

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА ПАРАМЕТРЫ ГИДРОПУШКИ

В. В. РЕШЕТНЯК, А. Н. СЕМКО

Донецкий Национальный университет

Получено 06.10.2009

В статье оценивается влияние формы сопла на параметры гидропушки. Сформулированы критерии, по которым оценивается эффективность гидропушки: максимальная скорость струи, максимальное давление внутри установки, коэффициенты превышения давления, преобразования энергии и компактности высокоскоростного участка струи. Расчеты выполнены методом второго порядка аппроксимации Родионова, обобщенным для расчета квазидвумерных движений идеальной сжимаемой жидкости. Приведены результаты расчетов для наиболее распространенных сопел (Витошинского, Войцеховского, коноидального, катеноидального и конического), подтверждающие рациональность предложенного подхода. Показано, что профиль сопла существенно влияет на гидродинамические параметры импульсной струи жидкости. Предложены пути для определения оптимального сопла гидропушки.

У статті оцінюється вплив форми сопла на параметри гідрогармати. Сформульовано критерії, по яких оцінюється ефективність гідрогармати: максимальна швидкість струменя, максимальний тиск усередині установки, коефіцієнти перевищення тиску, перетворення енергії та компактності високошвидкісної ділянки струменя. Розрахунки виконані методом другого порядку апроксимації Родіонова, узагальненим для розрахунку квазидвумірних рухів ідеальної стисливої рідини. Наведено результати розрахунків для найпоширеніших сопел (Вітошинського, Войцеховського, коноїдального, катеноїдального та конічного), що підтверджують раціональність запропонованого підходу. Показано, що профіль сопла істотно впливає на гідродинамічні параметри імпульсного струменя рідини. Запропоновано шляхи для визначення оптимального сопла гідропушки.

Influence of the form of a nozzle on hydrocannon parameters is estimated in the article. Following criteria of an estimation of efficiency of a hydrocannon are formulated: the maximum speed of a stream, the maximum pressure in installation, factors of excess of pressure, transformation of energy and compactness of a high-speed site of a stream. Calculations are executed by a method of the second order of approximation of Rodionov, generalized for calculation quasionedimensional movements of an ideal compressed liquid. Results of calculations for the most widespread nozzles are resulted, confirming rationality of the offered approach. It is shown, that the nozzle profile essentially influences on hydrodynamic parameters of a pulse stream of a liquid. Ways for definition of an optimum nozzle of a hydrocannon were offered.

ВВЕДЕНИЕ

Гидроимпульсные технологии, основанные на применении струй жидкости высокого и сверхвысокого давления, широко применяются в промышленности для разрушения горных пород и бетонных блоков, обработки материалов, утилизации боеприпасов [1, 2]. Для получения таких струй обычно используются гидропушка (ГП) и импульсный водомет (ИВ). Работа этих установок основана на разных физических принципах, поэтому импульсные струи этих установок имеют различные параметры, которые отражаются на эффективности их применения.

Основными гидродинамическими параметрами ИВ и ГП являются: максимальная скорость струи u_{\max} , максимальное давление внутри установки p_{\max} , энергия выстрела E_0 и коэффициент превышения давления k_p , введенный Г. А. Атановым [1, 3]. Этот коэффициент показывает во сколько раз максимальное гидродинамическое давление струи $p_c = \rho u_{\max}^2 / 2$ превышает максимальное давление p_{\max} внутри установки: $k_p = \rho u_{\max}^2 / 2p_{\max}$, где ρ – плотность воды.

Многочисленные экспериментальные исследова-

ния ИВ и ГП, проведенные Б.В. Войцеховским [4], W. C. Cooley [5], Г. П. Черменским [6], А. И. Петраковым и О. Д. Криворотько [7, 8] по разрушению угля, горных пород, негабаритов, бетона и железобетона, показали перспективность импульсных струй сверхвысокого давления. По результатам исследований сделаны выводы, что для эффективного разрушения динамическое давление струи должно в 10 раз превышать предел прочности материала на сжатие $\sigma_{\text{пр}}$. Было установлено, что форма сопла слабо влияет на гидродинамические параметры ИВ, но оказывает существенное влияние на параметры ГП. Г. П. Черменский исследовал экспериментально эффективность разрушения угля и пород разной крепости с помощью ИВ с соплами разной формы (конической, катеноидальной и экспоненциальной) по объему разрушенного материала за один выстрел [6].

Президент Международной ассоциации водоструйных технологий (WJTA) М. М. Vijay (Канада) отмечает перспективность гидроимпульсных технологий в будущем. Устройства для этих технологий компактны, мобильны, безопасны, требуют меньше энергии, чем непрерывные струи. По его мнению, дальнейшие работы в этом направлении

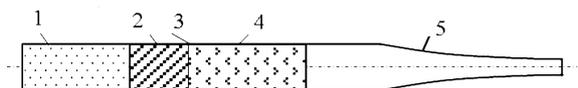


Рис. 1. Гидропушка:

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

должны быть направлены на повышение надежности гидроимпульсных установок, оптимизацию сопла и других систем, понимание механизма разрушения материала [9].

Процессы, имеющие место в ГП и ИВ, характеризуются нестационарностью, большими градиентами параметров и хорошо описываются в рамках модели газовой динамики [1, 2]. Как правило, такие задачи не имеют аналитического решения и решаются численно. При выборе численного метода предпочтение отдается монотонным однородным консервативным схемам высокого порядка аппроксимации.

В настоящей работе предложены дополнительные критерии, характеризующие эффективность ГП: коэффициент преобразования энергии, характеризующий энергию высокоскоростного участка струи, и коэффициент компактности струи, характеризующий изменение скорости по длине высокоскоростного участка струи. По перечисленным критериям оценено влияние формы сопла на эффективность поршневой ГП. Расчеты выполнены методом второго порядка аппроксимации Родинова [10], обобщенным для расчета квазиодномерных движений идеальной сжимаемой жидкости в гидроимпульсных установках [11].

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГП. ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГП

Схема ГП безударного действия, в которой реализуется инерционный принцип разгона жидкости при втекании в сужающееся сопло, приведена на рис. 1. Под действием давления сжатого газа 1 тяжелый поршень 2 разгоняется вместе с водой 3 в цилиндрическом стволе 4. Вода, достигая входа в сопло 5, начинает втекать в него, ускоряясь. Ускорение воды происходит за счет перераспределения энергии между частицами нестационарно движущейся жидкости. При этом кинетическая энергия частиц воды, прилегающих к свободной поверхности, значительно превышает среднюю по объему энергию. Достигнув среза сопла, вода истекает из него импульсной высокоскоростной струей.

Процесс движения воды в ГП можно разбить на

две стадии: втекание в сопло и истечение из сопла. При втекании воды передние частицы ускоряются за счет перераспределения энергии между частицами по всему объему движущейся жидкости. Распределение давления по длине водяного заряда имеет максимум около переднего фронта. Поэтому частицы жидкости вблизи свободной поверхности, где градиент давления отрицательный, ускоряются, а частицы жидкости вблизи заднего фронта, где градиент давления положительный, наоборот, замедляются. Таким образом, происходит передача энергии от задних частиц к передним.

При истечении скорость воды на срезе сопла и давление внутри установки, как правило, уменьшаются. Поэтому истечение струи поршневой ГП начинается обычно с максимальной скорости, равной скорости переднего фронта воды на начало истечения. Максимальные давления внутри установки возникают в это же время или немного позже.

В качестве первых двух критериев для оценки эффективности ГП и ИВ использовались максимальная скорость струи u_{\max} и максимальное давление p_{\max} внутри установки. Первый критерий характеризует эффективность воздействия струи на объект. Если динамическое давление струи $p_c = \rho u_{\max}^2 / 2$ меньше предела прочности образца на сжатие $\sigma_{\text{пр}}$, то образец не разрушается. Экспериментально определено, что разрушение образца происходит эффективно, если давление струи в 10 раз превышает предел прочности образца на сжатие: $p_c > 10\sigma_{\text{пр}}$. Поэтому максимальная скорость струи выбирается по назначению ГП и не может быть меньше требуемой.

Максимальное давление p_{\max} определяет напряжения и деформации в корпусе установки, которые, в конечном счете, определяют ее надежность и работоспособность. Напряжения в корпусе установки в процессе выстрела не должны превышать предела прочности материала, из которого он изготовлен. Это очень важный конструктивный параметр, который существенно влияет на массо-габаритные характеристики установки. Стремление получить струи сверхвысокого давления приводит к увеличению давления внутри установки и напряжений в ее корпусе. Поэтому для увеличения прочности установки применяют различные способы упрочнения ее корпуса: изготовление корпуса из составных цилиндров, напрессованных с натягом, навивка стальной проволоки, автофреттирование, применение композитных материалов.

Коэффициент превышения давления k_p показывает, во сколько раз динамическое давление

струи превышает максимальное давление в установке. Чем больше k_p , тем больше давление струи на преграду по сравнению с давлением внутри установки. Г.А. Атановым было показано, что для ИВ $k_p \leq 1$, т.е. максимальное давление струи не превышает максимальное давление внутри установки [1]. Значение k_p приближается к единице, если процесс в ИВ близок к квазистационарному. Если же процесс в ИВ носит волновой характер, то значение k_p значительно меньше единицы. Например, для электроимпульсного водомета, в котором используется энергия электрического разряда в жидкости, $k_p \approx 0.6$ [12]. Это ограничение связано с тем, что работа ИВ основана на принципе выдавливания жидкости под большим давлением из замкнутого объема через малое отверстие. Поэтому скорость струи ИВ ограничена максимальным давлением внутри установки и, как правило, не превышает 1500 м/с. Для разрушения очень крепких материалов такой скорости может быть не достаточно.

В отличие от ИВ, ускорение воды в ГП происходит по инерционному принципу [1, 2], что позволяет получать струи более высокой скорости (до 3000 м/с). Коэффициент превышения давления для ГП, как правило, больше единицы ($k_p > 1$) и даже может в несколько раз превышать единицу. По этому параметру ГП значительно превосходит ИВ. Например, для экспоненциального профиля, предложенного и запатентованного Б. В. Войцеховским [4, 13], в рамках модели идеальной несжимаемой жидкости расчетное значение $k_p = 4$. Для более точной модели, учитывающей сжимаемость жидкости при больших давлениях и скоростях, расчетное значение этого коэффициента немного меньше: $k_p = 3.6$ [14]. Идеи Б. В. Войцеховского были реализованы в экспериментальной ГП Кули, которая испытывалась при проходке туннелей [5]. Расчетная скорость струи ГП Кули по теории Б. В. Войцеховского для несжимаемой жидкости составляла 4000 м/с, по теории Г. А. Атанова для идеальной сжимаемой жидкости – 3050 м/с [2, 14], измеренная в эксперименте – 3000 м/с [5]. Давление внутри установки не измерялось. Эти данные означают, что при максимальном давлении внутри ГП $p_{\max} = 1000$ МПа (это вполне достижимо для современных материалов и технологий) максимальное давление струи на преграду будет составлять около $\rho u_{\max}^2/2 = 4000$ МПа. Такого давления достаточно для разрушения даже самого крепкого материала. Однако эффективность разрушения струей ГП быстро уменьшается с увеличением расстояния до преграды, что ограничивает ее применение [1]. Это свя-

зано с тем, что истечение струи ГП начинается с максимальной скоростью, которая затем быстро уменьшается, что приводит к разрушению струи и снижению эффективности разрушения.

Как отмечалось выше, эффективность воздействия струи на преграду сильно зависит от скорости струи. Поэтому в струе определяющую роль играет высокоскоростной участок, скорость которого лежит в интервале $u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$. Минимальную скорость высокоскоростного участка выберем такой, чтобы удельная энергия и динамическое давление струи при этой скорости было в два раза меньше максимальных значений. Исходя из этих соображений, получим минимальную скорость высокоскоростного участка струи: $u_{\min} = u_{\max}/\sqrt{2}$. Как показали дальнейшие расчеты, энергия высокоскоростного участка струи для разных сопел составляет 60–70 % от полной энергии струи. Из этих соображений сделан вывод о малом влиянии на эффективность выстрела участка струи, скорость воды в котором меньше u_{\min} .

Для оценки эффективности перераспределения энергии в ГП введем коэффициент преобразования энергии k_e , который определяется как отношение энергии высокоскоростного участка струи E_{\max} к начальной кинетической энергии E_0 поршня и водяного заряда:

$$k_e = E_{\max}/E_0, \quad E_0 = m_0 U_0^2/2,$$

$$E_{\max} = \int_{t_1}^{t_2} \rho F_s \frac{u^3}{2} dt,$$

где m_0 – суммарная масса поршня и водяного заряда; U_0 – начальная скорость поршня и водяного заряда; t_1 и t_2 – начальное и конечное время высокоскоростного участка, скорость которого лежит в интервале $u \in [u_{\max}, u_{\min}]$; ρ – плотность воды; F_s – площадь выходного сечения сопла; u – скорость струи.

Этот коэффициент можно рассматривать как КПД установки, который показывает, какая доля первоначальной кинетической энергии поршня и воды, движущихся с небольшой скоростью, превращается в энергию высокоскоростного участка струи, который используется как инструмент для разрушения. Чем выше коэффициент преобразования энергии, тем больше кинетическая энергия высокоскоростного участка струи, которая направлена на объект обработки. При истечении скорости воды на срезе сопла ГП, как правило, быстро убывает. Поэтому скорость частиц головы струи больше, чем скорость частиц хвоста струи. Со временем это приводит к отрыву головной части, что сопровождается разрушением струи и резким

уменьшением эффективности ее силового воздействия на преграду. Поэтому дальность выстрела ГП сильно зависит от изменения скорости по длине струи. Для численной характеристики компактности струи введем коэффициент компактности k_v , равный обратной величине модуля безразмерного градиента скорости высокоскоростного участка струи:

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

В качестве масштабов для определения коэффициента k_v выбрана максимальная скорость струи u_{\max} и длина сопла L_s . Чем больше коэффициент компактности k_v , тем компактнее струя, тем больше ее силовое воздействие и дальнобойность. Продольный градиент скорости приводит к возникновению кавитации в струе и уменьшению плотности среды по мере ее распространения. Поэтому при увеличении расстояния до преграды о преграду будет ударяться струя с веществом, средняя плотность которого может быть значительно меньше плотности жидкости при обычных условиях. Конкретные оценки этого коэффициента могут быть проведены только после определения зависимости скорости истечения струи от времени. Эффективность силового воздействия струи на преграду от коэффициента компактности можно оценить, рассмотрев удар высокоскоростного участка струи для конкретного сопла ГП о преграду, которая находится на определенном расстоянии от установки.

Перечисленные критерии сильно зависят от таких факторов, как входной и выходной радиусы сопла, форма сопла, масса поршня и водяного заряда, начальная скорость воды и поршня, свойства жидкости и т.д. В настоящей работе исследовано влияние только формы сопла на эффективность ГП. За основу взята лабораторная ГП [15]. Расчеты проведены для разных сопел, описанных в работе Черменского [6]. Эффективность ГП оценивалась по перечисленным выше критериям.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МЕТОД РЕШЕНИЯ

Хорошие результаты для расчета параметров ГП дает модель, в которой жидкость считается идеальной и сжимаемой, течение предполагается квазиодномерным и изэнтропическим, влияние воздуха в сопле и деформации корпуса не учитываются [1, 2]. В рамках этой модели движение жидкости описывается системой уравнений

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

со следующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{aligned} u(0, x) &= U_0, \quad p(0, x) = 0, \\ \rho(0, x) &= \rho_0; \quad -L \leq x \leq 0; \\ u(t, x_p) &= u_p, \quad p(t, x_F) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

При истечении струи на срезе сопла ставилось граничное условие, выражающее равенство давления в струе давлению окружающей среды, которое для простоты считалось равным нулю:

$$p(t, x_s) = 0.$$

Здесь x – координата; t – время; u , p и ρ – скорость, давление и плотность соответственно; F – площадь поперечного сечения канала; x_p и u_p – координата и скорость поршня; x_F – координата свободной поверхности; x_s – координата среза сопла; L – длина водяного заряда; $B = 304.5$ МПа; $n = 7.15$ и $\rho_0 = 1000$ кг/м³ – постоянные в уравнении состояния воды в форме Тэта. Начало координат помещено у входа в сопло, за начальный принят момент времени, когда передний фронт жидкости достигает входа в сопло.

Движение поршня описывалось обыкновенными дифференциальными уравнения с начальными условиями

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= -F_p \frac{p(t, x_p)}{m_p}, \quad \frac{dx_p}{dt} = u_p, \\ u_p(0) &= u_0, \quad x_p(0) = -L, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_p – площадь поршня. Поставленная задача решалась численно методом Родинона [10], обобщенным для расчета нестационарных квазиодномерных движений жидкости [11]. Конечноразностная аппроксимация уравнений движения (1) по схеме Родинона для подвижной сетки имеет вид

$$\begin{aligned} \rho_{i+1/2}^{m+1} &= \frac{(\rho \Delta x)_{i+1/2}^m - \Delta t [R(U - W)]_i^{i+1}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1}} - \\ &- \left(\frac{\rho u}{F} \right)_{i+1/2}^{m+1/2} \frac{F|_i^{i+1}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1/2}} \frac{\Delta t \Delta x_{i+1/2}^{m+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1}}; \\ (\rho u)_{i+1/2}^{m+1} &= \left\{ (\rho u \Delta x)_{i+1/2}^m - \right. \\ &- \Delta t [(RU(U - W) + P)]_i^{i+1} \left. \right\} / \Delta x_{i+1/2}^{m+1} - \\ &- \left(\frac{\rho u^2}{F} \right)_{i+1/2}^{m+1/2} \frac{F|_i^{i+1}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1/2}} \frac{\Delta t \Delta x_{i+1/2}^{m+1/2}}{\Delta x_{i+1/2}^{m+1}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь Δt – шаг по времени; $\Delta x_{i+1/2}^m$ – шаг сетки по координате на m -ом шаге по времени; $W_i = (x_i^{m+1} - x_i^m) / \Delta t$ – скорость движения i -го узла сетки; $F|_i^{i+1} = F_{i+1}^{m+1/2} - F_i^{m+1/2}$. Большими буквами R, U, P обозначены параметры, которые рассчитываются на границах ячеек при решении обобщенной задачи Римана или на границах расчетной области из граничных условий. Параметры с целыми индексами i определяются в точках с координатами x_i , а параметры с полуцелыми индексами $i+1/2$ – в точках с координатами $(x_i + x_{i+1})/2$. Нумерация узлов сетки от 0 до N слева направо.

Расчетная область подвижная, ограниченная слева поршнем, а справа – свободной поверхностью. Границы расчетной области движутся по неизвестным заранее законам, которые определяются в ходе решения задачи. Когда начинается истечение струи, то движение струи не рассчитывается и правая граница расчетной области фиксируется. На этой границе задается граничное условие для давления, равное давлению окружающей среды. Аппроксимация граничных условий (2) проводилась по схеме Родионова со вторым порядком точности. Уравнения движения поршня (3) решались численно по улучшенной схеме Эйлера второго порядка точности.

3. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА ПАРАМЕТРЫ ГИДРОПУШКИ

3.1. Втекание жидкости в сопло

Процесс выстрела ГП разобьем на два этапа: втекание воды в сопло и истечение струи. Оценку эффективности ГП с разными соплами будем делать для каждого этапа в отдельности и для ГП в целом. Рассмотрим I этап – втекание жидкости

в сопло ГП. На этом этапе исследовано влияние формы сопла на следующие параметры ГП: максимальная скорость струи u_{\max} , максимальное давление внутри установки p_{\max} , коэффициент превышения давления k_p . Базовой установкой для расчета была выбрана лабораторная ГП со следующими конструктивными параметрами: $m_p = 2.25$ кг – масса поршня, $L_s = 0.253$ м – длина сопла, $L_c = 0.14$ м – длина заряда воды, $R_c = 33$ мм – радиус ствола, $R_s = 5$ мм – радиус сопла, $u_0 = 76.2$ м/с – начальная скорость воды и поршня [15]. Анализ проводился для следующих сопел: Витошинского, коноидального, катеноидального, экспоненциального и конического. Каждое из этих сопел обладает своими достоинствами и недостатками и нашло применение в определенной области.

Профиль Витошинского плавно согласуется с входом и выходом (производная от радиуса сопла по координате в этих точках равна нулю) и дает наиболее равномерное распределение скорости потока в поперечном сечении на выходе из сопла. Этот профиль широко применяется в расходомерах и других измерительных приборах.

Профиль коноидального сопла соответствует форме истекающей из него стационарной струи несжимаемой жидкости. Такие сопла имеют очень высокий коэффициент расхода, достигающий значений $\mu = 0.994$. Однако из-за трудностей изготовления эти сопла не нашли широкого применения и были вытеснены более простыми коническими соплами с коллиматорами длиной около диаметра сопла.

Катеноидальный профиль, в отличие от профиля Витошинского, плавно согласуется только с выходным сечением, что позволяет также получать компактную струю с равномерным распределением скорости. Поэтому катеноидальный профиль нашел широкое применение в гидроабразивной резке. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что катеноидальный профиль позволяет повысить производительность гидрорезки различных материалов на 10–30% по сравнению с другими соплами.

Экспоненциальный профиль, предложенный Б. В. Войцеховским, по мнению автора, позволяет наиболее эффективно передавать энергию поршня импульсной струе жидкости, обеспечивая торможение поршня с постоянным ускорением. Этот профиль рассчитан на работу с импульсными струями жидкости, в то время как перечисленные выше профили используются для стационарных струй. Теория Б. В. Войцеховского была построена для идеальной несжимаемой жидкости. Поэтому при больших скоростях и давлениях, когда

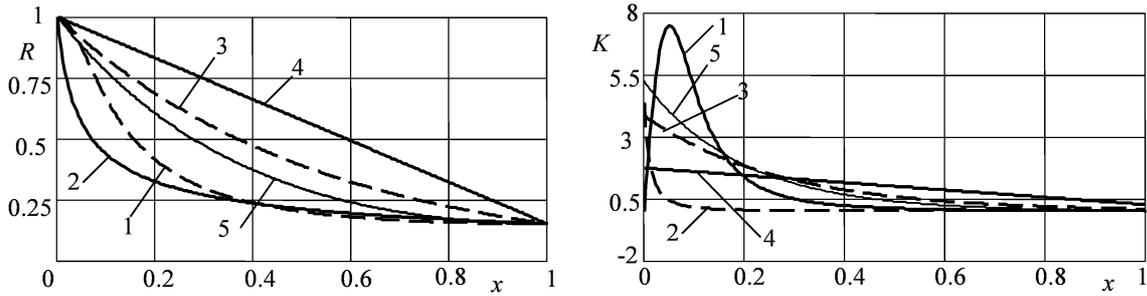


Рис. 2. Зависимость радиуса (*a*) и крутизны *b* сопла от координаты для профилей: 1 – Витошинского, 2 – коноидального, 3 – экспоненциального, 4 – конического, 5 – катеноидального

необходимо учитывать сжимаемость жидкости, эта теория дает существенные количественные и качественные ошибки.

Коническое сходящееся сопло с небольшим углом конусности широко применяется в гидравлике и в гидрорезке. Основным достоинством конического сопла является простота изготовления при удовлетворительных гидродинамических параметрах. Угол конусности таких сопел составляет около $13 - 14^\circ$, а длина цилиндрического участка на выходе (коллиматора), который способствует стабилизации параметров струи – около $(0.7 \div 0.8)$ диаметра сопла. Сопло такой формы дает коэффициент расхода $\mu = 0.93 \div 0.97$. Ускорение жидкости в сопле существенно зависит от его формы. Чем быстрее уменьшается радиус сопла, тем интенсивнее стекание потоков к оси, тем больше ускорение жидкости и тем больше ее давление. Поэтому радиус сопла должен изменяться по определенному закону, чтобы струя на выходе имела заданную скорость, а давление внутри установки не превышало предельного значения.

На рис. 2 приведены безразмерные графики зависимостей радиуса и крутизны сопел от координаты. За масштабы выбраны: радиус ствола R_c , площадь ствола F_c , длина сопла L_s и средняя крутизна сопла

$$\bar{K} = \frac{1}{L_s} \int_0^{L_s} K(x) dx = \frac{F_s - F_c}{L_s}$$

Крутизна сопла количественно характеризует быстроту сужения сопла и равна производной площади поперечного сечения сопла $F(x)$ по координате

$$K = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (5)$$

Как видно из графиков, для разных сопел характерна разная крутизна. Сопло Витошинского

1 плавно сопрягается с цилиндрическим стволом и его крутизна здесь равна нулю. Но уже на расстоянии $x = 0.05$ от входа это сопло имеет максимальную крутизну, которая затем быстро уменьшается и стремится к нулю в конце сопла. Коническое сопло 4 имеет небольшую крутизну в начале ($K_1 = 1.7$), но самую большую – в конце сопла ($K_2 = 0.26$). Экспоненциальное сопло имеет большую крутизну в начале ($K_1 = 3.9$) и меньшую, чем коническое сопло, в конце ($K_2 = 0.09$). Самую большую крутизну на входе имеет коноидальное сопло: $K_1 = 43.6$. Разный характер изменения формы сопла существенно влияет на гидродинамические параметры ГП, о чем свидетельствуют приведенные ниже результаты расчетов. В расчетах варьировалась только форма сопла, а остальные конструктивные параметры (входной, выходной радиус и длина сопла, масса и скорость поршня, масса воды) оставались постоянными.

На рис. 3 представлены распределения давления и скорости воды по координате на начало истечения струи для разных сопел. Давление отнесено к начальному скоростному напору $\rho u_0^2/2$, а скорость – к начальной скорости u_0 . Из графиков видно, что максимальные давления на начало истечения для разных сопел различаются примерно на 20%. Положение максимумов давления зависит от крутизны сопла на входе. Чем больше крутизна сопла на входе, тем больше давление во входной части, тем более пологий профиль давления (например, кривая 1 для сопла Витошинского на рис. 3, а). Для конического сопла максимум давления наблюдается в конце сопла, где у него наибольшая крутизна по сравнению с другими соплами. В стволе давление для конического сопла в 5 раз меньше, чем максимальное. Для сопла Витошинского давление в стволе всего на 10% меньше максимального давления в сопле. Для сопла Витошинского высокие давления наблюдаются в стволе и у входа в сопло, где радиусы проточной части

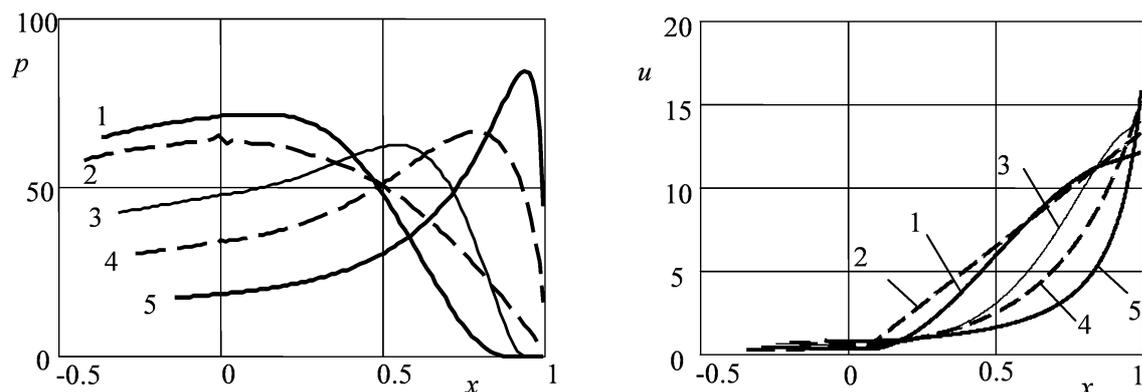


Рис. 3. Распределение по координате на начало истечения струи давлений (а) и скоростей (б) для разных сопел:

1 – Витошинского, 2 – конического, 3 – экспоненциального, 4 – конического, 5 – катеноидального

установки большие. Для конического и экспоненциального сопла максимальные давления возникают в самом конце сопла, а для других профилей – между серединой и концом сопла, т. е. в тех зонах, где радиусы проточной части установки небольшие. Как известно, удовлетворить требованиям прочности для сопла и ствола тем проще, чем меньше их радиусы. Поэтому с точки зрения прочности установки самым выгодным является коническое сопло, а невыгодным – сопло Витошинского. Остальные сопла по этому критерию занимают промежуточное положение. Максимальные скорости истечения для разных сопел отличаются на 25%.

Максимальная скорость истечения – для конического сопла, а минимальная – для сопла Витошинского. В сопле Витошинского вода интенсивно ускоряется в начале сопла и значительно медленнее в конце, о чем свидетельствует пологий участок в конце кривой 1 на рис. 3, б. Поэтому струя из сопла Витошинского будет иметь небольшой продольный градиент скорости, что способствует увеличению ее дальности. Напротив, в коническом сопле интенсивное ускорение жидкости происходит в конце сопла. Кривая 5 распределения скорости для этого сопла круто идет вверх в конце сопла. В струе, истекающей из конического сопла, будет большой продольный градиент скорости, что приведет к существенному уменьшению ее дальности. Пологий участок в распределении скорости имеет катеноидальное сопло (кривая 3, рис. 3, б). Струя из этого сопла будет компактной, как для профиля Витошинского, а ее скорость – на 12% больше. Этим объясняется широкое применение катеноидальных сопел для

получения стационарных высоконапорных струй в гидрорезке. Промежуточное значение занимает экспоненциальный профиль Войцеховского. Скорость струи и градиент скорости в конце сопла для этого профиля меньше, чем для конического, но больше, чем для профилей Витошинского и катеноидального.

В табл. 1 приведены параметры, характеризующие эффективность ГП при втекании, для разных сопел, а также средняя крутизна сопел на входе K_i и на выходе K_o . Средняя крутизна сопла на входе K_i и на выходе K_o , отнесенная к средней крутизне сопла, определялась на $1/4$ длины соответствующего участка сопла по формулам:

$$K_i = \frac{L_s}{\Delta F} \frac{4}{L_s} \int_0^{\frac{L_s}{4}} \frac{dF(x)}{dx} dx = 4 \frac{F\left(\frac{L_s}{4}\right) - F_c}{\Delta F},$$

$$K_o = \frac{L_s}{\Delta F} \frac{4}{L_s} \int_{\frac{3}{4}L_s}^{L_s} \frac{dF(x)}{dx} dx = -4 \frac{F\left(\frac{3}{4}L_s\right) - F_s}{\Delta F},$$
(6)

где $\Delta F = F_s - F_c$.

Из приведенных данных видно, что для конического сопла скорость струи и давление в установке – максимальные, а коэффициент превышения давления – минимальный. Максимальный коэффициент превышения давления $k_p = 2.636$ имеет катеноидальное сопло. Максимальная скорость струи для этого сопла на 12% меньше, чем для конического, а давление – меньше в 2, 3 раза. Чем больше крутизна сопла на выходе, тем больше максимальная скорость струи и давление в установ-

Табл 1. Основные параметры ГП при втекании

Сопло	p_{max}	u_{max}	k_p	K_i	K_o
Витошинского	81,89	12,13	1,796	3,606	0,012
коноидальное	71,34	13,28	2,472	3,742	0,030
катеноидальное	73,92	13,96	2,636	2,929	0,045
экспоненциальное	111,3	15,15	2,062	2,500	0,147
коническое	173,4	15,88	1,454	1,553	0,447

ке. Максимум давления для таких сопел локализован в узкой части сопла. Чем больше крутизна сопла на входе, тем больше давление в широкой части сопла и в стволе, что негативно отражается на прочности установки. Из анализа полученных результатов следует, что на стадии втекания лучшими гидродинамическими параметрами обладает катеноидальное сопло. Оптимальное сопло с максимальным коэффициентом превышения давления k_p и заданной максимальной скоростью u_{max} можно получить, варьируя крутизну сопла на входе и на выходе, выбрав первым приближением катеноидальное сопло.

3.2. Истечение струи жидкости из сопла

Как известно, ГП предназначена для получения импульсных струй жидкости сверхвысокой скорости, которые используются в различных технологических процессах. Эффективность силового воздействия импульсной струи жидкости на объект обработки в основном определяется ее параметрами: скоростью, энергией и компактностью. Особую роль в процессе взаимодействия импульсной струи с мишенью играет высокоскоростной участок. Формирование этого участка во многом происходит при втекании жидкости в сопло, как это отмечалось выше. Поэтому детальное изучение внутренней баллистики ГП (втекание жидкости в сопло) также является актуальной задачей, как и исследование внешней баллистики (распространение и взаимодействие струи с объектом).

На рис. 4 приведены безразмерные зависимости скорости втекания жидкости в сопло и истечения струи из сопла и максимального давления в ГП от времени. Скорость отнесена к начальной скорости u_0 , давление – к начальному скоростному напору $\rho_0 u_0^2/2$, а время – к характерному времени L_s/a_0 , где $a_0 = 1476$ м/с – скорость звука в воде при атмосферном давлении. Черточками на кривых скорости отмечены начало и конец высокоскоростного участка струи.

Как видно из графиков, истечение струи для разных сопел начинается практически с максимальной

скоростью. Для сопла Витошинского (кривые 1) истечение начинается со скоростью, которая немного меньше максимальной скорости при втекании жидкости в сопло. Затем скорость истечения быстро уменьшается. Максимальное давление возникает во входной части сопла, где диаметр наибольший. На интервале от поршня до середины сопла давление различается незначительно. Волновой характер процессов и связанные с этим пульсации параметров течения для сопла Витошинского не наблюдаются.

Для коноидального сопла (кривые 2) истечение начинается практически с максимальной скорости. Распределение скорости по длине внутри сопла и в стволе – линейное. Изменение скорости втекания и истечения от времени также линейное. Втекание воды в это сопло происходит наиболее быстро, по сравнению с другими соплами. Максимальное давление для коноидального сопла меньше, чем для других сопел.

Для экспоненциального сопла (кривые 3) истечение струи начинается с максимальной скоростью, которая меньше, чем для конического сопла, и затем так же быстро уменьшается. Максимальное давление наблюдается немного позже, чем максимальная скорость истечения, примерно на расстоянии 0.2 от среза сопла. В сопле протекают волновые процессы, которые заметны для низкоскоростного участка струи. После отражения волны от поршня скорость истечения возрастает до $0.6u_{max}$, а затем окончательно убывает.

Максимальная скорость истечения и максимальное давление в ГП наблюдаются для конического сопла (кривые 4). На графиках для конического сопла хорошо видны волновые процессы, протекающие в ГП. Максимумы скорости истечения и давления соответствуют времени, за которое волны проходят расстояние от среза сопла до поршня, которое чуть больше длины сопла. Проявление ярко выраженного волнового характера для конического сопла объясняется тем, что это сопло имеет наибольшую крутизну в конце, где наибольшая скорость движения жидкости. Зона максимального давления локализована в конце сопла,

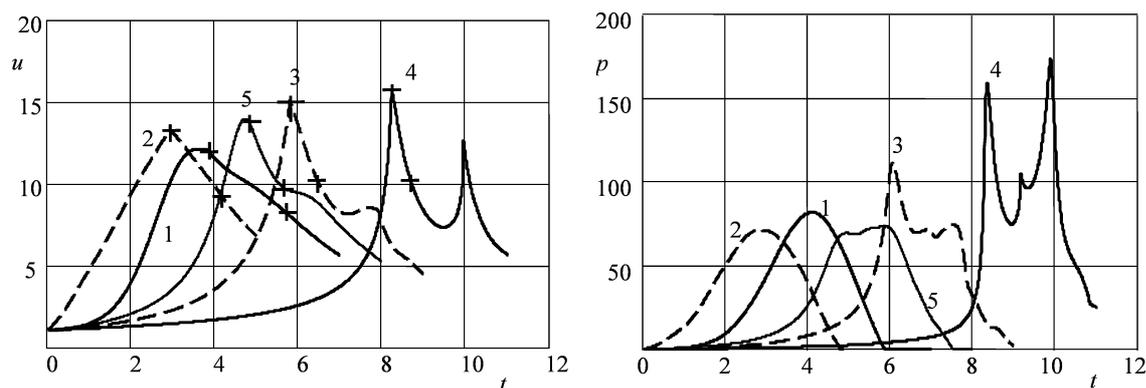


Рис. 4. Зависимость скорости втекания и истечения (а) струи и максимального давления (б) в ГП от времени для сопел:

1 – Витошинского, 2 – коноидального, 3 – экспоненциального, 4 – конического, 5 – катеноидального

где его поперечные размеры наименьшие. У входа в сопло и в стволе давление на разных стадиях в 3 – 8 раз меньше максимального.

Для катеноидального сопла (кривые 5) истечение начинается практически с максимальной скоростью, которая немного меньше, чем для конического и экспоненциального сопел. Во время истечения высокоскоростного участка максимальное давление в сопле почти не изменяется. На разных стадиях процесса давление по длине ствола изменяется незначительно и на 5 – 20% меньше максимального. При истечении высокоскоростного участка струи максимальное давление внутри установки почти не изменяется (кривая 5 на рис. 4, б при истечении имеет пологое плато).

Из анализа результатов следует, что для сопел Витошинского и катеноидального экстремум скорости в конце втекания пологий, и истечение начинается со скоростью, немного меньшей, чем максимальная. Затем скорость истечения для всех сопел уменьшается: для сопел 1, 2 и 5 – монотонно, а для экспоненциального и конического – с пульсациями. Уменьшение скорости истечения для высокоскоростного участка для всех сопел близко к линейному закону. Пульсации скорости истечения для экспоненциального и конического сопел объясняются волновыми процессами в ГП, которые проявляются для сопел, имеющих большую крутизну вблизи выходного сечения сопла. Особенно ярко это выражено для конического сопла, где на графиках четко выражены пики скорости и давления. Максимумы скорости истечения и давления соответствуют времени, за которое волны сжатия проходят расстояние от среза сопла до поршня, т. е. чуть больше длины сопла. Всплеск давления на поршне как раз соответствует приходу волны сжа-

тия от сопла к поршню. Отразившись от поршня, эта волна вызывает второй максимум давления и скорости истечения струи. Проявление ярко выраженного волнового характера для конического сопла объясняется тем, что из всех сопел это имеет максимальную крутизну в конце, где наибольшая скорость движения жидкости. Максимальное давление наблюдается для конического сопла и достигает $173p_0$, а минимальное – у коноидального сопла (около $70p_0$).

Табл. 2. Основные параметры ГП при истечении

Сопло	k_v	k_e	K_i	K_o
Витошинского	3,92	0,751	3,606	0,012
коноидальное	2,64	0,643	3,742	0,030
катеноидальное	2,13	0,541	2,929	0,045
экспоненциальное	1,37	0,383	2,500	0,147
коническое	0,73	0,190	1,553	0,447

В табл. 2 приведены критерии ГП на стадии истечения и крутизна профилей для разных сопел. Как видно, при увеличении крутизны сопла на входе время втекания в сопло уменьшается, продолжительность выстрела значительно укорачивается (кривые 1 и 2 на рис. 4). При уменьшении крутизны сопла на выходе уменьшается градиент скорости вдоль струи, улучшается компактность струи, увеличивается длина высокоскоростного участка и эффективность преобразования энергии.

Из приведенных данных видно, что при истечении наиболее эффективным оказывается сопло Витошинского: у него наилучшая компактность струи и наибольший коэффициент преобразования энергии. Наихудшие показатели – у кониче-

ского сопла. У него наименьшие коэффициенты компактности и преобразования энергии. Его коэффициент компактности в 5 раз меньше, а коэффициент преобразования энергии в 4 раза меньше, чем у сопла Витошинского. Неплохие показатели имеют коноидальное и катеноидальное сопла.

3.3. Взаимодействие импульсной струи жидкости с преградой

Эффективность сопел при взаимодействии струи с преградой оценим по коэффициенту компактности на следующей модели. Как следует из расчетов, скорость истечения высокоскоростного участка струи убывает для разных сопел по разным законам. Из графиков видно, что с достаточной точностью закон истечения струи близок к линейному и может быть описан зависимостью

$$u(t) = u_{max} - \frac{|\Delta u|}{\Delta t} t, \quad (7)$$

где $|\Delta u| = u_{max} - u_{min}$ – изменение скорости на высокоскоростном участке струи; Δt – время, за которое произошло изменение скорости. По заданному закону изменения скорости истечения струи (7) определим длину высокоскоростного участка струи и параметры жидкости на этом участке на момент формирования. Так как давление в струе равно атмосферному и частицы жидкости движутся, разлетаясь, то в жидкости возникает кавитация, которая развивается по мере распространения струи и обязательно должна учитываться при взаимодействии струи с преградой. Для описания движения жидкости с кавитацией воспользуемся моделью кавитации с постоянным давлением в рамках модели сплошной среды [16–19]. Согласно этой модели кавитация возникает, если давление в жидкости понижается до некоторого критического и в дальнейшем не изменяется, пока кавитация не закроется. Однако плотность жидкости уменьшается и может стать значительно меньше плотности обычной жидкости. При внешнем воздействии распределение скорости в кавитирующей жидкости может измениться так, что среда станет сжиматься, что приведет к исчезновению кавитации. Уравнение состояния воды с учетом кавитации для принятой модели имеет вид

$$p = \begin{cases} B[(\rho/\rho_0)^n - 1], & \rho > \rho_{cr}, \\ p_{cr}, & \rho < \rho_{cr}. \end{cases} \quad (8)$$

Учитывая небольшую величину критического давления на практике часто им пренебрегают, считая, что вода совсем не выдерживает растяжения, т. е. $p_{cr} = 0$. Рассмотрим следующую модель-

ную задачу. Пусть из сопла ГП начинает истекать высокоскоростной участок струи, а скорость истечения убывает по линейному закону (7). За время Δt этот участок струи сформируется. В дальнейшем рассматривается взаимодействие только высокоскоростного участка струи с преградой, которая располагается на разных расстояниях от ГП. Влиянием окружающей среды пренебрегаем, струю считаем цилиндрической с постоянным радиусом, равным радиусу R_s выходного сечения сопла, кавитацию учитываем по изложенной модели. Одномерное движение кавитирующей жидкости в лагранжевой форме описывается уравнениями [16–19]

$$\frac{d\rho}{dt} = -\rho \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{du}{dx} = 0. \quad (9)$$

Из уравнений (3) следует, что скорость частиц жидкости остается постоянной, а плотность уменьшается из-за положительного градиента скорости ($\partial u/\partial x > 0$). Распределение скорости и плотности сформированного высокоскоростного участка струи найдем из следующих соображений. Частицы жидкости вытекают из сопла с переменной скоростью, которая затем при движении остается постоянной. Координату частицы, которая вытекла из сопла в момент времени t ($0 \leq t \leq \Delta t$) и имеет скорость $u(t)$ на момент времени Δt , найдем по формуле

$$x(t) = u(t)(\Delta t - t) = \left(u_{max} - \frac{|\Delta u|}{\Delta t} t \right) (\Delta t - t). \quad (10)$$

Таким образом, будет найдено распределение скорости по длине высокоскоростного участка. Распределение плотности найдем из следующих соображений. За малый промежуток времени δt из сопла площадью S со скоростью $u(t)$ вытекает объем жидкости $\delta V_0 = Su(t)\delta t$ с плотностью ρ_0 и массой $\delta m_0 = \rho_0 \delta V_0$. Границы этого объема движутся с постоянными, но разными скоростями $u(t)$ и $u(t + \delta t)$. В момент времени Δt величина этого объема станет

$$\delta V = S(x(t) - x(t + \delta t)). \quad (11)$$

Плотность среды в этом объеме будет

$$\rho = \rho_0 \frac{\delta V_0}{\delta V}. \quad (12)$$

При расчетах промежутков времени Δt разбивается на N интервалов с шагом $\delta t = \Delta t/N$. Скорость и плотность в разных точках высокоскоростного участка для точек разбиения $i \in [0, N]$ определяются по формулам [10–13].

Табл. 3. Параметры высокоскоростного участка струи

Сопло	u_1 , м/с	u_2 , м/с	Δt , мкс	Δl , мм
Витошинского	879,5	615,6	311	269
коноидальное	962,8	674	212	204
катеноидальное	1012	708,5	154	154
экспоненциальное	1098	768,9	101	112
коническое	1151	805,9	58	68

В табл. 3 приведены параметры высокоскоростного участка струи: начальная и конечная скорость u_1 и u_2 участка, длина Δl и время Δt , за которое сформируется этот участок.

Из приведенных данных видно, что наиболее компактной является струя, истекающая из сопла Витошинского, а наименее компактной – струя, истекающая из конического сопла. Для струи Витошинского наблюдается наименьшее значение коэффициента компактности и градиента скорости по длине струи. Эта струя имеет наиболее протяженный высокоскоростной участок.

Табл. 4. Давление струи на преграду

Сопло	Расстояние до преграды			
	L_s	$2L_s$	$3L_s$	$4L_s$
Витошинского	3,80	2,65	1,97	1,52
коноидальное	3,19	2,04	1,46	1,05
катеноидальное	2,66	1,59	1,06	0,88
экспоненциальное	2,1	1,19	0,83	0,60
коническое	1,3	0,72	0,34	0,25

В табл. 4 приведено давление p_t высокоскоростного участка струи на преграду для разных сопел, описанных выше. В расчетах варьировалось расстояние от установки до преграды в пределах от L_s до $4L_s$, где $L_s = 253$ мм – длина сопла, принятая за единицу масштаба. Расчеты проводились по изложенной выше методике с учетом кавитации жидкости по модели с постоянным давлением. Для сравнения давление струи на преграду p_t отнесено к динамическому давлению струи $p_{дин} = \rho_0 u_1^2 / 2$ при максимальной скорости.

Как видно, давление струи на преграду очень быстро уменьшается при увеличении расстояния до преграды. При увеличении расстояния до преграды от L_s до $4L_s$ (в размерных единицах от 0.25 до 1 м) давление струи уменьшается в 2.5–5 раз для разных сопел. Уменьшение давления струи на преграду при удалении преграды связано с градиентом скорости вдоль оси струи. Частицы жидкости в струе движутся, разлетаясь, что

приводит к уменьшению плотности среды и разрушению струи. В результате о преграду ударяется не обычная вода, а парогазовая среда, средняя плотность и упругость которой намного меньше воды. Приведенные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, в которых обнаружено резкое уменьшение эффективности ГП при увеличении расстояния до преграды [20]. Наилучшие показатели у сопла Витошинского, которое позволяет получить компактную струю с малым продольным градиентом скорости. Наихудшие показатели – у конического сопла, которое дает наименее компактную струю с большим продольным градиентом скорости. Меньше всего давление струи на преграду уменьшается для сопла Витошинского (примерно в 2.5 раза), а больше всего – для конического сопла (примерно в 5 раз). На расстоянии $4L_s$ (около 1 м до преграды) давление струи из сопла Витошинского почти в 4 раза превышает давление струи из конического сопла.

Как отмечалось выше, для ГП и ИВ широко применяется экспоненциальное сопло, предложенное Войцеховским [21]. Профиль Войцеховского рассчитан для идеальной несжимаемой жидкости из условия, что поршень ГП тормозится постоянным давлением жидкости, что, по мнению авторов, позволяет наиболее эффективно трансформировать энергию поршня в энергию импульсной струи жидкости. По теории Войцеховского скорость истечения жидкости из такого сопла убывает по экспоненциальному закону. Полученные результаты относятся к поршневой ГП, процесс выстрела которой жестко детерминирован и практически не управляем. В рамках теории идеальной несжимаемой жидкости втекание свободного водяного заряда в сужающееся сопло принципиально не отличается от движения заряда с поршнем, так как поршень может быть заменен эквивалентным водяным зарядом с массой, равной массе поршня [22, 23]. В результате получится втекание в сопло более длинного водяного заряда. Распределение параметров жидкости и закон их изменения со временем зависят исключительно от профиля сопла и его геометрических размеров. В этом и состоит предопределенность поршневой ГП. Управлять параметрами поршневой ГП в процессе втекания в сопло и истечения из сопла невозможно. В этом смысле конструкция пороховой ГП, в которой используется энергия горящего пороха, позволяет в довольно широких пределах управлять процессом выстрела и существенно увеличить дальность установки [2, 24].

Табл. 5. Комплексная оценка эффективности сопел

Сопло	Критерий						Σ	Комментарии
	\tilde{u}_{\max}	\tilde{p}_{\max}^{-1}	\tilde{k}_p	\tilde{k}_v	\tilde{p}_t	\tilde{k}_e		
Витошинского	76,4	87,1	68,1	100	100	100	531,6	Максимальная компактность струи, коэффициент преобразования энергии и давление на преграду, минимальная скорость струи.
коноидальное	83,6	100	91,0	67,3	85,6	83,9	511,4	Минимальное давление в ГП.
катеноидальное	87,9	96,5	100	54,3	72,0	70,0	480,7	Максимальный коэффициент превышения давления.
экспоненциальное	95,4	64,1	78,2	34,9	51,0	55,3	378,9	Высокая скорость струи.
коническое	100	41,2	55,2	18,6	25,3	34,2	274,5	Максимальная скорость струи, максимальное давление в установке, простота изготовления сопла.

4. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОПЕЛ

Как показали проведенные расчеты, форма сопла существенно влияет на основные параметры ГП. Для сопел, сильно сужающихся на входе и слабо на выходе, характерно небольшое максимальное давление в установке и большая скорость струи, высокий коэффициент превышения давления, компактная струя и эффективное преобразование энергии поршня в энергию струи. При этом давление жидкости в сопле достигает максимума тем ближе к входу в сопло, чем больше крутизна сопла у входа и меньше у выхода.

В табл. 5 приведена оценка эффективности сопел по каждому из критериев в отдельности и суммарная оценка по всем критериям. Оценка проводилась по 100-бальной шкале для следующих критериев: u_{\max} , p_{\max}^{-1} , k_p , k_v , p_t , k_e . Обратная величина для p_{\max} взята потому, что меньшему давлению соответствует большая надежность сопла. Значения критериев в каждой категории отнесены к максимальному значению этой категории, которое принято за 100 баллов (например, $\tilde{u}_{\max} = 100u_{\max}/\max(u_{\max})$).

Сравнение расчетных параметров ГП, полученных для разных сопел, показали, что изменение крутизны сопла на входе и на выходе позволяет повысить компактность и энергию струи, а также изменить коэффициент превышения давления. Характер изменения параметров ГП в зависимости от крутизны сопла позволяет сделать предположение о существовании некоторой формы сопла, для которой можно получить установку с минимальным коэффициентом превышения давления путем изменения крутизны сопла на входе

и на выходе. Также прослеживаются тенденции к увеличению компактности струи при уменьшении крутизны сопла на выходе и увеличении на входе. По результатам расчетов видно, что из рассмотренных сопел наилучшие показатели имеет сопло Витошинского, у которого максимальные значения коэффициентов компактности, преобразования энергии и давления струи на преграду (рейтинг 531,6). Хорошие показатели у коноидального сопла, у которого высокий коэффициент превышения давления и минимальное давление внутри установки (рейтинг 511,4). У катеноидального сопла – максимальный коэффициент превышения давления, а максимальная скорость всего на 12% меньше, чем у конического (рейтинг 480,7). Худшие показатели у конического сопла, хотя оно дает струю с максимальной скоростью (рейтинг 274,5). Можно отметить, что ни одно из рассмотренных сопел не позволяет получить струю, скорость которой не убывала бы сразу с началом истечения. Коэффициент превышения давления имеет и другой физический смысл. Он показывает, во сколько раз максимальное давление внутри установки для получения импульсных струй жидкости меньше, чем в установке для стационарных струй с такой же скоростью. В этом состоит одно из главных достоинств ГП: возможность получать импульсные струи жидкости сверхвысокой скорости при давлениях, значительно меньших, чем для стационарных струй.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки эффективности гидропушки кроме известных критериев (максимальной скорости струи, максимального давления в установке и ко-

коэффициента превышения давления) введены новые (коэффициент преобразования энергии и коэффициент компактности струи), которые характеризуют высокоскоростной участок импульсной струи, играющий определяющую роль при воздействии струи на объект. По этим критериям оценивалась эффективность разных сопел для типовой конструкции поршневой гидропушки. Эффективность сопел оценивалась на трех этапах: втекание жидкости в сопло, истечение импульсной струи из сопла и взаимодействие струи с жесткой преградой. Предложена модель взаимодействия импульсной струи жидкости с преградой, в которой выделен высокоскоростной цилиндрический участок струи, учтен закон истечения струи из сопла и кавитация жидкости. Расчеты выполнены методом Родионова, обобщенным на случай квазиодномерных движений идеальной сжимаемой жидкости. Показано, что форма сопла существенно влияет на гидродинамические параметры гидропушки и импульсной струи жидкости. Установлено, что ни одно из рассмотренных сопел не является оптимальным по всем критериям отбора. Показано, что с увеличением расстояния до преграды давление струи быстро уменьшается, что существенно сказывается на эффективности гидропушки. Предложены пути для определения оптимального сопла гидропушки.

1. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород.– К.: Вища школа, 1987.– 155 с.
2. Семко А. Н. Импульсные струи жидкости высокого давления.– Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007.– 149 с.
3. Атанов Г.А., Семко А.Н. О соотношении между динамическим давлением ультраструи и статическим давлением в установке // Аэрогазодинамика нестационарных процессов.– Сб. науч. тр. Томск: ТГУ, 1987.– С. 9-13.
4. Войцеховский Б. В., Дудин Ю. А., Николаев Ю. А., Николаев В. П., Никитин В. В. Кавитационный эффект в экспоненциальном струйном насадке // Динамика сплошной среды. - Новосибирск: ИГД СО АН СССР.– 1971.– Вып. 9.– С. 7-11.
5. Cooley W. C., Lucke W. N. Rock breakage by pulsed high pressure water jets // Proc. 1st International Symposium on Jet Cutting Technology.– Coventry (England), 1972. – Paper B7.– P. 101-112.
6. Черменский Г.П. Исследование процесса разрушения углей и пород импульсными струями сверхвысокого давления // Труды ВНИИ Гидроугля, Новокузнецк.– 1967.– вып.11.– С. 7-11.
7. Шехтман Н. В., Криворотько С. Д., Николаев В. П. Опыт разрушения бетона и железобетона импульсными водометами на Днепротех-2 // Гидротех. стр-во.– 1976.– N 5.– С. 18-21.
8. Петраков А. И., Криворотько О. Д. Разрушение горных пород импульсными струями воды // Уголь.– 1982.– N 3.– С. 12-15.
9. Vijay M. M. Pulsed jets: fundamentals and applications // Proc. of the 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology.– New Delhi, India, February 3 -5, 1998.– P. 610-627.
10. Родионов А. В. Повышение порядка аппроксимации схемы Годунова // Ж. вычисл. матем. и матем. физ.– 1987.– Т. 27. N 12.– С. 1853-1860.
11. Семко А.Н., Решетняк В.В. Применение метода Родионова для расчета квазиодномерных течений сжимаемой жидкости // Тези науково-практичної конференції 'Комп'ютерна гідромеханіка'.– Київ: ІГМ НАН України, 2008.– С. 44-46.
12. Атанов Г.А., Головки Ю. Н., Криворучко А. М. Об электроимпульсном водомете // Изв. ВУЗов СССР, Энергетика.– 1979.– N 7.– С. 77-81.
13. А. с. 330250 СССР, МКИ ³ E 21 c 45/00. Струйная насадка для получения высоких импульсных динамических напоров / Б. В. Войцеховский. - N 876913/22-3; Заявлено 31.10.63 // Открытия. Изобретения.– 1972.– N 8.– С. 102.
14. Семко А. Н. О влиянии сжимаемости жидкости на параметры гидропушки // Инженерно-физический журнал.– 2001.– Том 74. N 1.– С. 1-5.
15. Атанов Г.А., Семко А.Н., Украинский Ю.Д. Исследование внутренней баллистики гидропушки // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа.– 1983.– N 4.– С. 168-170.
16. Semko A.N. Non-stationary cavitation of a liquid in pulse processes // Proceedings of International Summer Scientific School "High Speed Hydrodynamics" (HSH 2002, June 16 - 23, 2002).– Cheboksary, Russian/ Washington, USA: Cheboksary, Russian, 2002.– P. 377-381.
17. Русанова О.А., Семко А.Н. Моделирование нестационарной кавитации // Вісник Донецького університету, Серія А. Природничі науки.– 2003.– Вип. 1.– С. 148-156.
18. G. Atanov, O. Rusanova, A. Semko Unsteady cavitation in the impulsive and wave processes // Proceedings of Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003, November 1 - 4, 2003).– Osaka, Japan, 2003. Cav03-OS-7-002.– P. 1-7.
19. Атанов Г. А, Русанова О.А., Семко А.Н. Расчет нестационарных течений жидкости с кавитацией // Прикладная гидромеханика.– 2004.– Т. 6 (78). - N 4.– С. 9-16.
20. Лаврентьев М. А. и др. Вопросы теории и практики импульсных водяных струй.– М. А. Лаврентьев, Э. А. Антонов, Б. В. Войцеховский: Новосибирск: Ин-т гидродинамики Сиб. отд-ния АН СССР, 1961.– 102 с.
21. Voitsekhovskiy B.V. Jet nozzle for obtaining high pulse dynamic pressure heads, U.S. Patent № 3, 343, 794, 26 Sept. 1967.
22. Ryhming J. L. Analysis of unsteady incompressible jet nozzle flow // J. of Appl. Mathematics and Physics (ZAMP).– 1973.– V. 24.– P. 149-164.
23. Семко А.Н. Механика гидропушки с поршневым приводом для идеальной несжимаемой жидкости // Вісник Донецького університету, Серія А. Природничі науки.– 2005.– N 1.– С. 149-157.
24. Атанов Г.А., Гескин Э.С., Петренко О.П., Семко А.Н. Влияние формы сопла на параметры пороховой гидропушки // Прикладная гидромеханика.– 2007.– Т. 9 (81). N 4.– С. 3-9.