

УДК 532.522: 518.5

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА ПАРАМЕТРЫ ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ

Г. А. АТАНОВ*, Э. С. ГЕСКИН**, О. П. ПЕТРЕНКО**, А. Н. СЕМКО***

* Донецкий открытый университет,

** Нью-Джерси Технологический Институт,

*** Донецкий национальный университет

Получено 20.02.2007

В статье рассматриваются некоторые вопросы проектирования пороховой гидропушки как эффективного устройства для разрушения твердых горных пород и бетонных блоков. Сформулированы преимущества пороховой гидропушки, введено понятие оптимального выстрела. Предложен путь уменьшения давления внутри установки при увеличении скорости струи. Приведены результаты численных расчетов, иллюстрирующие предложенное направление оптимизации пороховой гидропушки.

У статті розглядаються деякі питання проектування гідрогармати як ефективного пристрою для руйнування твердих гірних порід і бетонних блоків. Сформульовані переваги порохової гідрогармати, введено поняття оптимального пострілу. Запропонований шлях зменшення тиску усередині установки при збільшенні швидкості струменя. Наведені результати чисельних розрахунків, які ілюструють запропонований напрям оптимізації порохової гідрогармати.

The design aspects of hydrocannon as an effective device for destruction of solid rock and concrete blocks are considered. The advantages of powder hydrocannon are shown. The concept of optimal shot is discussed. There was found a way for decrease of pressure inside the device together with jet velocity rise. The results of numerical calculations for powder hydrocannon optimization were shown.

ВВЕДЕНИЕ

Гидропушка (ГП) как устройство для получения импульсных струй жидкости исследовалась теоретически и экспериментально в работах [1–3]. Она реализует инерционный принцип разгона, при котором ускорение воды происходит в процессе ее втекания в длинное сужающееся сопло. Наиболее распространенной и исследованной оказалась ГП с пневматическим приводом. Источником энергии в ней является сжатый газ. Под его действием на значительном пути в цилиндрическом стволе разгоняется поршень вместе с зарядом воды, 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 ГП – возможность получения струй, динамический напор которых намного превышает статическое давление в стволе установки. Отношение указанных давлений получило название коэффициента превышения давления (k_p), и для ГП $k_p > 1$. Серия специальных расчетов, проведенная с целью определения наибольшего возможного значения k_p , дала $k_{pmax} = 3.6$ [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.

Одной из характерных особенностей выстрела ГП является резкое уменьшение скорости истечения струи сразу же после начала истечения [1, 3–7]. Причиной этого оказывается 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 дальнобойность, для ГП крайне низкое. В экспериментах обнаружено, что оно составляет величину около 15 см для экспоненциального сопла с выходным диаметром 10 мм [6].

Для увеличения дальнобойности 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 заряд воды), движущуюся 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 будут ее дальность и разрушающая способность.

Во многих случаях альтернативой пневматической ГП может быть пороховая, источником энергии в которой являются продукты сгорания пороха [5, 9, 10, 11]. Она 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.

Так как ускорение воды в ГП происходит по мере ее втекания в сопло, то форма сопла существенно влияет на такие важные параметры ГП, как максимальное давление внутри установки и максимальная скорость струи. Поэтому определение профиля сопла, который позволяет получить импульсную струю воды с заданной скоростью при минимальном давлении внутри установки, является важной задачей проектирования гидропушек. Эта задача принципиально может быть решена двумя путями: *a* – как вариационная задача, *b* – как задача параметрической оптимизации. В первом случае составляется функционал, задаются соответствующие ограничения и находится профиль сопла, доставляющий экстремум функционалу [12]. Во втором случае задаются определяющие критерии (например, максимальная скорость струи, длина высокоскоростного водяного заряда, максимальное давление внутри установки, общая форма сопла) и путем перебора вариантов для заданной общей формы сопла (например, сопло должно состоять из двух конических участков) находят его узловые точки. В настоящей работе используются оба подхода для определения оптимального сопла пороховой ГП.

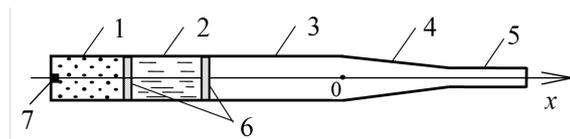


Рис. 1. Схема пороховой гидропушки:
1 – камера сгорания, 2 – вода, 3 – ствол,
4 – сопло, 5 – коллиматор, 6 – пыжи, 7 – капсюль

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА

Пороховая ГП состоит из камеры сгорания 1, цилиндрического ствола 3, в котором находится водяной заряд 2, ограниченный пыжами 6, сужающегося сопла 4, которое для стабилизации скорости истечения заканчивается коллиматором 5 (рис. 1). Процессы в пороховой ГП начинаются с момента воспламенения пороха капсюлем 7. 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 ГП 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 это время 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.

Для построения математической модели ГП обычно принимают следующие допущения [1, 3, 4]. Вода считается идеальной и сжимаемой, теплообмен отсутствует, течение рассматривается в квазиодномерной постановке, влияние пыжей и воздуха в сопле не учитывается, контактная поверхность “пороховые газы – вода” принимается плоской. Начальным является момент воспламенения пороха после срабатывания воспламенителя. При принятых допущениях течение воды в ГП описывается следующей системой уравнений нестационарной газовой динамики:

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

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 форме Тэта.

Начальные условия следующие:

$$\begin{aligned} u(0, x) = 0, p(0, x) = 0, \rho(0, x) = \rho_0; \\ x_{g0} \leq x \leq x_{f0}, \end{aligned} \quad (2)$$

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

Граничные условия ставятся на свободной и контактной поверхностях:

$$\begin{aligned} p(t, x_f) = 0; \\ p(t, x_g) = p_g, u(t, x_g) = u_g, \end{aligned} \quad (3)$$

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.

Горение пороха рассматривается в квазистационарном приближении, общепринятом для внутренней баллистики артиллерийских орудий [13]: порох воспламеняется мгновенно и горит параллельными слоями по геометрическому закону; химический состав продуктов сгорания не меняется и 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:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= \frac{u_1 p_g}{h_1}, \\ Q_g &= \frac{dm_g}{dt} = m_{p0} \chi_1 \sigma(z) \frac{dz}{dt}, \\ \frac{1}{k-1} \frac{d(p_g V_g)}{dt} + p_g F u_g &= q Q_g, \\ \frac{dV_g}{dt} &= Q_g (1/\rho_p - \alpha) + u_g F, u_g = \frac{dx_g}{dt}, \\ z = 0, V_g &= V_{g0}, m_g = m_{g0}, \\ p_g &= p_{g0}, x_g = -x_{g0}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь h_1 – половина толщины порохового зерна; z – безразмерная 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 (например, для зерна трубчатой формы $\chi_1 = 1 + h_1/c$, $\sigma(z) = 1 - 2h_1 z / (c + h_1)$, c – половина длины зерна); α – коволюм, учитывающий собственный объем 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 – объем продуктов сгорания; V_{g0} , m_{g0} и p_{g0} – начальные параметры (после срабатывания воспламенителя).

Поставленная задача решалась численно: уравнения движения жидкости – методом Годунова [14], обобщенным для расчета течений жидкости в работах [1, 3–5, 10, 11, 15], а уравнения горения пороха – улучшенным методом Эйлера второго порядка. Процесс выстрела рассчитывался до истечения всей воды.

Расчетная сетка была подвижная. С одной стороны она опиралась на контактную поверхность, а с другой – на свободную поверхность и двигалась вместе с ними. Шаг сетки был однороден, но изменялся со временем. При этом задавался минимальный и максимальный шаги. 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, сетка модифицировалась, число ее ячеек или увеличивалось, или уменьшалось в два раза. В расчетах использовались сетки с начальным числом ячеек 256 и 512.

2. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ, ДОСТОВЕРНОСТЬ РАСЧЕТОВ

Для оценки адекватности математической модели и проверки достоверности расчетов проведены экспериментальные исследования пороховой ГП со следующими данными: 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, объем камеры сгорания 41.7 см³. Использовался охотничий порох марки “Крук” с массой заряда 30 г.

В экспериментах измерялась скорость головы струи бесконтактным методом. Его суть заключалась в том, что струя последовательно пересекала два лазерных луча, и с помощью таймера фикси-

Табл 1.

№	1	2	3	4	5
v_1 , м/с	1111	1020	1163	1064	1020
v_2 , м/с	1148	1107	1240	1107	1000

ровалось время между прерываниями этих лучей. Использовались две системы измерений с расстояниями между лучами 31 и 50 мм. Измерения скорости проводились на расстоянии 10 – 15 см от среза сопла, и их данные приведены в таблице 1, где скорость v_1 соответствует первой, а скорость v_2 – второй системе.

Среднее значение измеренной скорости равно 1092 ± 65 м/с. Рассчитанное значение скорости истечения составило 1070 м/с, что отличается от экспериментального на 2%.

На рис. 2 приведены результаты расчетов описанной выше конструкции ГП. Здесь: 1 – скорость втекания (inlet) и истечения (outlet), 2 – давление пороховых газов в камере сгорания ($x = -450$ мм), 3 – давление по середине сопла ГП ($x = -200$ мм), 4 – давление в начале сопла ($x = 20$ мм, длина всего сопла 70 мм), 5 – давление в начале коллиматора ($x = 75$ мм, длина всего коллиматора 60 мм).

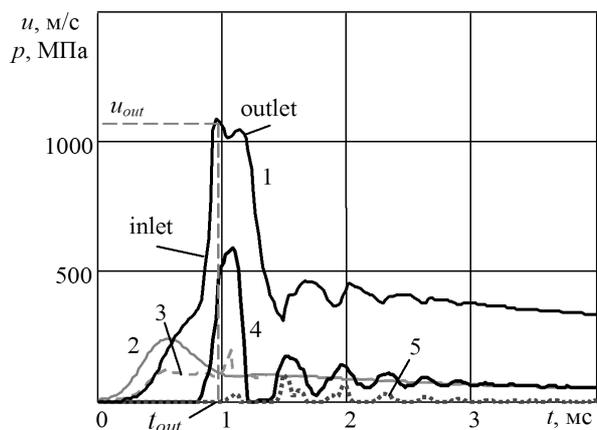


Рис. 2. Зависимость параметров от времени: 1 – скорость втекания и истечения, 2 – давление пороховых газов в камере сгорания, 3–5 – давление в начале и по середине сопла, в коллиматоре

При $t < t_{out}$ происходит втекание воды в сопло, а при $t > t_{out}$ начинается истечение струи. На графике скорости время истечения отмечено $t_{out} = 0.98$ мс, а соответствующая ему скорость $u_{out} = 1070$ м/с. Эта скорость принята за расчетную скорость истечения струи ГП, которая сравнивалась с экспериментальной скоростью, приведенной в табл. 1. Как видно, различие результатов состав-

ляет $(u_m - u_{out})/u_{out} = 2\%$.

Хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений свидетельствует об адекватности математической модели и достоверности результатов расчетов.

3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОПЛА ГП

Рассмотрим задачу оптимизации профиля сопла ГП, которая заключается в определении профиля сопла, состоящего из двух конических частей, который обеспечивает максимальную скорость струи не менее 1500 м/с. При этом длина сопла вместе с коллиматором, его радиус и радиус ствола остаются постоянными, а давление в сопле должно быть как можно меньше и не превышать предела прочности материала, из которого изготовлен ствол установки. Для сравнения в качестве прототипа возьмем сопло из одного конуса. Форма сопла выбрана конической потому, что изготовление конических сопел намного проще и дешевле, чем любой другой формы, например, экспоненциальных, так как осуществляется с помощью стандартных разверток. Расчеты проводились для ГП со следующими параметрами: масса водяного заряда 500 г, масса пороха 100 г, радиус ствола 20 мм, радиус сопла 10 мм, длина сопла вместе с коллиматором 500 мм, длина разгона водяного заряда 300 мм, объем камеры сгорания 130 см^3 .

В результате многочисленных расчетов были испробованы различные конические сопла и отображены два сопла. Результаты расчетов для этих сопел приведены в табл. 2, а их форма показана на рис. 3.

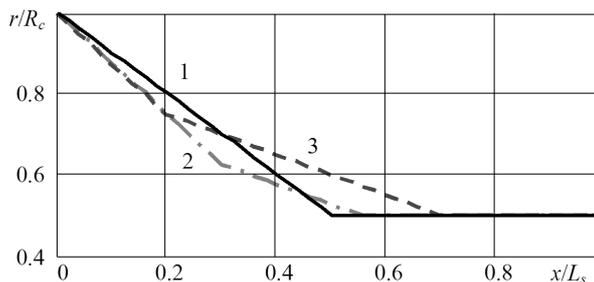


Рис. 3. Форма сопел. Нумерация сопел из табл. 1

Из расчетов видно, что для сопел из двух конических частей максимальное давление в сопле на 25 и 33 % меньше, чем для простого конического сопла.

Табл 2.

№	L_{s1} , мм	R_{s1} , мм	L_{s2} , мм	R_{s2} , мм	L_k , мм	p_{max} , МПа	u_{max} , м/с	Примечание
1	250	10	–	–	250	1134	1555	1 конус
2	150	12.5	125	10	225	850	1538	2 конуса
3	100	15	250	10	150	760	1580	2 конуса

Примечание: L_{sk} – длина сопла вместе с коллиматором; R_c – радиус входа в сопло; L_{s1} – длина первого конуса; L_{s2} – длина второго конуса; R_{s1} – выходной радиус первого конуса; R_{s2} – выходной радиус второго конуса; L_k – длина коллиматора; p_{max} – максимальное давление в сопле; u_{max} – максимальная скорость струи

На рис. 4, а приведена зависимость давления в нескольких сечениях и скорости истечения от времени, а на рис. 4, б – распределение давления и скорости жидкости по длине ГП на начало истечения для сопла №1. Давление приведено в точках: 1 – камера сгорания (давление пороховых газов); 2 – вход в сопло; 3 – 1/4 от входа в сопло; 4 – 1/2 от входа в сопло; 5 – 3/4 от входа в сопло; 6 – конец сопла. Максимальное давление достигается по середине сопла после начала истечения струи.

На рис. 5 приведены такие же зависимости для сопла №3. По распределению давления видно, что максимум давления для составного сопла смещается вглубь сопла, там, где меньше радиус, и поэтому легче удовлетворить условиям прочности. Для сопла №3 максимальное давление – на расстоянии 3/4 от входа в сопло. Давление в сопле на начало истечения меньше, чем максимальное, которое достигается при истечении. Но характер распределения давления по длине установки сохраняется. Поэтому нет необходимости приводить несколько распределений давления.

Из анализа результатов следует, что при одинаковой максимальной скорости струи давление в сопле №3 на треть меньше, чем в сопле №1.

4. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОПЛА ГП

Рассмотрим оптимизацию ГП по импульсу струи. Критерием оптимизации выберем импульс эффективной части струи [5], который определяется интегрированием по времени от начала истечения t_{out} до момента t_e , когда скорость струи уменьшится до 0.85 от максимальной за время выстрела:

$$I = F_s \int_{t_{out}}^{t_e} \rho_0 u_s^2 dt, \quad (6)$$

где F_s – площадь выходного сечения сопла; u_s – скорость истечения.

Оптимизируется сопло, состоящее из двух конусов. При оптимизации варьируются длина L_{s1} и радиус R_{s1} первого конуса. Общая длина сопла L_s , входной R_c и выходной R_s радиусы остаются постоянными. Кроме того, из соображений допустимости квазиодномерного приближения накладывалось ограничение на углы наклона образующих конических поверхностей: $0.05 \leq \varphi \leq \pi/4$. Для решения задачи использовался алгоритм поиска локального безусловного минимума нелинейной функции симплекс-методом. Этот алгоритм входит в оптимизационный пакет Matlab и реализован в Matlab Math library. Программа расчета выстрела ГП вычисляла критериальную функцию и передавала ее значение функции *fminsearch*, которая реализует безусловный поиск экстремума.

Для расчетов взята экспериментальная ГП, описанная в [9, 11], со следующими параметрами: масса водяного заряда 230 г, масса пороха марки “Крук” 30 г, радиус ствола $R_c = 16$ мм, радиус сопла $R_s = 7.5$ мм, длина сопла $L_s = 70$ мм, длина коллиматора $L_k = 60$ мм, длина разгона водяного заряда 110 мм, объем камеры сгорания 41.7 см³.

Математически задача сводится к нахождению координат $x = L_{s1}$ и $r = R_{s1}$, доставляющих максимум функционалу (6) со следующими ограничениями:

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq L_s, R_s \leq r \leq R_c, \\ \frac{R_c - r}{x} \leq 1, \frac{R_c - r}{x} \geq 0.05, \\ \frac{r - R_s}{L_s - x} \geq 0.05, \frac{r - R_s}{L_s - x} \leq 1. \end{aligned} \quad (7)$$

За начальное приближение выбирался профиль сопла из одного конуса. На нем задавалась точка сопряжения конусов с координатой x и по программе оптимизации находилась координата r , при которой импульс (6) был максимальным с учетом ограничений (7).

На рис. 6 приведен график максимальных значений функционала $I(x, r)$, из которого следует, что сопло из двух конусов позволяет получить больший импульс струи, чем из одного конуса.

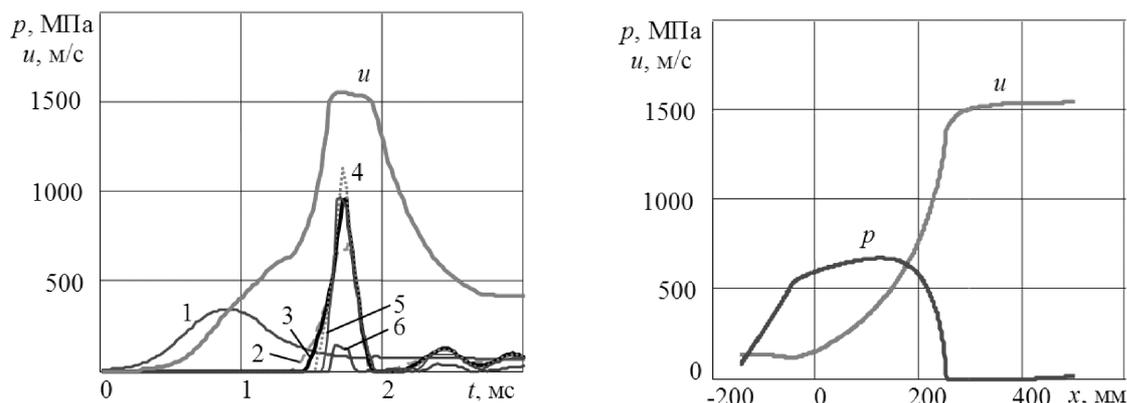


Рис. 4. Зависимость от времени и распределение параметров для сопла № 1.
 Давление в точках: 1 – камера сгорания, 2 – вход в сопло, 3 – 1/4 от входа в сопло, 4 – 1/2 от входа в сопло, 5 – 3/4 от входа в сопло, 6 – конец сопла, u – скорость, p – давление

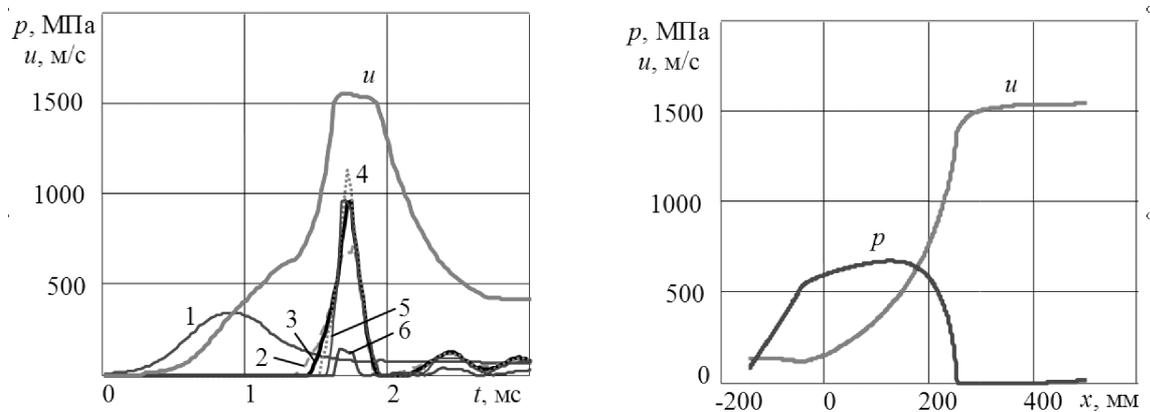


Рис. 5. Зависимость от времени и распределение параметров для сопла № 3.
 Давление в точках: 1 – камера сгорания, 2 – вход в сопло, 3 – 1/4 от входа в сопло, 4 – 1/2 от входа в сопло, 5 – 3/4 от входа в сопло, 6 – конец сопла, u – скорость, p – давление

Оптимальный профиль сопла получается выпуклым вверх, т. е. первый конус имеет меньший угол, а второй – больший, чем простое сопло из одного конуса. Максимальная скорость струи для оптимального сопла возрастает незначительно на 2 – 3 %, а импульс более существенно – до 20 %. Заметное увеличение импульса для составного сопла из двух конусов объясняется тем, что большая часть струи имеет высокую скорость. Однако, как показывают расчеты, такая форма сопла приводит к повышению давления жидкости в сопле, что может негативно сказаться на прочностных параметрах установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмечены особенности выстрела ГП и преимущества пороховой ГП по сравнению с традиционной пневматической. Построена математическая модель пороховой ГП и разработаны методы расчета ее гидродинамических параметров. Результаты расчетов сравниваются с экспериментами по измерению скорости головы струи бесконтактным лазерным измерителем скорости. Показано, что варьируя форму сопла, можно существенно увеличить максимальную скорость струи и уменьшить давление внутри установки. Оптимизация формы сопла производилась параметрически перебором размеров для сопел заданной формы и функцио-

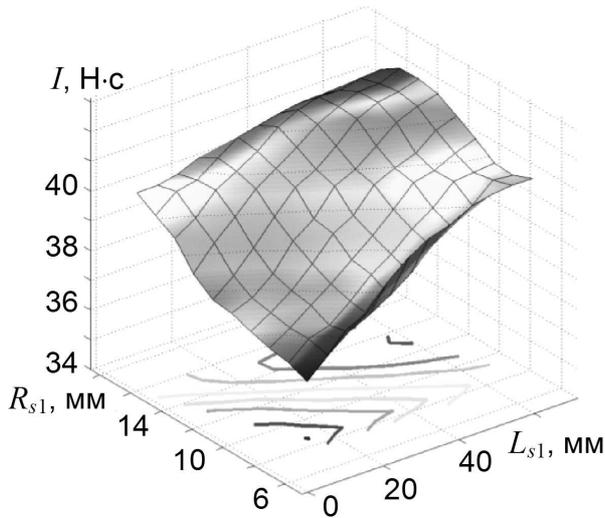


Рис. 6. Пространственный график функционала

нально по максимальному импульсу струи при заданных ограничениях на размеры сопла. При параметрической оптимизации подбором формы сопла удалось уменьшить давление в установке на 30 %, а при функциональной оптимизации – увеличить импульс сопла на 20 %.

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

3. Атанов Г. А., Семко А. Н., Украинский Ю. Д. Исследование внутренней баллистики гидропушки // Известия АН СССР, МЖГ. – 1983. – N 4. – С. 167–170.
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 // Proc. 13th Int. Conf. on Jetting Tech. – Sardinia, Italy, 1996. – P. 91–103.
6. Cooley W. C., Lucke W. N. Development and Testing of a Water Cannon for Tunneling // Proc. 2th Int. Conf. on Cutting Tech. – Cambridge, England, 1974. – P. 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 // Proc. of Int. Summer Scient. School "High Speed Hydrodynamics" (HSH 2002). – Washington, USA, 2002. – P. 377–381.
9. Atanov G. A., Semko A. N., Petrenko O. P., Geskin E. S. Peculiarities of the powder hydrocannon operation // Proc. of 2003 ASME Int. Mech. Eng. Congress & Exposition. – Washington, USA, 2003. – P. 16–21.
10. Атанов Г. А., Губский А. Н., Семко А. Н. Внутренняя баллистика пороховой гидропушки // Известия РАН, МЖГ. – 1997. – N 6. – С. 191–194.
11. Atanov G. A., Semko A. N. The powder hydro-cannon // Proc. of Int. Summer Scient. School "High Speed Hydrodynamics" (HSH 2002). – Washington, USA, 2003. – P. 419–424.
12. Atanov G. A. The optimal control problem of profiling the hydro-cannon nozzle to obtain the maximum outlet speed // Proc. Institute Mech. engrs. – V 211, P. C., 1997. – P. 541–547.
13. Орлов Б. В. Проектирование ракетных и ствольных систем. – М.: Машиностроение, 1974. – 828 с.
14. Годунов С. К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
15. Атанов Г. А. Расчет выстрела гидропушки методом "распада разрыва" // Гидромеханика – Киев: Наукова думка. – 1974. – Вып. 30. – С. 51–54.