 4, которое заканчивается цилиндрическим коллиматором 5. Процессы в такой ГП начинаются с момента воспламенения пороха с помощью капсюля 7. Пороховые

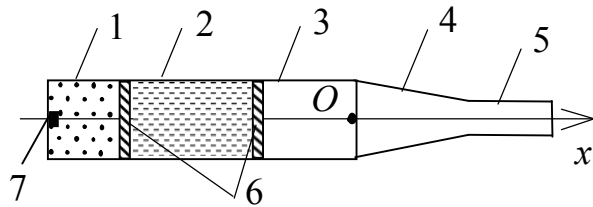


Рисунок 1-Пороховая гидропушка

газы приводят в движение водяной заряд и разгоняют его в стволе. При втекании в сужающееся сопло вода продолжает ускоряться, многократно увеличивая скорость у фронта течения, и истекает наружу с большой скоростью. Коллиматор служит для стабилизации течения, что приводит к выравниванию скорости по длине струи.

Как показали исследования [11 - 15] внутренняя баллистика пороховой ГП хорошо описывается при следующих допущениях. Вода считается идеальной и сжимаемой, вязкостью, теплопроводностью и радиальным течением пренебрегается (квазиодномерное приближение) [1]. Влияние пыжей не учитывается, граница раздела "пороховые газы - вода" считается плоской в течение всего выстрела и является контактной поверхностью.

В принятой постановке квазиодномерное движение воды в пороховой гидропушке описывалось системой уравнений нестационарной газовой динамики [13]

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

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

с начальными и граничными условиями

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

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

где t - время, x - координата, v - скорость, F - площадь поперечного сечения сопла, p и 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 v_g - давление и скорость пороховых газов на контактной поверхности.

Горение пороха рассматривалось в квазистационарном приближении при допущениях, характерных для задач внутренней баллистики в артиллерии [13]: порох воспламеняется мгновенно и горит адиабатически параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания постоянный; параметры продуктов сгорания одинаковые по объему и связаны упрощенным уравнением Ван-дер-Ваальса, учитывающим только собственный объем молекул.

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

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

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; например, для зерна трубчатой формы $\chi_1 = 1 + h_1/c$, $\sigma(z) = 1 - 2h_1 z / (c + h_1)$; c - половина длины порохового зерна; α - коэффциент (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.

Приведенная система уравнений, описывающая движение жидкости и горение пороха, решались численно методами Родионова и Годунова [16, 17].

Экспериментальные исследования проводились на пороховой ГП со следующими характеристиками: диаметр ствола - 32 мм, диаметр сопла - 15 мм, длина сопла - 70 мм, длина коллиматора - 60 мм, масса водяного заряда - 230 г, длина разгона водяного заряда - 110 мм, охотничий порох марки "Крук" массой - 30 г, объем камеры сгорания - 41.7 см^3 , начальное давление пороховых газов - 5 МПа, прорывное давление пороховых газов - 30 МПа, показатель адиабаты продуктов сгорания - 1.257, коэффциент пороховых газов - $1.21 \text{ дм}^3/\text{кг}$, масса установки - 15.2 кг.

Схема проведения экспериментальных исследований по пробиванию стальных пластин показана на рис. 2. Пороховая ГП 1 устанавливалась на заданном расстоянии от мишени 6, в которую ударялась импульсная струя 2. Во время выстрела, струя пересекала поочередно два лазерных луча 5 измерителя скорости 4, который фиксировал скорость головы струи.

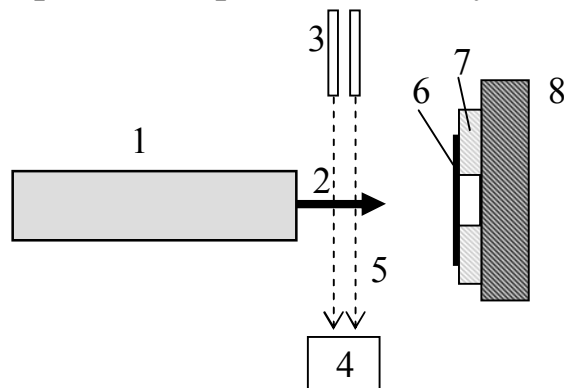


Рисунок 2-Схема проведения эксперимента

Мишень представляла собой стальные пластины размером 150×200 мм разной толщины от 3 до 8 мм. Эти пластины располагались напротив массивной стальной плиты 8 и опирались на кольцевой упор 7 с внутренним диаметром 90 мм. Пластина для предотвращения смещения прижималась к упору болтами. Во время эксперимента струя направлялась в центр пластины. Наведение струи в центр мишени осуществлялось при помощи специального лазерного прицела, который вставлялся в ствол ГП, перед каждым выстрелом.

1 - гидропушка, 2 - импульсная струя, 3 - источники лазерного излучения, 4 - измеритель скорости, 5 - лазерные лучи, 6 - стальная пластина, 7 - стальная кольцевая опора, 8 - массивная плита

В экспериментах изменялась толщина стальных пластин и расстояние до мишени. Результаты экспериментов приведены в табл. 1. Первой испытывались пластины толщиной 8 мм, которая пробивалась струей на расстояниях до 40 см. Начиная с этого расстояния, пробивалась пластина меньшей толщины в 6 мм. Как только при увеличении расстояния пластина переставала пробиваться струей жидкости, то толщина пластины уменьшалась и эксперименты для данного расстояния повторялись. Затем расстояние до мишени опять увеличивалось, пока еще пластина заданной толщины пробивалась

струей жидкости. Максимальное расстояние до мишени составляло 150 см.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований

№	S , см	h , мм	v , м/с	Форма и размер отверстия, мм.
1	5.5	8	1428	15×30, овал
2	10	8	-	12×28, овал
3	20	8	1219	15×15, круг
4	40	8	1315	не пробита
5	40	5	1312	30×30, круг
6	60	6	1315	10×10, круг
7	60	6	1111	25×25, круг
8	80	6	1388	15×15, круг
9	100	5	1388	не пробита
10	100	5	830	не пробита
11	100	4	940	10×7, овал
12	122	3	910	15×10, овал
13	150	3	980	10×10, круг
14	19	3×3	1110	пробиты все три пластины первая – 60×50, вторая – 40×30, третья - 25×20

На рис. 3 представлена схема эксперимента № 14 по пробиванию пакета из трех пластин. Три пластины толщиной 3 мм разделялись между собой кольцевыми упорами толщиной 42 мм. Весь пакет пластин фиксировался болтами.

На рис. 4 приведена фотография отверстия в пластине толщиной 3 мм, расположенной на расстоянии 122 см от ГП (эксперимент № 12). В пластине пробито отверстие овальной формы размером 15×10 мм. На фотографии хорошо видно, как вытягивается металл при деформации во время удара струей жидкости. По контуру виден след от

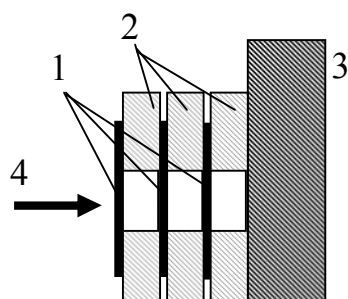


Рисунок 3 - Пакет пластин
1 – пластины, 2 – кольцевые опоры, 3 – массивная плита, 4 – импульсная струя



Рисунок 4 - Отверстие в пластине толщиной 3 мм (эксперимент № 12)

кольцевой опоры, на которую опиралась пластина.

На рис. 5 показана фотография первой пластины из пакета пластин в эксперименте № 14. В пластине пробито почти круглое отверстие размером 60×50 мм. Размер отверстия значительно превышает диаметр струи, который равен диаметру коллиматора – 15 мм. Как видно, края отверстия имеют рваный характер, что указывает на интенсивные кратковременные нагрузки при ударе.



Рисунок 5 - Отверстие в первой пластине толщиной 3 мм

В табл. 2 приведены данные твердости стальных пластин, которые использовались в экспериментах.

Таблица 2 - Результаты экспериментальных исследований

№	Толщина пластины, мм	Диаметр отпечатка, мм	Твердость, НВ
1	образец	2,95	Rockwel hardness, HRC HB - 432
2	8	4,2	HB - 207
3	6	4,8	156
4	5	4,6-4,7	170 - 163
5	4	5	143
6	3	5	143

Из этих экспериментов следует, что эффективность пороховой гидропушки уменьшается при увеличении расстояния до мишени. Например, в пластине толщиной 8 мм на расстоянии 5.5 см было пробито отверстие размером 15×30 мм. Но на расстоянии 40 см в такой пластине отверстие уже не было пробито, а только сделана вмятина глубиной около 15 мм.

Все исследуемые пластины при ударе импульсной струей жидкости деформировались, вытягиваясь в центре удара струи. И если энергии струи было достаточно, то в зоне удара образовывалось рваное отверстие овальной формы. Если энергии струи было недостаточно, то пластина деформировалась и в ней образовывалась вмятина, как показано на рис. 6 (эксперимент № 10 для пластины толщиной 5 мм на расстоянии



Рисунок 6 - Деформация пластины толщиной 5 мм (эксперимент № 10)

100 см). Характер деформаций пластин оставался одинаковым на разных расстояниях до мишени, вплоть до максимального в 150 см.

Измерение скорости головы струи показало, что до расстояния 80 см от ГП скорость струи уменьшается незначительно. На расстояниях, превышающих 1 м уменьшение скорости струи уже заметное и составляет около 20 %. Однако, эффективность струи ГП, которая определяется по размерам пробитого отверстия и толщине пластины, уменьшается гораздо быстрее, чем скорость струи.

Как известно [1, 18], вокруг струи образуется водяная пелена, в которую постоянно переходит вода из струи. Толщина пелены весьма незначительна, так как ее внешний диаметр в несколько раз превышает диаметр самой струи, и она легко разрушается на отдельные капли, которые уносятся потоком воздуха (в относительном движении). Принято говорить, что струя «обдирается» воздухом. Размер пелены по оси струи (ее длина) при движении струи меняется незначительно. На рис. 7 приведена фотография струи пороховой ГП, выполненная при помощи скоростной видеосъемки. На фотографии хорошо виден ореол брызг вокруг струи, размер которого значительно превышает диаметр самой струи.

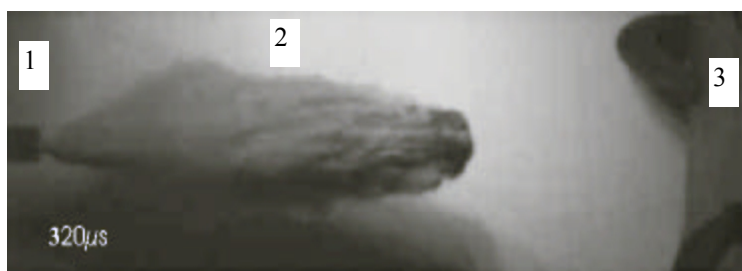


Рисунок 7 - Скоростная фотография струи гидропушки

За счет перетекания воды в пелену длина струи будет постепенно уменьшаться; при этом будет уменьшаться, и скорость движения струи из-за трения струи о воздух и давления перед струей за счет ударной волны. В конце концов, вся вода струи перейдет в пелену, и струя прекратит свое существование.

Как видим, важнейшим процессом при полете струи, который влияет на эффективность струи, является процесс ее обдирки, определяемый перетеканием воды в пелену струи. При интенсификации этого процесса длина струи уменьшается быстрее, и дальность ее действия уменьшается. Если же этот процесс затормозить, то дальность действия струи увеличится.

Выводы и направления дальнейших исследований. Экспериментально исследовано пробивание стальных пластин импульсной

струей жидкости в зависимости от расстояния до преграды. Размеры пробитого в пластине отверстия связываются с эффективностью ГП. Установлено, что с увеличением расстояния до преграды:

- а) скорость головы струи ГП уменьшается незначительно;
- б) эффективность струи ГП уменьшается значительно.

Уменьшение эффективности ГП в зависимости от расстояния до преграды объясняется размыванием импульсной струи жидкости при ее распространении в воздухе.

Список литературы

1. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород / Г.А. Атанов. – К.: Вища школа, 1987. – 155 с.
2. Atanov G.A. The impulsive water jet device: a new machine for breaking rock / G.A. Atanov // International Journal of Water Jet Technology. – 1991. – Vol.1, № 2. – P. 85–91.
3. Hood M. The use of waterjets for rock excavation / M. Hood // Proc. 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, WJTJSJ. – Tokyo (Japan). – 1998. – P. 1–8.
4. Kiyono F. Influence of amplitude and frequency of oscillating jets on the cutting efficiency / F. Kiyono, T. Saito // Proc. 4th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, WJTJSJ. – Tokyo (Japan). – 1995. – P. 157–162.
5. Vijay M.M. Removal of coatings with low pressure pulsed water jets / M.M. Vijay, E. Deds, N. Paquette, R. Puchala, M. Bielawski // Proc. 9th American Water Jet Conference, WJTA (Water Jet Technology Association). – St. Louis (USA). – 1997. – P. 563–580.
6. Бреннер В.А. Гидромеханическое разрушение горных пород / В.А. Бреннер, А.Б. Жабин, А.Е. Пушкарев, М.М. Щеголевский. – М.: Изд-во АГН, 2000. – 343 с.
7. Качурин Н.М. Расчет и проектирование гидромеханических исполнительных органов проходческих комбайнов / Н.М. Качурин, В.А. Бреннер, А.Б. Жабин и др. – М.: Изд-во МГГУ, 2003. – 293 с.
8. Мерзляков В.Г. Физико-технические основы гидроструйных технологий в горном производстве / В.Г. Мерзляков. – М.: ННЦГП-ИГД им. А.А. Скочинского, 2004. – 645 с.
9. Жабин А.Б. Разрушение горных пород импульсными высокоскоростными струями воды / А.Б. Жабин, К.А. Головин, А.В. Поляков // Горное оборудование и электромеханика. – 2006. - № 4. – С. 43 – 46.
10. Cooley W.C. Advances in the technology of fluid jets: past, present and targets for the 21st century / W.C. Cooley // Proc. of the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, WJTJSJ. – Tokyo (Japan). – 1998. – P. 1–8.
11. Atanov G. The Pressure Rise Factor For Powder Hydro-cannon / G. Atanov, V. Gubsky, A. Semko // Proc. of the 13th International Conference on Jetting Technology. - Sardinia, Italy. - October 29-31, 1996. – P. 91-103.
12. Atanov G.A. Peculiarities of the powder water cannon operation / G.A. Atanov, A.N. Semko, O.P. Petrenko, E.S. Geskin, V. Samardzic, B. Goldenberg // Proc. of the ASME Int. Mechanical Engineering Congress & Exp. - Washington (USA). - 2003. – IMECE2003-42788.
13. Atanov G.A. The powder water cannon / G.A. Atanov, A.N. Semko // Proc. of the Int. Summer Science School on High-Speed Hydrodynamics (HSH 2002). - Cheboksary (Russia), Washington (USA). – 2002. - P. 419–424.
14. Атанов Г.А. О влиянии разных факторов на параметры гидропушки / Г.А. Атанов, Э.С. Гескин, О.П. Петренко, А.Н. Семко // Прикладные задачи математики и механики: Материалы XII науч. конф. ученых Украины, России, Беларуси, г. Севастополь, 15 – 21 сентября, 2003 г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – С. 134 – 137.

15. Petrenko O. Numerical Modeling of High-Speed Water Slugs / O. Petrenko, E.S. Geskin, G.A. Atanov, A. Semko, B. Goldenberg. // Transaction of the ASME. Journal of Fluids Engineering. Vol. 126. No 2. Marth 2004. – P. 206 – 209.
16. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / А.Н. Семко. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с.
17. Решетняк В.В. Применение метода Родионова для расчета квазиодномерных движений идеальной сжимаемой жидкости / В.В Решетняк, А.Н. Семко // Прикладная гидромеханика. - 2009. - Т. 9 (81). - № 3. - С. 56 - 64.
18. Украинский Ю. Д. Фотографическое исследование струи гидропушки / Ю. Д. Украинский // Изв. ВУЗов СССР, Энергетика. - 1978. - № 4. - С. 143 - 146.

Г.О. Атанов, Е.С. Гескін, А.В. Ковальов, О.О. Русанова, В. Самарджич, О.М. Семко. *Оцінка ефективності гідрогармати за пробиванням сталевих пластівок. У статті описуються експериментальні дослідження по пробиванню сталевих пластівок різноманітної товщини імпульсним струменем рідини високої швидкості. Для отримання імпульсних струменів використана гідрогармата з пороховим приводом. В експериментах вимірювалась швидкість голови струменя перед ударом о пластину. Вимірювання здійснені за допомогою спеціально розробленого безконтактного лазерного вимірника швидкості. У окремих випадках швидкість голови струменя досягала 1300 м/с. За результатами пробивання отворів можна судити про ефективність імпульсного струменя порохової гідрогармати в залежності від відстані до перешкоди.*

пробивання сталевих пластівок, імпульсний струмень, порохова гідрогармата

G.A. Atanov, E.S. Geskin, A.V. Kovalyov, O.A. Rusanova, V. Samargich, A.N. Semko. *Evaluation of Hydrocannon Based on the Piercing of Steel Plates. Experimental investigation of piercing of steel plates is presented. The plates had different thickness and were punched by pulse high speed water jets. The powder hydrocannon was used for obtaining pulse jets. Speed of the jets head before impact was measured. The measurements were carried out using a laser measuring device. Speed of jets head reached 1300 m/s in some tests. It is possible to make conclusions about the efficiency of a pulse jet from hydrocannon depending on stand-off distance according to these results.*

piercing of steel plates, pulse jet, powder hydrocannon

Стаття надійшла до редколегії 29.10.2010

*Рецензент: проф. каф. фізики нерівноважних процесів,
метрології та екології ДонНУ, д-р техн. наук Ф.В.Недопекін*

© Атанов Г.О., Гескін Е.С., Ковальов А.В.,
Русанова О.О., Самарджич В., Семко О.М., 2010