

УДК 532.542

к.т.н. , доцент Гіжа О.О.,

gea8@ukr.net, ORCID : 0000-0003-4878-6850,

Київський національний університет будівництва і архітектури

DOI: 10.32347/2076-815x.2020.72.62-69

**ПРО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗРАХУНКУ НЕПРЯМОГО
ГІДРАВЛІЧНОГО УДАРУ У СИСТЕМАХ
МІСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Розглядаються особливості впливу зміни опору засувки під час її закриття на зменшення швидкості в трубопроводі при непрямому гідравлічному ударі. Вперше показано, що підвищення тиску змінюється з часом не за лінійним, а більш складним степеневим законом. Наводяться конкретні рекомендації щодо визначення підвищення тиску або часу закриття засувки.

Ключові слова: гідравлічний удар, зміна опору засувки за час її закриття, підвищення тиску, фаза удару, залежність опору засувки від часу її закриття.

Зростання міст та розвиток промисловості постійно вимагають вирішення проблеми подачі води та відведення стоків, що утворюються у процесі виробництва та життєдіяльності людей. Водопровідні мережі, та у деяких випадках водовідвідні колектори, що транспортують рідину, перекачують її за допомогою насосних станцій на задані відмітки.

Таким чином, напірні трубопроводи є важливою ланкою структури водогосподарства. Від надійної роботи цих лінійних ділянок залежить функціонування всієї міської інфраструктури.

Різка підвищення тиску в таких мережах вкрай негативне, оскільки може призвести до руйнування трубопроводу. Щоб забезпечити надійну роботу цих споруд, як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації, необхідно проведення відповідних розрахунків на можливість виникнення гідравлічного удару.

Гідравлічним ударом називають різку зміну тиску в трубопроводі (підвищення або зниження) при різкій зміні швидкості руху рідини внаслідок закриття арматури чи зупинки насосів. Зростання тиску при ударі може бути настільки великим, що це може призвести до розриву трубопроводу. Особливо небезпечний гідравлічний удар в магістральних водопровідних мережах, по яких транспортуються великі маси рідини.

В залежності від часу закриття запірною пристроєм t_3 і фази удару T гідравлічний удар може бути прямий або непрямий.

Фаза удару визначається

$$T = \frac{2l}{C_v} , \quad (1)$$

де l – довжина труби, C_v – швидкість поширення ударної хвилі.

$$C_v = \frac{C'_v}{\sqrt{1 + \frac{D}{\delta} \cdot \frac{E_{\text{рід}}}{E_{\text{тр}}}}}, \quad (2)$$

де D – діаметр труби, δ – товщина стінки труби;

C'_v – швидкість поширення звуку в рідині, $C'_v = 1425 \text{ м/с}$ для води;

$\frac{E_{\text{рід}}}{E_{\text{тр}}}$ – відношення модулів пружності рідини і матеріалу труби.

Якщо засувка закривається майже миттєво або час її закриття менший за фазу удару, тобто $t_3 < T$, то удар буде прямий.

Підвищення тиску у такому випадку визначається за формулою Жуковського

$$\Delta p = \rho V_0 C_v, \quad (3)$$

де V_0 – швидкість руху рідини в трубі до удару.

Якщо час закриття запірного пристрою $t_3 > T$, то виникає непрямий гідравлічний удар, сила якого менша, ніж прямого. При непрямому ударі спостерігається більш складна картина. При цьому підвищення тиску залежить від втраченої при закритті засувки швидкості $V_{\text{втр}} = V_0 - V$ та визначається за формулою

$$\Delta p = \rho C_v (V_0 - V)$$

або
$$\Delta p = \rho C_v V_0 \left(1 - \frac{V}{V_0}\right), \quad (4)$$

де V – швидкість після часткового закриття запірного пристрою.

В літературі наводяться рекомендації, які пропонують вважати, що при непрямому ударі втрачена швидкість $V_{\text{втр}} = V_0 - V$ змінюється за лінійним

законом, тобто пропорційно співвідношенню $\frac{T}{t_3}$. Тоді

$$\Delta p = \rho C_v V_0 \frac{T}{t_3}. \quad (5)$$

Але ця формула має свої недоліки, бо вона не враховує зміну швидкості від відносного відкриття запірного пристрою $\frac{a}{D}$, яке також залежить від часу її закриття.

Якщо припустити, що закриття засувки проходить рівномірно [1], то можна отримати залежність відносного відкриття a/D від величини $\frac{T}{t_s}$

$$a/D = 1 - \frac{T}{t_s}.$$

Від виду засувки та відносного відкриття залежить також її коефіцієнт опору ξ_s . В довідниковій літературі [2,4] наводяться таблиці та формули, за якими можна обчислити коефіцієнти опору запірних пристроїв ξ_s залежно від їх конструкції. Так, для засувок коефіцієнт опору залежить від ступеня відкриття a/D (рис.1) і описується рівнянням

$$\xi_s = \Gamma \cdot e^{-\Phi \left(\frac{a}{D}\right)}. \quad (6)$$

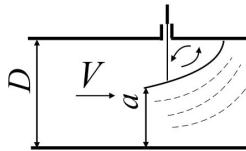


Рис.1. Схема протікання води через засувку при ступені відкриття a/D

Для поворотного затвору (рис. 2) коефіцієнт опору залежить від кута його повороту і визначається за формулою

$$\xi_s = Y \cdot e^{\Pi(\varphi)}. \quad (7)$$

Коефіцієнти Γ, Φ, Π, Y залежать від типу запірного пристрою і знаходяться за довідниками [2].

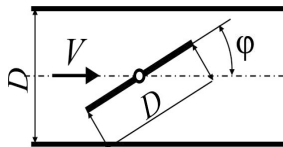


Рис. 2. Схема протікання води через поворотний затвор при куті повороту φ

Вважаючи, що закриття відбувається рівномірно, можна отримати формулу для коефіцієнтів опору запірних пристроїв в залежності від часу їх закриття [3]

$$\xi_3 = Y \cdot e^{\Phi\left(\frac{T}{t_3}\right)} \tag{8}$$

На рис. 3 показано графік залежності коефіцієнту опору засувки типу “Лудло” від відносного часу закриття $\frac{T}{t_3}$.

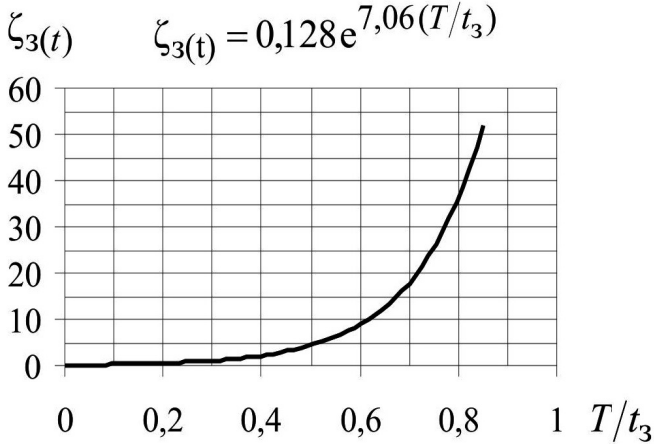


Рис. 3. Графік зміни опору засувки від відносного часу її закриття

Аналіз графіка показує, що при наближенні часу закриття t_3 до фази удару T різко збільшується опір засувки, що спричиняє суттєве підвищення тиску в трубі. Якщо не враховувати коливання тисків при ударі [3], то можна вважати, що величина $\frac{V}{V_0}$ залежить від відношення втрат напору в трубопроводі до удару та після нього. Тобто

$$\frac{V}{V_0} = \sqrt{\frac{S_0 Q^2 l + \sum \zeta_m B Q^2}{S_0 Q^2 l + \sum \zeta_m B Q^2 + \zeta_{s(t)} B Q^2}},$$

або після перетворень отримаємо

$$\frac{V}{V_0} = \sqrt{\frac{S_0 l + \sum \zeta_m B}{S_0 l + \sum \zeta_m B + \zeta_{s(t)} B}}, \tag{9}$$

де $S_0 Q^2 l$ – втрати напору по довжині труби;

$\sum \zeta_m B Q^2$ – сума місцевих втрат напору;

$\sum \zeta_m$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів (крім засувки);

$B = 8/g\pi^2 D^4$ – параметр, що враховує діаметр труби після засувки та іншого місцевого опору;

$\zeta_{3(t)}$ – коефіцієнт опору засувки (затвору) в залежності від часу закриття t_3 .

Для практичних розрахунків, коли задані витрата Q , діаметр труби D , товщина її стінки δ , час закриття засувки t_3 – послідовність розрахунків наступна. Визначають фазу удару $T(1)$, швидкість поширення ударної хвилі C_v (2), далі за формулою (8) знаходять коефіцієнт опору засувки $\zeta_{3(t)}$. Потім з рівняння (9) – V/V_0 , і з (4) розраховують підвищення тиску Δp при непрямуому гідравлічному ударі.

Приклад.

Розрахувати підвищення тиску в сталевому трубопроводі системи водопостачання діаметром $D = 200$ мм, товщиною стінки труби $\delta = 6$ мм, довжиною $l = 1000$ м, якщо витрата $Q = 55 \frac{\text{л}}{\text{с}}$, час закриття засувки $t_3 = 2$ с, коефіцієнт опору засувки $\zeta_{3(t)} = 0,148e^{7,9(T/t_3)}$.

Розв'язання.

Швидкість поширення ударної хвилі

$$C_v = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{D E_{\text{від}}}{\delta E_{\text{тр}}}}} = \frac{1425}{\sqrt{1 + \frac{200}{6} \cdot 0,01}} = 1234,2 \text{ м/с.}$$

Фаза удару $T = 2l/C_v = 2 \cdot 1000/1234,2 = 1,62$ с.

Швидкість руху води до удару $V_0 = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 0,055}{3,142 \cdot 0,2^2} = 1,75 \text{ м/с.}$

Відношення $\frac{E_{\text{від}}}{E_{\text{тр}}} = 0,01$ – для сталевих труб [1].

Коефіцієнт опору засувки в залежності від часу її закриття

$$\zeta_{3(t)} = 0,148 \cdot e^{7,9(1,62/2)} = 89,434.$$

Втрати напору по довжині $h_l = S_0 Q^2 l = 6,96 \cdot 0,055^2 \cdot 1000 = 21,054$ м,

де $S_0 = 6,96 \frac{\text{с}^2}{\text{м}^5}$ – питомий опір труби за [1].

Параметр $B = 8/g\pi^2 D^4 = 8/(9,81 \cdot 3,142^2 \cdot 0,2^4) = 51,69 \text{ с}^2/\text{м}^5$.

$$\frac{V}{V_0} = \sqrt{\frac{S_0 Q^2 l}{S_0 Q^2 l + B \zeta_{3(e)} Q^2}} = \sqrt{\frac{21,054}{21,054 + 51,69 \cdot 89,434 \cdot 0,055^2}} = 0,775.$$

Визначаємо підвищення тиску при непрямому ударі

$$\Delta p = \rho C_v V_0 \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) = 1000 \cdot 1234,2 \cdot 1,75 (1 - 0,775) = 485966,2 \text{ Па} = 485,97 \text{ кПа}$$

Для порівняння при прямому ударі при ($t_3 < T$) підвищення тиску буде

$$\Delta p = \rho C_v V_0 = 1000 \cdot 1234,2 \cdot 1,75 = 2159850 \text{ Па} = 2159,85 \text{ кПа}.$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Константінов Ю.М., Гіжа О.О. Технічна механіка рідини і газу. К.: Вища школа, 2002. - 278 с.
2. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.- 672 с.
3. Константінов Ю.М., Гіжа О.О. Особливості розрахунків непрямого гідравлічного удару. //Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. - К: КНУБА, 2014.– № 23 –С.162-168.
4. Справочник по гидравлике / В.А. Большаков, Ю.М. Константинов, В.Н. Попов и др. – 2-е изд. – К.: Вища школа, 1984,–279 с.
5. Graf W.H. Hydraulique fluviale: écoulement non permanent et phénomènes de transport, Tom 2, Traité de Génie Civil, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Presse polytechnique et universitaire romane, 1996. 259p.
6. Violet P .L., Chabard J.P. Mécanique des fluides appliquée, Presses des ponts et chaussées, ed. 1998 . – 177 p.
7. Yager W.H. Wastewater hydraulics theory and practice, Springer, ed. 1999.
8. Combes G., Zaoui J. Analyse des erreurs introduites par l' utilisation pratique de la méthode des caractéristiques dans le calcul des coups de belier // La Houille Blanche. – 1967.- № 2. – P. 195200.
9. Hydraulique générale. Armando Lencastre . Université nouvelle – Lisbonne – Portugal. 1995. Edition Eyrolles, 61, bld. S.- Germain 75240 Paris Cedex 05.
10. Heinrich Rodel. Hydro-mechanik. – 8., Uberarb. Aufl. – Munchen, Wien: Hanser, 1978, 163 p.
11. Burnett R. R. Controlling transient surges when 5000 HP turbine drops off // Pipe Line Industry. – 1960.- Vol. 12. - № 5.- P.35-40.

к.т.н., доцент Гижа Е.А.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА НЕПРЯМОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В СИСТЕМАХ ГОРОДСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Резкое повышение давления при гидравлическом ударе может привести к разрушению трубопровода. Особенно это опасно в магистральных водопроводных сетях, где транспортируется большое количество жидкости. При непрямом гидравлическом ударе повышение давления зависит от так называемой потерянной при закрытии задвижки скорости.

Существующие рекомендации не учитывают изменение скорости в зависимости от относительного открытия запорного устройства, которое в свою очередь также зависит от времени его закрытия.

В работе рассматриваются особенности влияния изменения сопротивления задвижки во время ее закрытия на уменьшение скорости в трубопроводе при непрямом ударе. Впервые показано, что повышение давления изменяется в зависимости от времени закрытия не по линейному, а более сложному степенному закону.

Приводится конкретный пример расчета повышения давления при непрямом гидравлическом ударе при заданных гидравлических характеристиках потока, таких как расход, материал, диаметр и толщина стенки трубы, а также время закрытия задвижки.

Ключевые слова: гидравлический удар, изменение сопротивления задвижки за время её закрытия, повышение давления, фаза удара, зависимость сопротивления задвижки от времени закрытия.

Ph.D., associate Professor Gizha O.O.,
Kyiv National University of Construction and Architecture

ON IMPROVING ACCURACY OF CALCULATION OF INDIRECT HYDRAULIC IMPACT IN MUNICIPAL WATER SUPPLY SYSTEMS

A sharp increase in pressure during water hammer can lead to destruction of the pipeline. This is especially dangerous in the main water supply networks, where a large amount of liquid is transported. With indirect hydraulic shock, the increase in pressure depends on the so-called lost speed when closing the valve.

Existing recommendations do not take into account the change in speed depending on the relative opening of the locking device, which in turn also depends on the time it was closed.

The paper discusses the features of the effect of changes in the valve resistance during its closure on the decrease in speed in the pipeline during indirect impact. It has been shown for the first time that the increase in pressure varies depending on the closing time not according to a linear, but to a more complex power law.

A specific example of calculating the increase in pressure during indirect hydraulic shock with given hydraulic flow characteristics, such as flow rate, material, diameter and wall thickness of the pipe, and also the valve closing time is given.

Key words: hydraulic impact, change in the resistance of the shutter during its closing, increase in pressure, impact phase, the dependence of the shutter resistance on the closing time.

REFERENCES

1. Konstantinov YU.M., Hizha O.O. Tekhnichna mekhanika ridyny i hazu. K.: Vyscha shkola, 2002. - 278 s. (in Ukrainian)
2. Idel'chik I.Ye. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam. M.: Mashinostroyeniye, 1992.- 672 s. (in Russian)
3. Konstantinov YU.M., Hizha O.O. Osoblyvosti rozrakhunkiv nepryamoho hidravlichnoho udaru. //Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta hidravliky. - K: KNUBA, 2014. – № 23. –S.162-168 (in Ukrainian)
4. Spravochnik po gidravlike / V.A.Bol'shakov, YU.M.Konstantinov, V.N.Popov i dr.– 2-ye izd. – K.: Vishcha shkola, 1984, –279 s (in Russian)
5. Graf W.H. Hydraulique fluviale: écoulement non permanent et phénomènes de transport, Tom 2, Traité de Génie Civil, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Presse polytechnique et universitaire romane, 1996. – 259 p.
6. Violet P.L., Chabard J.P. Mécanique des fluides appliqué, Presses des ponts et chaussées, ed. 1998. – 177 p.
7. Yager W.H. Wastewater hydraulics theory and practice, Springer, ed. 1999.
8. Combes G., Zaoui J. Analyse des erreurs introduites par l' utilisation pratique de la méthode des caractéristiques dans le calcul des coups de belier // La Houille Blanche. – 1967.- № 2. – P. 195200.
9. Hydraulique générale. Armando Lencastre . Université nouvelle – Lisbonne – Portugal. 1995. Edition Eyrolles, 61, bld. S.- Germain 75240 Paris Cedex 05.
10. Heinrich Rodel. Hydro-mechanik. – 8., Uberarb. Aufl. – Munchen, Wien: Hanser, 1978, 163 p.
11. Burnett R. R. Controlling transient surges when 5000 HP turbine drops off // Pipe Line Industry. – 1960.- Vol. 12. - № 5.- P. 35-40.