

PIPELINE STRENGTH ANALYSIS UNDER HYDRAULIC HAMMER

Prof. U. Jonqobilov, DSc in Technical Sciences

<https://orcid.org/0000-0003-0871-0317>

Assistant Sh. Xushiye

<https://orcid.org/0009-0001-5198-8958>

Assoc. Prof. S. Jonqobilov, PhD in Technical Sciences

<https://orcid.org/0000-0002-0619-936X>

Assoc. Prof. U. Rajabov, PhD in Technical Sciences

rajabovulugbek767@gmail.com

Assistant B. Jonqobilov, PhD in Technical Sciences

<https://orcid.org/0009-0003-7523897X>

Head teacher Z. Ruzimurodov

ruzimurodovzair1@gmail.com

doctoral student Sh. Bahodirov

<https://orcid.org/0009-0000-6269-1220>

Karshi state technical university

Key words: Hydraulic shock, flow interruption, pressure increase, deformation, radial and elastic stress, elastic deformation, pipe wall thickness.

Annotation. The process of pipe deformation under the influence of increased pressure during a hydraulic hammer caused by a flow interruption, the stress state of a pipe with an outer and inner diameter under load, and the differential equations of motion for elastic deformations were determined. A mathematical model of a pressure system resistant to hydraulic hammer and parameters for determining the minimum pipe wall thickness, taking into account the deformation of the pipe material, were developed.

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

Ключевые слова: Гидроудар, повышение давления, деформация, радиальное и упругое напряжение, упругая деформация, толщина стенки трубы.

Аннотация. Определены процесс деформации трубы под воздействием повышения давления при гидравлическом ударе, вызванном прерыванием потока, напряженное состояние трубы с наружным и внутренним диаметром под нагрузкой, дифференциальные уравнения движения для упругих деформаций. Разработаны математическая модель напорной системы, устойчивых к гидравлическим ударам, и параметры для определения минимальной толщины стенки трубы с учетом деформации материала трубы.

Введение. Процесс гидроудара происходит в напорных трубопроводах насосной станции, вызывая повреждение напорных трубопроводов, обратных клапанов, здания насосной станции и насосных агрегатов [1-5]. Во время процессов переключения насосов, то есть в периоды пуска и останова, в напорных трубопроводах происходит скачок давления, связанный с гидроударом. При остановке двигателя частота вращения насоса, подача воды и напор уменьшаются, и через некоторое время поток меняет направление. В случаях, когда поток в трубопроводе прерывается, скачок давления еще больше [1-5].

При гидравлическом ударе, сопровождающемся разрывом сплошности потока, в фазе повышения давления образуются два скачка давления [2]. Рассмотрим процесс деформирования трубы, обусловленной действием мгновенных повышений давления по её внутренней границе. Пусть в момент времени $t=0$ давление мгновенно повышается на величину p_1 и остается постоянным до момента времени $t=t_1$, а в этот момент наступает второе повышение давления, которое остается постоянным до момента времени $t=t_1+t_2$, когда давление мгновенно снимается. Следует определить напряженное состояние трубы, имеющей наружный диаметр R и внутренний диаметр r_0 , под действием вышеприведенной нагрузки (рис.1) [1].

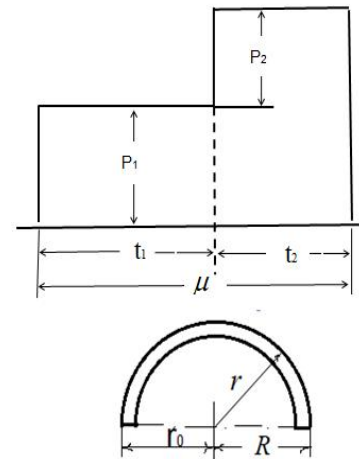


Рис.1.

В работе [1] решена задача для условий плоской деформации трубы, материал которой предполагается несжимаемым, при мгновенном приложении давления p , в дальнейшем остающегося постоянным. Поставленная нами задача отличается от задачи, приведенной в работе [1], кратковременностью и ступенчатостью действия приложенной нагрузки [2].

Методика исследования. Из условия несжимаемости материала трубы имеем [2-5]:

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} = 0, \quad (1)$$

где $u(r,t)$ - радиальное смещение точек трубы, r - расстояние точки от центра трубы.

Решение уравнения (1) будет

$$u(r,t) = \frac{c_1(t)}{r}. \quad (2)$$

Для малых пластических деформаций дифференциальное уравнение движения имеет вид:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где σ_r и σ_θ - соответственно радиальное и кольцевое напряжения, ρ_0 - плотность материала трубы.

Для упругих деформаций

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2A \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r} = -4A \frac{c_1(t)}{r^2} \quad (4)$$

и уравнение (3) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \rho_0 \frac{c_1''(t)}{r} + 4A \frac{c_1(t)}{r^3}, \quad (5)$$

где A - коэффициент Ляме.

Интегрируя (5) при граничном условии $\sigma_r(R, t) = 0$ получим:

$$\sigma_r = \rho_0 c_1''(t) \ln \frac{r}{R} - 2A \frac{R^2 - r^2}{R^2 r^2} c_1(t). \quad (6)$$

На внутренней поверхности трубы при $0 \leq t \leq t_1$, напряжение $\sigma_r(r_0, t) = -p_1$, поэтому

$$p_1 = \rho_0 c_1''(t) \ln \frac{R}{r_0} + 2A \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 r_0^2} c_1(t). \quad (7)$$

Из выражения (7) можно определить функцию $c(t)$, удовлетворяющую начальным условиям

$$c_1(0) = c_1''(0) = 0,$$

вытекающие из естественных начальных условий

$$u(r_0, 0) = \frac{\partial}{\partial t} [u(r_0, 0)] = 0$$

Решение уравнения (7) будет

$$c_1(t) = \frac{p_1 r_0^2 R^2}{2A(R^2 - r_0^2)} (1 - \cos \omega t), \quad (8)$$

где

$$\omega^2 = \frac{2A(R^2 - r_0^2)}{\rho_0 r_0^2 R^2 (\ln R - \ln r_0)}. \quad (9)$$

Из уравнений (4), (8) и (9) определяем напряжения σ_r и σ_θ :

$$\sigma_r = -\frac{r_0^2 R^2}{R^2 - r_0^2} p_1 \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{R^2} \right) + \frac{(R^2 - r_0^2) \ln \frac{R}{r}}{R^2 r_0^2 \ln \frac{R}{r_0}} - \frac{R^2 - r^2}{R^2 r^2} \cos \omega t, \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_0^2 R^2}{R^2 - r_0^2} p_1 \left(\frac{1}{r^2} + \frac{1}{R^2} \right) - \frac{(R^2 - r_0^2) \ln \frac{R}{r}}{R^2 r_0^2 \ln \frac{R}{r_0}} + \frac{R^2 - r^2}{R^2 r^2} \cos \omega t.$$

Пусть в момент времени $t=t_1$ давление мгновенно возрастает на величину p_2 и становится p_1+p_2 . Тогда для $t_1 < t < t_1+t_2$ на внутренней поверхности трубы радиальное напряжение будет $\sigma_r(r_0, t) = -p_1 - p_2$ и согласно уравнению (6), с учетом того, что $\sigma_r(R, t) = 0$, получим:

$$p_1 + p_2 = \rho_0 c_2''(t) \ln \frac{R}{r_0} + 2A \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 r_0^2} c_2(t). \quad (11)$$

Для получения начальных условий используем тот факт, что в моменты времени t_1-0 и t_1+0 , $c_1 = c_2$ и $c_1' = c_2'$ то есть:

$$c_2(t_1 + 0) = c_1(t_1 - 0) = \frac{r_0^2 R^2 p_1}{2A(R^2 - r_0^2)} (1 - \cos \omega t_1) \quad (12)$$

$$c_2'(t_1 + 0) = c_1'(t_1 - 0) = \frac{r_0^2 R^2 p_1 \omega}{2A(R^2 - r_0^2)} \sin \omega t_1$$

Решение уравнения (11) с учетом условий (12) представится в виде:

$$c_2(t) = \frac{r_0^2 R^2}{2A(R^2 - r_0^2)} [p_1(1 - \cos \omega t) + p_2(1 - \cos \omega(t - t_1))]. \quad (13)$$

Дифференцирую $c_2(t)$ два раза и подставляя значения $c_2(t)$ и $c_2''(t)$ вместо $c_1(t)$ и $c_1''(t)$ в уравнение (6) получим:

$$\sigma_r = -\frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}} [p_1 \cos \omega t + p_2 \cos \omega(t - t_1)] -$$

$$-\frac{R^2 - r^2}{R^2 - r_0^2} \frac{r_0^2}{r^2} [p_1(1 - \cos \omega t) + p_2(1 - \cos \omega(t - t_1))] \quad (14)$$

и с учетом уравнения (4)

$$\sigma_\theta = -\frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_0}} [p_1 \cos \omega t + p_2 \cos \omega(t - t_1)] +$$

$$+\frac{R^2 + r^2}{R^2 - r_0^2} \frac{r_0^2}{r^2} [p_1(1 - \cos \omega t) + p_2(1 - \cos \omega(t - t_1))] \quad (15)$$

Упругие колебания возможны при условии

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = \frac{4Ac_2(t)}{r^2} < 2\sigma_0, \quad (16)$$

где σ_0 - предел упругости.

Из выражения (16) следует, что пластическое состояние материала трубы начинается с внутренней поверхности трубы ($r=r_0$) в момент времени t^* , определяемый равенством:

$$\sin \omega(t_0 + t^*) = \frac{p_1 + p_2 + \sigma_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right)}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 p_2 \cos \omega t_1}}, \quad (17)$$

где

$$\sin \omega t_0 = \frac{p_1 + p_2 \cos \omega t_1}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 p_2 \cos \omega t_1}}. \quad (18)$$

Очевидно, что переход материала трубы в пластическое состояние возможен при $t^* \leq t_1 + t_2$.

Из выражений (17) и (18) следует, что время t^* зависит от продолжительности действия первого повышения давления - t_1 и от значений p_1 и p_2 .

Представляет интерес определение того значения t_1 , при котором t^* достигает минимума. Это дает возможность определить наиболее неблагоприятную нагрузку. Для этой цели правые части выражений (17) и (18) выразим через t_1 .

Нами были определены значения p_1 , p_2 и t_1 в зависимости от m и ε .

$$p_1 = \gamma H_{\text{ст}} + \gamma \frac{a}{g} g_0 - 2\varepsilon \gamma (H_{\text{ст}} + h_b),$$

$$p_2 = 2\gamma (H_{\text{ст}} + h_b), \quad t_1 = \frac{(m+1)(1-\varepsilon)}{m+1-\varepsilon} \mu.$$

С учетом этих зависимостей уравнения (17) и (18) преобразуются к виду:

$$\sin \omega(t_0 + t^*) = \frac{\frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{(m+1)^2 - \frac{t_1}{\mu}}{2(m+1 - \frac{t_1}{\mu})} + \frac{\sigma_0}{2\gamma(H_{\text{ст}} + h_b)} \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right)}{\sqrt{1 + \frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{2(m+1 - \frac{t_1}{\mu})} + \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{ст}} + h_b} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{m+1 - \frac{t_1}{\mu}} \cos \omega t_1}},$$

$$\sin \omega t_0 = \frac{\frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{2m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} + \cos \omega t_1}{\sqrt{1 + \frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{2m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} + \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{ст}} + h_b} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} \cos \omega t_1}}.$$

Эти выражения позволяют определить время

$$t^* = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{\frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{(m+1)^2 - \frac{t_1}{\mu}}{2m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} + \frac{\sigma_0}{2\gamma(H_{\text{ст}} + h_b)} \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2}\right)}{\sqrt{1 + \frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{2m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} + \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{ст}} + h_b} - \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} \cos \omega t_1}} -$$

$$- \arcsin \frac{\frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{2m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} + \cos \omega t_1}{\sqrt{1 + \frac{H_{\text{ст}}}{2(H_{\text{ст}} + h_b)} + \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{2m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} + \frac{H_{\text{ст}}}{H_{\text{ст}} + h_b} - \frac{m^2 - 1 + \frac{t_1}{\mu}}{m + 1 - \frac{t_1}{\mu}} \cos \omega t_1}}.$$

Построив график зависимости t^* от t_1/μ в пределах $0 < t_1 < 1$, определим значение $t_{\min}^*$.

Минимальную толщину стенки трубы можно определить из выражения (17), полагая $t^* = \mu$, т.е. считая, что пластическое состояние материала трубы достигается в конце фазы удара, когда давление мгновенно снимается [2].

$$\sin \omega(t_0 + \mu) = \frac{p_1 + p_2 + \sigma_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{R_{\min}^2}\right)}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1 p_2 \cos \omega t_1}}. \quad (19)$$

Учитывая тот факт, что при кратковременных нагрузках предел упругости стали можно принимать $2\sigma_0$ [1,2,6-9], то определенная нами по формуле (19) минимальная толщина стенки трубы будет иметь некоторый запас прочности.

Выше мы предполагали, что давление в трубе мгновенно возрастает и в промежутках времени t_1 и t_2 остается постоянным. При учете упругости среды, в которой происходит возрастание давления, очевидно, что оно не будет оставаться постоянными, а будет зависеть от смещения u , т.е. $p=p(u)$.

Пусть в момент времени $t=0$ объем трубы равен W_0 и давление мгновенно возрастает от 0 до p_0 , а в моменты $t>0$ в силу изменения объема трубы и сжимаемости среды, давление p , объем W [2].

Тогда можно написать, что

$$\frac{W - W_0}{W_0} = -\frac{p - p_0}{K},$$

где K - объемный модуль упругости среды.

Учитывая, что $W=\pi(r_0+u)^2l$, получим

$$\frac{2r_0u + u^2}{r_0^2} = -\frac{p - p_0}{K}.$$

Пренебрегая членом u^2 , как малой величиной, получим

$$p = p_0 - \frac{2uK}{r_0}. \quad (20)$$

Подставляя значение p из (20) в уравнение (6) и учитывая, что на внутренней поверхности трубы радиальное напряжение $\sigma_r = -p$, получим

$$p_0 - \frac{2uK}{r_0} = \rho_0 c''(t) \ln \frac{R}{r_0} + 2A \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 r_0^2} c(t).$$

Из этого выражения определяем функцию $c(t)$, удовлетворяющую условиям $c(0)=c'(0)=0$

$$c(t) = \frac{p_0}{2A \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 r_0^2} + \frac{2K}{r_0^2}} (1 - \cos \Omega t),$$

где

$$\Omega^2 = \frac{2A \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 r_0^2} + \frac{2K}{r_0^2}}{\rho_0 (\ln R - \ln r_0)}.$$

Не определяя напряжения σ_r и σ_θ , укажем лишь, что упругие колебания трубы возможны при условии (16), которое в этом случае представится в виде:

$$\frac{P_0}{r_0^2 \frac{R^2 - r_0^2}{R^2} + \frac{K}{A}} (1 - \cos \Omega t) < 2\sigma_0.$$

Отсюда следует, что материал трубы переходит в пластическое состояние с внутренней поверхности трубы в момент времени t^* , определяемый равенством [2,10-13]:

$$\sin^2 \frac{\Omega t^*}{2} = \frac{\sigma_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} + \frac{K}{A}\right)}{2p_0}. \quad (21)$$

Решение этой задачи при ступенчатой нагрузке можно выполнить аналогично предыдущему [2].

Заключение. В результате теоретических и экспериментальных исследований известно, что при кратковременных перерывах электроснабжения, из-за нарушения непрерывности потока при перерыве электроснабжения, в трубопроводе насосной станции может возникнуть давление, большее, чем характеристика насоса. Длительность этого давления меньше ударной фазы. Приведена методика расчета прочности трубопровода при динамической нагрузке. Прочность трубы определяется по минимальному времени, необходимому для перехода материала трубы в пластическое состояние под давлением. Минимальная толщина трубы определяется из выражения (21) [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Агабабян Е.Х. Напряжения в трубе при внезапном приложении нагрузке. Украинский математический журнал, т.5, №3, 1993.
2. Жонқобиллов У.У., Жонқобиллов С.У. К расчету вакуума при гидравлическом ударе с учетом растворенного газа. «Архитектура қурилиш дизайн» журналы (Махсус сон), Тошкент, 2019. -306-308 б.
3. Жонқобиллов У.У., Жонқобиллов С.У., Хўшиев Ш.П., Жонқобиллов Б.У. Максимально возможный напор в трубопроводе при прямом положительном гидравлическом ударе. “Iqlim o’zgarishi va suv resurslari gidrologiyasi” xalqaro-ilmiiy texnik anjumani materiallari to’plami, TAQU, Toshkent, 24-25 Noyabr 2023 yil, 162-169 bet.
4. Jonqobilov S.U. Nasos stansiyasini ishga tushirishda gidravlik zarba. Innovatsion texnologiyalar jurnali, 2025-yil 4(60)-son, Qarshi, -86-95 betlar. <https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2025-4.11>.
5. Jonqobilov S.U. Gidravlik zarbaga qarshi pnevmogidravlik so‘ndirgich. Innovatsion texnologiyalar jurnali, 2026-yil 1(61)-son, Qarshi, -47-56 betlar. <https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-1.06>.
6. A. Arifjanov, U Jonqobilov, S Jonqobilov, Sh Khushiyev, J Xusanova. The influence of hydraulic friction on the maximum pressure of water hammer. ICECAE 2020, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 614 (2020) 012092, IOP Publishing, doi:10.1088/1755-1315/614/1/012092.

7. Jonkobilov, S., Jonkobilov, B., Bahodirov, S., Ruzikulov, J., & Ulugmuradov, M. (2025, July). Water shock when starting pumps in automated pumping stations. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3256, No. 1, p. 020034). AIP Publishing LLC.
8. Jonkobilov, U., Rajabov, U., Jonkobilov, S., Xushiyev, S., & Bahodirov, S. (2025, July). Air chamber as hydraulic shock absorber. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3256, No. 1, p. 020033). AIP Publishing LLC.
9. Jonkobilov, U., Jonkobilov, B., Rajabov, U., Jonkobilov, S., & Ulugmuradov, M. (2025, June). Maximum increase in direct hydraulic shock pressure. In AIP Conference Proceedings (Vol. 3286, No. 1, p. 040032). AIP Publishing LLC.
10. Al-Khomairi A.M., Plastic water hammer damper, Aust. J. Civ. Eng. 8 (1) (2010) 73-81.
11. Arifjanov A.M., Jonkobilov U.U., Jonkobilov S.U., Bekjonov R.S. The Hydraulic Impact Wave Propagation Speyed Study in a Two-Phase Flow. International Journal for Innovative Engineering and Management Research Vol 09 Issue11, Nov 2020 ISSN 2456 – 5083 www.ijiemr.org Volume 09, Issue 11, Pages: 94-100.
12. Bertaglia G., Ioriatti , A. Valiani M., Dumbser M., Caleffi V., Numerical methods for hydraulic transients in visco-elastic pipes, J. Fluid Struct. 81(C) (2018) 230–254.
13. Besharat M., Tarinejad R., Aalami M.T., Ramos H. Study of a compressed air vessel for controlling the pressure surge in water networks: CFD and experimental analysis, Water Resour. Manag. 30 (8) (2016) 2687–2702.