

УДК 621.221: 674.023

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СТРУИ НА КРИВОЛИНЕЙНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

И.А. Полянин

*Марийский государственный университет, Йошкар-Ола*

В статье рассмотрено взаимодействие импульсной гидравлической струи с твердой стенкой в пределах единичного импульса при установившемся пульсирующем движении.

The article shows interaction of a pulse hydraulic jet with a firm wall in the range of an unit impulse with steady pulsed motion.

Рассмотрим взаимодействие импульсной гидравлической струи с твердой стенкой в пределах единичного импульса при установившемся пульсирующем движении.

Пусть импульс струи площадью поперечного сечения  $w_0$ , движущийся с начальной скоростью  $v_0(H, t)$ , встречая на своем пути преграду, оказывает на последнюю гидродинамическое давление. Неподвижная поверхность в свою очередь действует на импульс с некоторой силой  $R(H, t)$ , направленной в общем случае под некоторым углом  $\beta$  (рис. 1) к оси импульсной струи.

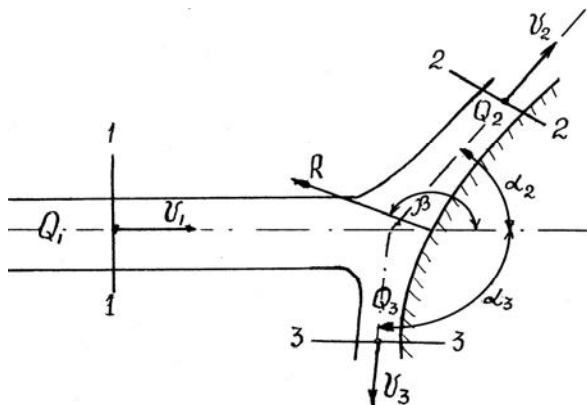


Рис. 1. Взаимодействие импульсной струи жидкости с твердой стенкой под некоторым углом  $\beta$

Как известно, реактивная сила  $R(H, t)$  равна по абсолютной величине силе активного давления импульса струи. Проекция реактивной силы на горизонтальную ось, совпадающей с осью струи, выразится зависимостью:

$$R_x(H, t) = \rho Q_1(H, t)v_1(H, t)\cos\alpha_1 - [\rho Q_2(H, t)v_2(H, t)\cos\alpha_2 + \rho Q_3(H, t)v_3(H, t)\cos\alpha_3] + G_x(H, t) \quad (1)$$

Проекция веса отсека на ось  $OX$  равна), т.е.  $G_x(H, t) = 0$ , а  $R_x(H, t) = R(H, t)\cos\beta$ ,  $\cos\alpha_1 = 1$  ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Тогда уравнение примет вид:

$$\rho Q_1(H, t)v_1(H, t) - [\rho Q_2(H, t)v_2(H, t)\cos\alpha_2 + \rho Q_3(H, t)v_3(H, t)\cos\alpha_3] = R(H, t)\cos\beta, \quad (2)$$

или, имея ввиду, что  $\rho Q(H, t) = m(H, t)$  – секундная масса:

$$m_1(H, t)v_1(H, t) - [m_2(H, t)v_2(H, t)\cos\alpha_2 + m_3(H, t)v_3(H, t)\cos\alpha_3] = R(H, t)\cos\beta, \quad (3)$$

где  $m_1(H, t)$ ;  $m_2(H, t)$ ;  $m_3(H, t)$  – секундные массы жидкости в граничных сечениях.

В уравнении (3) имеется три неизвестных  $m_3(H, t)$  [считаем, что  $m_2(H, t) = m_1(H, t) - m_3(H, t)$ ],  $R(H, t)$  и  $\beta$  и, следовательно, теоретического решения в общем случае нет.

Рассмотрим случай симметричного удара струи о преграду, когда  $\alpha_1 = \alpha_2$ , например, в случае удара о цилиндрическую поверхность, симметричную относительно оси струи. Направление реактивной силы  $R(H, t)$  в этом случае совпадает с осью импульсной струи.

Пусть имеется цилиндрическая поверхность (рис. 2). Элементарные струйки хотя и не параллельны между собой при оставлении поверхности, но, тем не менее, вследствие симметрии фигуры составляют с осью струи один и тот же угол  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ .

Скорости течения после удара импульса в точках выхода и массы струи равны между собой:

$$v_2(H, t) = v_3(H, t) = v_1(H, t) \\ \text{и } m_2(H, t) = m_3(H, t) = \frac{1}{2} m_1(H, t).$$

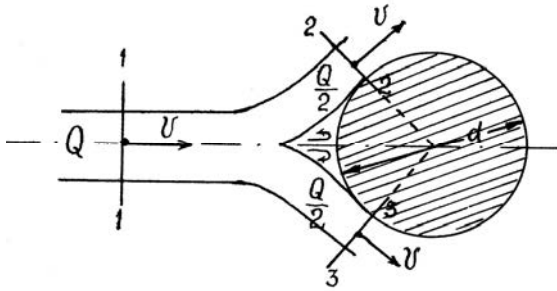


Рис. 2. Взаимодействие импульсной струи жидкости с цилиндрической поверхностью

Кроме того, предполагается, что ось импульсной струи направлена горизонтально, так что вес струи не оказывает влияния на величину давления на поверхность.

Будем считать, для простоты рассуждения, отсутствие вихрей на поверхности твердой преграды, позволяющей уравнивать скорости движения жидкости

$$v_2(H, t) = v_3(H, t) = v_1(H, t).$$

Реакция поверхности, направленная по оси симметрии ( $\beta = 180^\circ$ ), будет равна (на основании уравнения 3):

$$\begin{aligned} m_1(H, t)v_1(H, t) - \frac{1}{2}m_1(H, t)v_1(H, t)\cos \alpha - \\ - \frac{1}{2}m_1(H, t)v_1(H, t)\cos \alpha = \\ = R(H, t)\cos \beta \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$m_1(H, t)v_1(H, t) - m_1(H, t)v_1(H, t)\cos \alpha = -R(H, t), \quad (5)$$

$$\text{откуда } -R(H, t) = m_1(H, t)v_1(H, t)(1 - \cos \alpha). \quad (6)$$

Подставляя вместо  $m(H, t) = \rho Q(H, t)$

и  $v_1(H, t) = v_0(H, t)$ , получим:

$$-R(H, t) = \frac{\gamma}{g} Q(H, t)v_0(H, t)(1 - \cos \alpha) \quad (7)$$

или

$$-R(H, t) = \frac{\gamma}{g} w_0 v_0^2(H, t)(1 - \cos \alpha). \quad (8)$$

Сила удара единичного импульса (импульсной струи)  $P(H, t) = -R(H, t)$  о цилиндрическую поверхность:

$$P(H, t) = \frac{\gamma}{g} w_0 v_0^2(H, t)(1 - \cos \alpha), \quad (9)$$

где  $\alpha$  – угол направления струй, зависящий от диаметра поверхности.

Существует многообразие конструкций для создания импульсных струй. Все существующие устройства можно разделить на устройства, выталкивающие струю давлением, кумулятивные устройства, устройства распределительного типа (золотниковые и клапанные), гидроударные повысители давления.

Представляет собой интерес конструкция гидроимпульсатора распределительного типа с клапанным механизмом перекрытия [1]. Гидроимпульсатор состоит из цилиндрического корпуса с насадками, установленного в нем приводного вала и закрепленного на валу механизма для поочередного, в целях избежания возникновения гидравлического удара, перекрытия отверстий насадок. Приводной вал выполнен с кулачками, сдвинутыми по фазе на  $60^\circ$ , а механизм для поочередного перекрывания отверстий насадок выполнен охватывающим приводной вал с зазором и снабжен головками, каждая из которых установлена с возможностью входа в отверстие соответствующей насадки корпуса и соединена с соответствующим кулачком приводного вала.

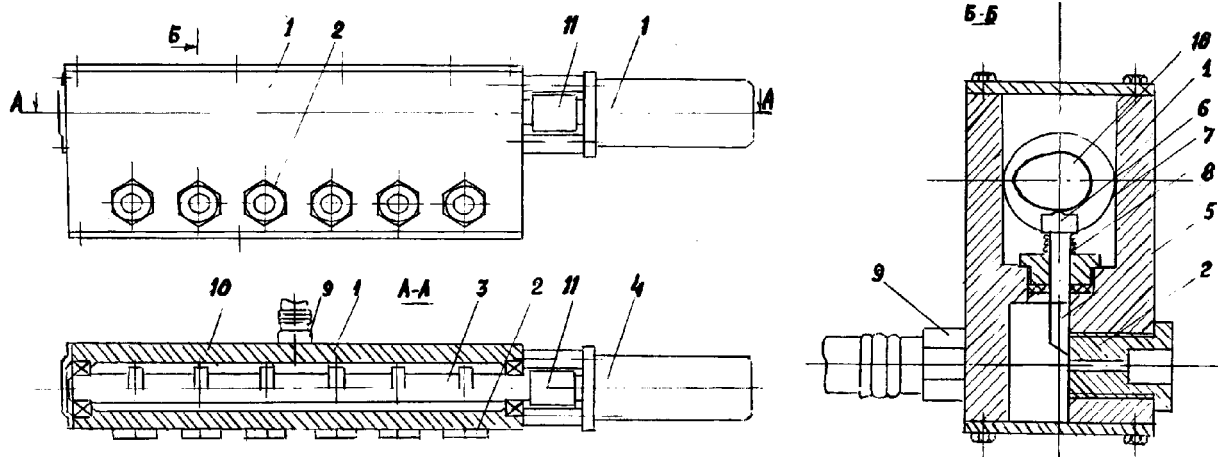


Рис. 3. Схема гидроимпульсатора

Недостаток данного гидроимпульсатора заключается в том, что в нем требуется довольно сложная регулировка перекрытия головками входных отверстий насадков корпуса. Причем, если будет неполное перекрытие головками отверстий насадков, то, как следствие, будет падать давление в насадках и ухудшаться динамические характеристики образующейся струи. Для нейтрализации перечисленных выше недостатков и повышения эффективности работы гидроимпульсатора нами разработано следующее устройство. На рисунке 3. изображена схема разработанного гидроимпульсатора.

Гидроимпульсатор содержит корпус 1 с патрубком 9 подачи жидкости и рядом выпускных насадок 2. В корпусе установлен приводной вал 3 с кулачками 10 и отсекателями 5 для перекрытия выпускных отверстий насадков 2. Вращение приводного вала 3 осуществляется от гидромотора 4 через соединительную муфту 11. Отсекатели 5 выполнены в виде пластин, каждая из которых соединена с торцовой поверхностью одной из выпускных насадок с боковой плоскостью, имеющей заостренную под углом  $45^\circ$  торцовую кромку.

Обращенные к кулачкам 10 концы отсекаателей 5 имеют круглое поперечное сечение, и на их торцах установлены посредством прижимных гаек 7 шарики 6. Отсекатели 5 подпружинены к кулачкам 10 пружинами 8.

Гидроимпульсатор работает следующим образом. Рабочая жидкость подается в корпус 1 через патрубок 9 и выходит в виде струи из отверстий насадков 2. При вращении вала 3 кулачки 10 набегают на шарики 6 и вызывают осевое смещение отсекаателей 5 в сторону выпускных насадок 2. Пластины отсекаателей 5 скользят вдоль торцовой поверхности насадок 2, перекрывая их выпускные отверстия. При этом выпуск жидкости из насадок 2 прекращается. При сбегаании кулачков 10 отсекаателя 5 под воздействием пружин 8 возвращается в первоначальное положение, открывая отверстия насадок, и выпуск жидкости продолжается. Затем цикл повторяется. Таким образом происходит формирование импульсных струй жидкости, выходящих из насадок 2 и направляемых на обрабатываемую поверхность.

Выполнение прилегающей торцовой поверхности насадков 2 боковой плоскости отсекаателей 5 с заостренной под углом  $45^\circ$  торцовой кромкой снижает возможную утечку жидкости и вихреобразования перед плоскостью входных отверстий и способствует формированию струй с высокими динамическими свойствами и повышает эффективность работы гидроимпульсатора.

Гидроимпульсатор создавал импульсную гидравлическую струю следующих характеристик. При на-

садке диаметром 2 мм максимальное давление перед насадком  $p_{\max}$  составило 20 МПа при частоте следования импульсов от 12 до 28 Гц и скважности пульсаций  $\xi$  от 1/2 до 2/3 в зависимости от частоты следования импульсов. При заданной частоте следования импульсов  $f$  и скважности  $\xi$  формирование импульсной струи происходило при максимальной величине давления перед насадком. Это значит, что происходило формирование импульсной струи с высокими динамическими характеристиками, что позволило повысить эффективность действия импульсной струи.

Таким образом, за счет гидроимпульсатора происходит повышение давления импульса в струе и формирование импульсных струй, обладающих высокими динамическими характеристиками. Это позволяет получить высокую эффективность использования гидроимпульсатора при включении его вместе с поршневым насосом для создания импульсных струй жидкости.

Для всех случаев истечения струи осциллограмма давления жидкости перед насадком сохраняет свою форму, которую с некоторым допущением можно принять за равнобедренный треугольник, а форму осциллограммы импульса силы давления – за прямоугольный. В последующем при рассмотрении исследуемого процесса будем пользоваться этим допущением. Таким образом, давление перед насадком изменяется от некоторого минимального значения до максимального, причем возрастание и снижение его идет по линейной функциональной зависимости (рис. 4).

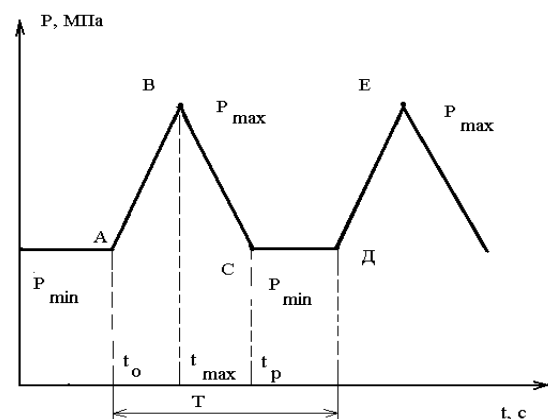


Рис. 4. Переменное давление в импульсаторе:  
 $p_{\min}$  – минимальное давление перед насадком;  
 $p_{\max}$  – максимальное давление перед насадком

Следовательно, можно записать систему уравнений, определяющих нарастание и убывание переменного давления в импульсе с изменением времени  $t$  (рис. 4):

$$\begin{cases} p_1 = p_{\min} + k_1 p_{\min} t \\ p_2 = p_{\max} - k_2 p_{\max} t \end{cases} \text{ при } \begin{cases} t_0 \leq t \leq t_{\max} \\ t_{\max} \leq t \leq t_p \end{cases}. \quad (10)$$

Отсюда, изменение начальной выходной скорости в импульсе будет происходить по следующей зависимости:

$$\begin{cases} v_{01}(H, t) = \varphi \frac{\sqrt{2g} \sqrt{p_{\min} + k_1 p_{\min} t}}{\sqrt{\gamma}} \\ v_{02}(H, t) = \varphi \frac{\sqrt{2g} \sqrt{p_{\max} - k_2 p_{\max} t}}{\sqrt{\gamma}} \end{cases} \text{ при } \begin{cases} t_0 \leq t \leq t_{\max} \\ t_{\max} \leq t \leq t_p \end{cases}. \quad (11)$$

Сила удара импульсной струи о криволинейную поверхность будет равна:

$$\begin{cases} P_1(H, t) = \rho w_0 \varphi^2 2g \frac{p_{\min} + k_1 p_{\min} t}{\gamma} \\ P_2(H, t) = \rho w_0 \varphi^2 2g \frac{p_{\max} - k_2 p_{\max} t}{\gamma} \end{cases} \text{ при } \begin{cases} t_0 \leq t \leq t_{\max} \\ t_{\max} \leq t \leq t_p \end{cases}. \quad (12)$$

или можно записать:

$$\begin{cases} P_1(H, t) = w_0 \varphi^2 2(p_{\min} + k_1 p_{\min} t) \\ P_2(H, t) = w_0 \varphi^2 2(p_{\max} - k_2 p_{\max} t) \end{cases} \text{ при } \begin{cases} t_0 \leq t \leq t_{\max} \\ t_{\max} \leq t \leq t_p \end{cases}. \quad (13)$$

Формула (13) является математическим выражением переменного давления гидравлической струи на криволинейную поверхность и в общем виде дает аналитическую зависимость динамики воздействия импульсной гидравлической струи на криволинейную поверхность.

Из формулы (13) определим значение максимальной силы удара импульсной гидравлической струи о криволинейную поверхность:

$$P_{\max} = w_0 2 \varphi^2 p_{\min} (1 + k_1 t_{\max}). \quad (14)$$

Полагая  $\alpha = 90^\circ$  (диаметр сечения единичного импульса значительно меньше диаметра поверхности и, следовательно, кривизной поверхности можно пренебречь) и коэффициент  $\varphi$  зависит от диаметра насадки, его формы и величины турбулентности распространения импульсной струи, получим:

$$P_{\max}(H, t) = \frac{\pi d_0^2}{4} 2 \varphi^2 p_{\min} (1 + 60,8 t_{\max}). \quad (15)$$

Численные значения максимальной силы удара, вычисленные по формуле (15) и полученные экспериментально, приведены в таблице.

Результаты укладываются в 5 %-ный интервал, который по отраслевым нормам определяется для схожимости теоретических и экспериментальных исследований.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

№ п/п	$d_0$ , мм	$t_{\max}$ , с	$P_{\max}(H)$	
			по формуле	по опыту
1	2	0,020	905,9	1070,0
2	3	0,026	601,6	633,7
3	4	0,026	368,2	675,2
4	5	0,023	110,9	111,1

Удовлетворительное согласование экспериментальных и теоретических результатов исследований позволяют формулу (15) использовать для практических расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

А.с. ПЗ1544 СССР, МКИ В 05В 1/08. Гидроимпульсатор / Г.Ф. Кислицина, В.А. Мальцев, А.Н. Григорьев (СССР). – № 568210/23-05; Заявлено 21.03.83; Опубл. 30.12.84, Бюл. К 48. – 2 с.