

Изобретение относится к области водоснабжения и водоотведения, может быть использовано в любой отрасли промышленности для восстановления пропускной способности трубопроводов.

Существуют способы очистки внутренней поверхности трубопроводов, заключающиеся в попеременной подаче в полость трубопровода жидкостного и газожидкостного потоков и формировании в газожидкостном потоке колебаний [1, 2].

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому эффекту к заявляемому способу является способ очистки внутренней поверхности трубопровода пневмовзрывом, включающий мгновенное воздействие сжатого воздуха на порцию жидкости в трубопроводе [3].

Однако все эти способы малоэффективны при наличии в трубопроводе препятствий на пути движения потока или при степени зарастания живого сечения более 80%, когда отложения являются фронтальными. Фронтальные отложения - это отложения, расположенные нормально к направлению потока, т.е. являющиеся препятствием продвижению потока по трубопроводу.

В основу изобретения поставлена задача создания способа очистки внутренней поверхности трубопровода от фронтальных отложений, в котором ударные волны действовали бы на отложения с большей разрушающей силой, обеспечивая разрушение фронтальных отложений и за счет этого восстанавливалась бы пропускная способность трубопроводов, полностью "заросших" отложениями.

Поставленная задача решается тем, что в способе очистки внутренней поверхности трубопровода, включающем мгновенное воздействие сжатого воздуха на порцию жидкости, согласно изобретению на фронтальные отложения в трубопроводе воздействуют порцией жидкости, сжатой вследствие действия в ней гидравлического удара, с силой

$$F_{уд} = \rho_0 S V_{уд}^2,$$

где ρ_0 - начальная плотность жидкости;

S - площадь живого сечения порции жидкости;

$V_{уд}$ - скорость движения порции жидкости в момент удара ее о препятствие.

Для реализации способа используют пневмопатрон со встроенным стволом [4], который заполняется жидкостью, находящейся в трубопроводе. На жидкость, находящуюся в стволе пневмопатрона, мгновенно прикладывается высокое давление сжатого воздуха, действующего на объем жидкости в стволе, подобно поршню. При этом в жидкости генерируется положительная волна сжатия, повышающая давление до ударного. Сжатая жидкость в стволе пневмопатрона вылетает из него в виде снаряда, разрушающего находящиеся на его пути препятствия (отложения). Таким образом, воздействуя на фронтальные отложения порцией жидкости, сжатой вследствие гидравлического удара, достигается требуемый технический результат. То есть, существенные признаки и достигаемый технический результат находятся в причинно-следственной связи.

Параметры сжатой жидкости, вылетающей из ствола пневмопатрона могут регулироваться путем изменения давления сжатого воздуха в ресивере пневмопатрона и, следовательно, путем изменения величины гидравлического удара.

Осуществление способа покажем на примере. Пневмопатрон имеет ствол, который при помещении его в жидкость, заполняется ею.

На чертеже показано схематическое изображение жидкости в стволе.

Воздух под большим давлением (P_k) находится в ресивере пневмопатрона и отделен от воды в стволе быстродействующим устройством. Давление воды в стволе P_0 , длина ствола l , площадь сечения S . На расстоянии $l_{уд}$ от ствола расположено препятствие отложения. В момент времени $t=0$ устройство срабатывает и на объем воды в стволе действует давление P_k . Под действием внезапно приложенного давления жидкость сжимается, начиная послойно двигаться. Конечная задача: определить силу динамического давления на преграду (отложения).

1. Разгон жидкой массы в стволе пневмопатрона.

Пусть масса жидкости в стволе $m = S l \rho_0$, где ρ_0 - начальная плотность жидкости. В момент времени $t=0$ при срабатывании быстродействующего устройства к объему жидкости в стволе прикладывается давление P_k со стороны ресивера пневмопатрона. При этом со стороны внешней среды к выходному сечению пневмопатрона приложено давление P_0 . Этот перепад давления действует до тех пор, пока ударная волна, движущаяся со скоростью c от ресивера не достигнет среза ствола (выходного сечения). Следовательно, до достижения ударной волной выходного сечения ствола на объем жидкости в стволе действует сила $F = S(P_k - P_0)$.

Пренебрегая силой трения жидкости о стенку ствола, определим скорость ее движения в стволе. Исходя из уравнения импульсов, имеем

$$m dv = F dt \text{ или} \\ \rho_0 S l dv = S(P_k - P_0) dt \quad (1)$$

При этом необходимо учесть, что изменение плотности за счет сжатия жидкости приводит только к изменению длины жидкого объема (заряда), а масса остается неизменной. Поэтому для m можно использовать начальное выражение ($m = \rho_0 S l$).

Решаем дифференциальное уравнение (1) с начальным условием;

$$\text{При } t = 0, v = 0 \\ \int_0^v dv = \int_0^t \frac{P_k - P_0}{\rho_0 l} dt; \\ v = \frac{P_k - P_0}{\rho_0 l} t \quad (2)$$

Выражение (2) дает значение скорости жидкого заряда в момент t . Оно справедливо для интервала времени, в течение которого ударная волна проходит от начального до конечного сечения ствола. Определим

скорость "жидкого заряда" в стволе в момент достижения ударной волной конечного (выходного) сечения ствола,

$$\text{При } t = t_k = \frac{1}{c} \quad (c - \text{ скорость распространения ударной волны}).$$

$$v_k = \frac{P_k - P_0}{\rho_0 l} \cdot \frac{l}{c} = \frac{P_k - P_0}{\rho_0 c}. \quad (3)$$

Таким образом, формула (3) совпадает с формулой Н.Е. Жуковского для прямого гидроудара.

2. Движение "жидкого заряда" в стволе.

При достижении ударной волной выходного сечения ствола жидкий заряд под действием той же силы продолжает свое движение, вылетая из ствола в сжатом состоянии, но теперь необходимо учесть и силу сопротивления давления со стороны окружающей среды

$$F_d = C_x S \rho_0 \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (4)$$

где C_x - коэффициент сопротивления давления для цилиндрического тела вдоль его оси, S - площадь сечения цилиндра, v - скорость его движения.

Тогда имеем дифференциальное уравнение

$$\rho_0 l S \frac{dv}{dt} = S(P_k - P_0) - C_x S \rho_0 \frac{v^2}{2} \quad (5)$$

Это уравнение решаем при $t = t_k$ и $v = v_k = \frac{P_k - P_0}{\rho_0 c}$.

Уравнение (5) справедливо, пока жидкий заряд еще находится в стволе под действием силы $S(P_k - P_0)$.

Для решения этого уравнения запишем (5) в следующем виде

$$\frac{dv}{dt} + av^2 = b \quad (6)$$

$$a = \frac{C_x \rho_0}{2 \rho_0 l} = \frac{C_x}{2l}; \quad b = \frac{P_k - P_0}{\rho_0 l}$$

где a и b - являются постоянными. Так как в стволе скорость движения "жидкого заряда" возрастает от сечения к сечению, считаем, что $v = f(x)$ расстояние от начального сечения ствола. Тогда

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} v.$$

Тогда имеем:

$$\frac{dv}{dx} v + av^2 = b; \quad \text{или} \quad \frac{dv}{dx} + av = \frac{b}{v} \quad (7)$$

Уравнение (7) решаем в виде

$$v(x) = c(x) \cdot u(x) \quad \text{где } c \text{ и } u - \text{ функции } x.$$

$$\text{Тогда } \frac{dv}{dx} = \frac{d}{dx} (U C) = \frac{dC}{dx} U + \frac{dU}{dx} C;$$

Из (7) следует:

$$u \frac{dC}{dx} + c \frac{dU}{dx} + au = \frac{b}{cu};$$

$$u \frac{dC}{dx} + c \left(\frac{dU}{dx} + au \right) = \frac{b}{cu}$$

Найдем такое $U = U(x)$, чтобы скобки в последнем выражении обращались в ноль. Тогда

$$\begin{cases} \frac{dU}{dx} + au = 0 \\ u \frac{dC}{dx} = \frac{b}{cu} \end{cases} \quad (8)$$

Решаем первое уравнение

$$\frac{dU}{dx} + au = 0;$$

$$\frac{dU}{U} = -a dx; \quad \ln U = -ax; \quad U = e^{-ax}$$

Подставляя найденное решение для U во второе уравнение системы (8), получим

$$e^{-ax} \frac{dC}{dx} = \frac{b}{c e^{-ax}}$$

$$\text{или } e^{-2ax} c \frac{dC}{dx} = b$$

$$\text{или } c dc = b e^{2ax} dx;$$

Интегрируя обе части последнего выражения, получим

$$\frac{c^2}{2} = \frac{b}{2a} e^{2ax} + \frac{C_1}{2} \text{ или } c^2 = \frac{b}{a} e^{2ax} + C_1;$$

откуда находим;

$$c = \sqrt{\frac{b}{a} e^{2ax} + C_1}; \text{ учитывая, что } v = cu,$$

$$v = cu = e^{-ax} \sqrt{\frac{b}{a} e^{2ax} + C_1} =$$

$$= \sqrt{\frac{b}{a} + C_1 e^{-2ax}} \quad (9)$$

Найдем из (9) постоянную C_1 при $X = 0$; $v = v_k$

$$v_k = \sqrt{\frac{b}{a} + C_1} \quad C_1 = v_k^2 - \frac{b}{a}.$$

Тогда из (9) имеем

$$v = \sqrt{\frac{b}{a} + \left(v_k^2 - \frac{b}{a}\right) e^{-2ax}} =$$

$$= \sqrt{\frac{b}{a} (1 - e^{-2ax}) + v_k^2}.$$

Используя значение b , a , v_k , получим:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_k - P_0)}{\rho_0 C_x} \left(1 - \frac{e^{C_x}}{1}\right) + \frac{(P_k - P_0)^2}{\rho_0^2 C^2}} \quad (10)$$

Найдем скорость, с которой "заряд" вылетает из ствола. Она получается из (10) при $X = l$

$$v_b = \sqrt{\frac{2(P_k - P_0)}{\rho_0 C_x} \left(1 - \frac{e^{C_x}}{1}\right) + \frac{(P_k - P_0)^2}{\rho_0^2 C^2}} \quad (11)$$

3. Полет "заряда" до препятствия.

После вылета "заряда" из ствола сила давления со стороны ресивера перестает действовать и остается

$$\text{только сила сопротивления, т.е.} \quad \rho_0 l S \frac{dv}{dt} = -C_x S \rho_0 \frac{v^2}{2}$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{C_x}{2l} v^2.$$

Удобно считать, что $v = f(x)$, т.е.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot v.$$

тогда

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{C_x}{2l} v \frac{dv}{v} = -\frac{C_x}{2l} dx.$$

Уравнение решаем при граничных условиях указанных граничных условиях C_2 :

$$\ln v_b = \frac{C_x}{2l} x + C_2; \quad C_2 = \ln v_b + \frac{C_x}{2l}.$$

$$\text{Тогда } \ln v = \frac{C_x}{2l} x + \ln v_b + \frac{C_x}{2l};$$

$$\ln v - \ln v_b = \frac{C_x}{2l} x + \frac{C_x}{2l}$$

$$v = v_b \cdot e^{-\frac{C_x}{2l}(x-1)} \quad (12)$$

Скорость при ударе "заряда" о препятствие определяется из (12) при $X = l_{уд}$

$$v_{уд} = v_b \cdot e^{-\frac{C_x}{2l}(l_{уд}-1)}$$

4. Сила динамического давления "заряда" на препятствие.

$$\Delta(mv) = \rho S l v_{уд} = F_{уд} \Delta t;$$

$$\Delta t = \frac{l}{v_{уд}}.$$

$$F_{уд} = \frac{\rho_0 S l v_{уд}}{\Delta t} = \rho_0 S v_{уд}^2.$$

$$x = l; v = v_b, \text{ тогда } \ln v = -\frac{C_x}{2l} x + C_2.$$

Найдем при

Определяем из уравнения импульсов:

Найдем $F_{уд}$ при следующих значениях:

$$P_k = 20 \text{ МПа} = 2 \cdot 10^7$$

$$P_0 = 0,1 \text{ МПа} = 1 \cdot 10^5$$

$$\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$l = 230 \text{ мм}$$

$$D = 36 \text{ мм}$$

$$\delta = 6 \text{ мм}$$

$$l_{уд} = 230 \text{ мм } C_x = 0,85$$

$$C = \frac{14125}{\sqrt{1 + 0,01 \cdot \frac{D}{\delta}}} = \frac{1425}{\sqrt{1 + 0,06}} =$$

$$= \frac{1425}{1,03} = 1384 \text{ м/с}$$

$$v_k = \frac{P_k - P_0}{\rho_0 c} = \frac{20 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 1,384 \cdot 10^3} =$$

$$= 14,4 \text{ м/с}$$

$$l_{уд} = 230 \text{ мм}$$

$$v_{уд} = \sqrt{\frac{2(P_k - P_0)}{\rho_0 C_x} (1 - e^{-\frac{C_x}{e} l_{уд}}) + v_k^2 e^{-\frac{2x}{e} l_{уд}}} =$$

$$= \sqrt{4,68 \cdot 10^4 (1 - e^{-0,85} + 207 \cdot e^{-0,85})} = \sqrt{4,68 \cdot 10^4 (1 - 0,427) + 207 \cdot 0,427} =$$

$$= 164 \text{ м/с}$$

$$F_{уд} = 1,02 \cdot 164^2 = 2,7 \text{ тн}$$

