

УДК 621.658

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОПОТОКА ПРИ РАЗГОНЕ ЖИДКОСТИ В ПОЛУЗАМКНУТОЙ КАМЕРЕ С ВЫХОДОМ НА ПЛОСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Кандидаты технических наук, доценты ИВАШЕЧКИН В. В., КОЗЛОВ Д. А.,
докт. техн. наук, проф. МИХНЕВИЧ Э. И.

Белорусский национальный технический университет

Одной из прикладных задач использования газообразных энергоносителей в технике является применение их для очистки различных фильтрующих и нефилтрующих поверхностей от загрязнений. В качестве газообразных энергоносителей могут применяться сжатые воздух, азот, горючие газы (например, водород) [1–3]. Эти энергоносители при введении в рабочую камеру, сообщающуюся через жидкость с обрабатываемой поверхностью, способны передавать ей энергию, идущую на разрушение и смыв различных загрязнений. Поэтому, несмотря на различную природу явлений, предшествующих образованию газовой полости высокого давления, общими для всех энергоносителей являются следующие разрушающие факторы: пульсации газовой полости и сопровождающие их гидротоки и волны сжатия.

Рассмотрим физическую картину, происходящую в полузамкнутой камере, обращенной к очищаемой плоской поверхности (экрану) и находящейся под слоем жидкости, при сжигании, например, водород-кислородной газовой смеси (ВКС) стехиометрического состава 2:1 (рис. 1).

После инициирования в камере сгорания, например взрывного горения, образуется полость перегретого пара высотой h с исходным давлением $p_{взр} = kp_0$, где k – степень увеличения давления после взрыва по отношению к начальному давлению, которое равно сумме атмосферного $p_{атм}$ и гидростатического давлений на глубине H в жидкости плотностью ρ , т. е. $p_0 = p_{атм} + \rho gH$.

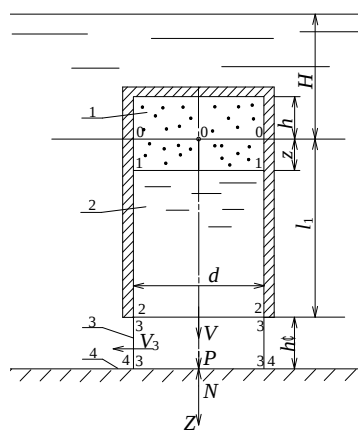


Рис. 1. Расчетная схема: 1 – камера сгорания; 2 – рабочая камера; 3 – торцевая щель; 4 – горизонтальная поверхность

Максимальное значение k , достигаемое при взрывном горении ВКГС в замкнутом объеме, равно примерно 10 [4]. Сразу же после взрыва ВКГС давление на границе газ – жидкость в рабочей камере резко возрастает, что приводит к появлению в жидкости ударной волны давления с амплитудой на фронте $A_1 \approx p_{\text{взр}}$, которая перемещается в пределах водяной пробки рабочей камеры к ее выходу. Массовая скорость U жидкости на фронте волны давления может быть приближенно вычислена по формуле для идеальной жидкости [5]

$$U \approx \frac{A_1}{\rho c}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения волны, которая для подводного газового взрыва близка к скорости звука в воде ($c \approx 1425$ м/с).

При выходе плоского фронта волны за пределы взрывной камеры изменяется его очертание и дальнейшее изменение амплитуды давления в водяной среде обусловлено в основном сферическим расхождением волны. Соотношение (1) выполняется на фронте волны и в узкой окрестности фронта, где по мере падения давления убывает и скорость U [5]. Продукты взрыва расширяются. Давление продуктов взрыва на границу пузырь – жидкость по мере расширения пузыря падает по адиабатическому или политропному закону. Начальная стадия расширения характеризуется относительно большим давлением в продуктах взрыва, разгоном водяной пробки в рабочей камере и формированием нестационарного течения (гидропотока) на выходе рабочей камеры. Гидропоток может в общем случае оказывать воздействие на горизонтальную поверхность в виде двух факторов: силы динамического действия струи и усилия от квазистатического давления на выходе рабочей камеры.

Доля каждого из факторов в общей энергии гидропотока зависит от относительного расстояния между экраном и нижней кромкой рабочей камеры h'/d , которое в свою очередь влияет на потери энергии на участке выход – экран.

При больших расстояниях выходной кромки взрывной камеры от экрана его влияние на истечение жидкости из рабочей камеры не сказывается и происходит свободный выход гидропотока в окружающую среду, что приводит к образованию свободной затопленной струи и потере усилия от квазистатического давления на экран. Чем больше расстояние до экрана, тем больше диссипация энергии. Коэффициент сопротивления ζ выхода из какой-либо трубы на экран, приведенный к скорости v_2 на выходе из трубы, зависит от характера распределения скоростей. Для равномерного распределения скоростей на выходе из трубы влияние экрана перестает сказываться при $h'/d > 1$ и коэффициент сопротивления ζ равен единице (выход из прямой трубы с незакругленными кромками) [6].

При уменьшении относительного расстояния h'/d от 1 до 0,5 величина ζ возрастает от 1,0 до 1,37 [6], что приводит к снижению динамического воздействия на экран за счет уменьшения скорости и появлению некоторого усилия от квазистатического давления на выходе рабочей камеры.

Плавное закругление кромки выходного участка приводит к уменьшению потерь энергии за счет образования кольцевого диффузора, в котором

происходят дополнительное расширение струи и переход кинетической энергии в энергию давления [6]. Наилучшими гидравлическими характеристиками обладает прямой выходной участок с закругленными выходными кромками с относительным радиусом закругления $r/d = 0,5$. Наименьшее значение $\zeta = 0,4$ достигается здесь при $h'/d = 0,18$. При дальнейшем уменьшении расстояния от экрана в диапазоне $0,08 < h'/d < 0,18$ потери резко возрастают ($\zeta = 1,2$ при $h'/d = 0,08$), так как скорость протекания потока между экраном и выходной кромкой повышается.

Опыт работы усилителей типа сопло – заслонка с регулируемой величиной h' , применяемых в следящих системах гидроприводов, показывает, что заслонка начинает эффективно дросселировать при $h'/d < 0,2$ [7]. Максимальный коэффициент расхода $\mu = 0,62$ щели, образованной срезом сопла и заслонкой, имеет место при зазоре $h' = d/4$ ($h'/d = 0,25$), когда площадь проходного отверстия торцевой щели $F_3 = \pi dh'$ равна площади сечения выходного отверстия сопла $F_2 = \pi d^2/4$. То есть когда вытекающий из сопла поток заполняет всю щель и реализуется безотрывный режим течения. Режим истечения при малых открытиях сопла ($h' < d/4$) принят в качестве рабочего в подобных усилителях, так как позволяет получать устойчивое управляемое воздействие на заслонку при изменении h' .

Таким образом, из анализа литературных данных по условиям выхода потока на экран (заслонку) следует, что наилучшими условиями для реализации комплексного воздействия гидропотока на поверхность обладает безотрывный режим истечения ($h' < d/4$), а применение камер с закругленными выходными кромками способно снизить потери на выходе и усилить это воздействие.

Рассмотрим разгон жидкости в камере и определим максимальные скорости в рабочей камере $v_{\max}$, в торцевом зазоре $v_{\max 3}$ и силу P , действующую на обрабатываемую поверхность в конце пути разгона, когда $z = z'$.

Для определения максимальной скорости $v_{\max}$ используем уравнение движения неустановившегося потока вязкой несжимаемой жидкости в абсолютно жестком трубопроводе, записанное для двух сечений потока: 1–1 на границе газовый пузырь – жидкость в рабочей камере и 2–2 в конце рабочей камеры.

Проведем через начало отсчета точку О плоскость сравнения 0–0, соответствующую начальному положению продуктов химического превращения перед расширением.

Получим

$$\frac{p_1}{\rho g} - z + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{6v_2^2}{2g} + \zeta_{\text{кам}} \frac{v_2^2}{2g} + \frac{l_1 - z}{g} \frac{d^2 z}{dt^2}. \quad (2)$$

где v_1, p_1 – скорость и давление в сечении 1–1; v_2, p_2 – скорость и давление в конце рабочей камеры (сечение 2–2); $\frac{l_1 - z}{g} \frac{d^2 z}{dt^2}$ – инерционный напор на участке 1–2, который на стадии разгона потока положителен $\left(\frac{dv}{dt}\right) > 0$;

$\zeta_{\text{кам}}$ – коэффициент потерь напора в рабочей камере, $\zeta_{\text{кам}} = \lambda \frac{l_1}{d}$; λ – коэффициент гидравлического трения.

Давление p_1 изменяется по адиабатическому закону

$$p_1 = kp_0 \left(\frac{h}{h+z} \right)^n, \quad (3)$$

где n – коэффициент адиабаты продуктов взрыва.

Давление p_2 можно найти из формулы для расхода Q торцевой щели площадью сечения F_3 [7]

$$Q = \mu F_3 \sqrt{\frac{2(p_2 - p'_0)}{\rho}}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода торцевой щели; p'_0 – давление в среде, куда происходит истечение, $p'_0 = p_{\text{атм}} + \rho g(H + l_1)$.

Согласно уравнению неразрывности

$$Q = v_1 F_1 = v_3 F_3. \quad (5)$$

Совместно решая уравнения (2)...(5) и принимая $\frac{(l_1 - z)d^2 z}{g dt^2} \approx \frac{l_1}{g} \frac{d^2 z}{dt^2}$,

а рабочую камеру цилиндрической формы, т. е. $F_1 = F_2$; $v_1 = v_2 = v$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, получим дифференциальное уравнение

$$\frac{kp_0}{\rho g} \left(\frac{h}{h+z} \right)^n = \frac{v^2}{2g} \left[\frac{1}{M^2} \left(\frac{F_1}{F_3} \right)^2 + \zeta_{\text{кам}} \right] + \frac{p'_0}{\rho g} + z + \frac{l_1}{g} \frac{d^2 z}{dt^2}. \quad (6)$$

В конце периода разгона скорость v достигнет максимального значения v_{max} при $z = z'$, где z' – участок разгона. В этот момент времени ускорение $\frac{d^2 z}{dt^2}$ потока станет равным 0. Следовательно, при $z = z'$ $v = v_{\text{max}}$ и $\frac{d^2 z}{dt^2} = 0$. Решая уравнение (6) относительно максимальной скорости v_{max} в камере, получим

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \left[\frac{kp_0}{\rho} \left(\frac{h}{h+z'} \right)^n - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho} - g(H + l_1 + z') \right]}{\frac{1}{M^2} \left(\frac{F_1}{F_3} \right)^2 + \zeta_{\text{кам}}}}. \quad (7)$$

Перепишем уравнение (6) с учетом того, что $\frac{dz}{dt} = v$; $\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz}$, получим

$$v \frac{dv}{dz} = \frac{kp_0}{\rho l_1} \left(\frac{h}{h+z} \right)^n - \frac{v_y^2}{2l_1} \zeta_{\text{сист}} - \frac{p_{\text{атм}}}{\rho l_1} - \frac{g}{l_1} (H + l_1 + z), \quad (8)$$

где v_y – скорость жидкости в рабочей камере на данном перемещении z , рассчитываемая по выражению (7) с учетом изменения давления в камере сгорания;

$$\zeta_{\text{сист}} = \left[\frac{1}{\mu^2} \left(\frac{F_1}{F_3} \right)^2 + \zeta_{\text{кам}} \right].$$

Разделим переменные и произведем интегрирование, получим

$$\frac{v^2}{2} = \frac{kp_0 h^n}{\rho l_1 (h+z)^{n-1} (1-n)} - \frac{\zeta_{\text{сист}}}{2l_1} z v_y^2 - \frac{p_{\text{атм}} z}{\rho l_1} - \frac{g(H+l_1)z}{l_1} - \frac{z^2}{2l_1} + C. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования найдем из условия, что при $z = 0$; $v = 0$

$$C = \frac{kp_0 h^n}{\rho l_1 (n-1)}. \quad (10)$$

Подставив (10) в (9) и принимая $z = z'$, получим выражение для v_{max}

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{1}{l_1} \left\{ \frac{2kp_0 h}{\rho(n-1)} \left[1 - \left(\frac{h}{h+z'} \right)^{n-1} \right] - \zeta_{\text{сист}} v_{\text{max}}^2 z' - \right.} \\ \left. - \sqrt{2z' \left[\frac{p_{\text{атм}}}{\rho} + g(H+l_1) + \frac{gz'}{2} \right]} \right\}}. \quad (11)$$

Система уравнений (7), (11) содержит две неизвестные величины z' и v_{max} , которые находят, решив систему итерационным методом.

Для определения силового воздействия на горизонтальную поверхность проведем контрольную поверхность S по сечениям 2–2, 3–3, горизонтальной поверхности 4–4. При составлении уравнения количества движения заменим действие горизонтальной поверхности на поток силой N , равной силе P воздействия потока на горизонтальную поверхность по величине, но направленной в противоположную сторону ($P = -N$). Проектируем на ось Z уравнение количества движения для расчетного отсека, получим

$$P = kD_2 + P_2, \quad (12)$$

где kD_2 – проекция количества движения в сечении 2–2 на ось Z при $v = v_{\text{max}}$; P_2 – проекция силы давления в сечении 2–2 на ось Z .

Проекция количества движения

$$kD_2 = \alpha_{02} \rho Q_{\text{max}} v_{\text{max}} = \alpha_{02} \rho v_{\text{max}}^2 F,$$

где α_{02} – корректив количества движения в сечении 2–2, $\alpha_{02} \approx 1$.

Силу P_2 найдем с учетом выражения (4) в функции v_{max}

$$P_2 = (p_2 - p'_0)F = (\rho v_{\text{max}}^2 / 2\mu^2) (F/F_3)^2 F.$$

Окончательно сила воздействия гидротока на поверхность равна

$$P = \rho v_{\text{max}}^2 \left[1 + \frac{1}{2\mu^2} \left(\frac{F}{F_3} \right)^2 \right] F = p_{\text{уд}} F, \quad (13)$$

где $p_{\text{уд}}$ – удельная сила давления потока на поверхность.

На рис. 2 представлена зависимость $v_{\max}$, P от глубины H при следующих данных: $d = 0,05$ м; $h = 0,025$ м; $l_1 = 0,075$ м; $h' = 0,25d = 0,0125$ м; $n = 1,17$; коэффициент расхода торцевой щели принят по [7] $\mu = 0,62 = \text{const}$ (как для системы сопло – заслонка); $\zeta_{\text{кам}} = \lambda \frac{l_1}{d} = 0,017 \frac{0,075}{0,05} = 0,026$; $\zeta_{\text{сист}} = 2,63$.

Анализ результатов расчетов показывает, что с увеличением глубины H и начального давления продуктов взрыва возрастают скорость $v_{\max}$ и силовое воздействие потока на плоскую стенку (рис. 2).

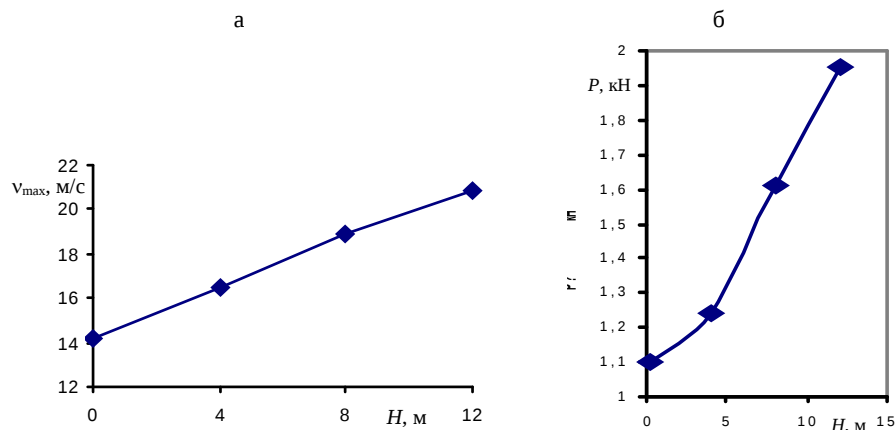


Рис. 2. Графики зависимости максимальной скорости $v_{\max}$ жидкости в рабочей камере и силы P воздействия гидропотока на горизонтальную поверхность от глубины H : а – $v_{\max} = f(H)$; б – $P = f(H)$

Результаты расчетов по определению влияния количества энергоносителя, выраженного в величине слоя h , на кинематические и силовые параметры гидропотока при $h' = 0,0125$ м; $H = 4$ м; $\mu = 0,62$; $n = 1,17$; $\zeta_{\text{сист}} = 2,63$; $\frac{l_1}{h} = 3 = \text{const}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Влияние толщины h слоя энергоносителя
на кинематические и силовые параметры гидропотока**

№ п/п	h , м	l_1 , м	z' , м	$v_{\max}$, м/с	P , кН	$p_{\text{уд}}$, МПа
1	0,025	0,075	0,034	16,5	1,24	0,63
2	0,05	0,15	0,065	16,5	1,24	0,63
3	0,075	0,225	0,102	16,5	1,24	0,63
4	0,1	0,3	0,135	16,5	1,24	0,63

С ростом объема энергоносителя, выраженного величиной h , при неизменных глубине H и степени заполнения рабочей камеры энергоносителем $\frac{l_1}{h} = 3 = \text{const}$ величины $v_{\max}$, R , $p_{\text{уд}}$ не изменяются, однако увеличивается значение z' , что указывает на то, что длительность воздействия гидропотока на поверхность в стадии его разгона возрастает. Это должно положительно повлиять на эффективность удаления загрязнений, так как возрастает импульс давления

$$I = \int_0^t p_{уд}(t) dt .$$

Результаты расчетов по определению влияния величины зазора h' на кинематические и силовые параметры гидропотока при $h = 0,025$ м; $l_1 = 0,075$ м; $\frac{l_1}{h} = 3 = \text{const}$; $H = 4$ м; $\mu = 0,62$; $n = 1,17$ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние величины зазора h' на кинематические и силовые параметры гидропотока

№ п/п	h' , м	$\zeta_{\text{сист}}$	z' , м	v_{max} , м/с	v_{max3} , м/с	P , кН	$p_{уд}$, МПа
1	0,0125	2,63	0,034	16,5	16,5	1,24	0,63
2	0,01	4,08	0,027	14,6	18,2	1,26	0,65
3	0,0083	5,8	0,023	13,1	19,6	1,31	0,67

С уменьшением величины торцевого зазора h' с $\frac{d}{4}$ до $\frac{d}{6}$, т. е. с 0,0125 до 0,0083 (табл. 2), происходит снижение величин z' , v_{max} и наблюдается рост v_{max3} . Некоторое возрастание P и $p_{уд}$ обусловлено увеличением квазистатической составляющей (силы P_2).

ВЫВОДЫ

1. С учетом ряда допущений предложены результаты аналитических исследований по расчету силового воздействия гидропотока на горизонтальную плоскую поверхность при использовании газообразных энергоносителей.

2. Получены формулы для расчета максимальной скорости гидропотока, степени расширения энергоносителя и силы воздействия на плоскую поверхность в конце стадии разгона гидропотока. Установлено, что наибольшее влияние на силу воздействия гидропотока оказывает начальное давление энергоносителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. № 1659290 СССР. Способ очистки корпуса судна и устройство для его осуществления / Д. А. Козлов, И. В. Карпенчук, В. В. Ивашечкин и др. // Бюл. изобр. – 1991. – № 24.
2. А. с. № 1650279 СССР. Способ очистки подводной поверхности / В. В. Ивашечкин, И. В. Поворотный // Бюл. изобр. – 1991. – № 19.
3. А. с. № 1740327 СССР. Устройство для регенерации фильтросных плит азотенков / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, В. Г. Щербаков и др. // Бюл. изобр. – 1992. – № 22.
4. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595 с.
5. Штамповка взрывом: Основы теории / М. А. Анучин, О. Д. Антоненков, Ю. П. Жбанков и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
6. Идельчик И. В. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
7. Башта Т. М. Гидропривод и гидропневмоавтоматика. – М.: Машиностроение, 1972. – 320 с.

Представлена кафедрой
гидравлики

Поступила 29.04.2004