

Ю.М. КОНСТАНТИНОВ, кандидат технічних наук

О.О. ГІЖА, кандидат технічних наук

Київський національний університет будівництва і архітектури

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ НЕПРЯМОГО ГІДРАВЛІЧНОГО УДАРУ

*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; зменшення швидкості; підвищення тиску.

*Рассматриваются особенности влияния изменения сопротивления задвижки во время ее закрытия на уменьшение скорости в трубопроводе при непрямом гидравлическом ударе. Впервые показано, что повышение давления изменяется в зависимости от времени не по линейному, а более сложному степенному закону. Приводятся конкретные рекомендации для определения повышения давления или времени закрытия задвижки.*

**Ключевые слова:** гидравлический удар; изменение сопротивления задвижки за время её закрытия; уменьшение скорости; повышение давления.

*The features of the influence of the change in resistance valve during its closing to velocity decrease in pipeline with indirect hydraulic shock. It was shown that increasing pressure varies depending on time is not linear and the more complex power law. Provides specific recommendations for the determination of pressure increase or closing time of the valve.*

**Keywords:** hydraulic shock; resistance change the valve during its closing; velocity decrease; pressure increase.

При розрахунках непрямого гідравлічного удару залишається ще багато невизначеного. При прямому ударі засувка закривається майже миттєво, або її час закриття  $t_3$  менший, ніж фаза удару  $T$ , яка дорівнює:

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

Тут  $l$  – довжина трубопроводу;  $C_v$  – швидкість ударної хвилі, що визначається за формулою:

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

де  $E_p$  і  $E_{\text{тр}}$  – відповідно модулі пружності рідини і матеріалу труби;  $D$  – діаметр труби;  $\delta$  – товщина стінки труби.

Підвищення тиску при прямому ударі визначають за відомою формулою:

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

де  $V_0$  – швидкість руху рідини в трубі до удару.

При непрямому ударі час закриття засувки більше фази удару ( $t_3 > T$ ), і тиск підвищується не від втрати всієї швидкості руху рідини до удару  $V_0$ , а тільки за рахунок втраченої швидкості  $V_{\text{втр}} = V_0 - V$  (рис.1), тобто

$$\Delta p = \rho C_v (V_0 - V), \quad (4)$$

де  $V$  – швидкість руху рідини в трубі після удару.

В гідравлічній літературі [3,4] існують рекомендації, які пропонують вважати, що при непрямому ударі втрачена швидкість  $V_{\text{втр}}$  змінюється за лінійним законом, тобто пропорційно відношенню фази удару  $T$  до часу закриття засувки  $t_3$ . Тому

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

Але ця формула не враховує особливості залежності швидкості  $V$  від відносного відкриття засувки  $a/D$ , яке, в свою чергу, залежить від часу її відкриття  $t_3$ . Приймаючи, що закриття засувки відбувається рівномірно [1], отримаємо залежність відносного її відкриття  $n = a/D$  від відношення фази удару  $T$  до часу її закриття  $t_3$ , тобто  $T/t_3$  (рис.2)

$$n = \frac{a}{D} = 1 - \frac{T}{t_3}. \quad (6)$$

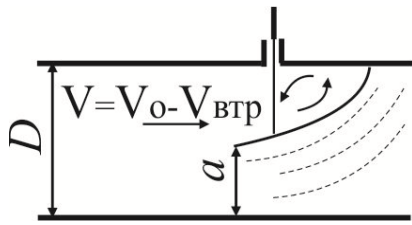


Рис.1. Схема непрямого гідравлічного удару

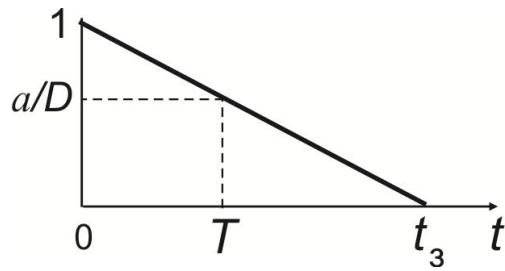


Рис.2. Залежність відносного відкриття засувки  $a/D$  від часу її закриття  $t_3$

Від типу і відносного відкриття засувки  $n = a/D$  залежить також коефіцієнт її опору  $\zeta_3$ , який можна знаходити за даними [2] або за формулою

$$\zeta_3 = \frac{\Gamma}{e^{\Phi n}}, \quad (7)$$

де параметри  $\Gamma$  і  $\Phi$  залежать від конструктивних особливостей засувки.

Наприклад, при  $\Gamma = 130$  і  $\Phi = 6,88$  залежність  $\zeta_3 = f(a/D)$  показана на рис. 3.

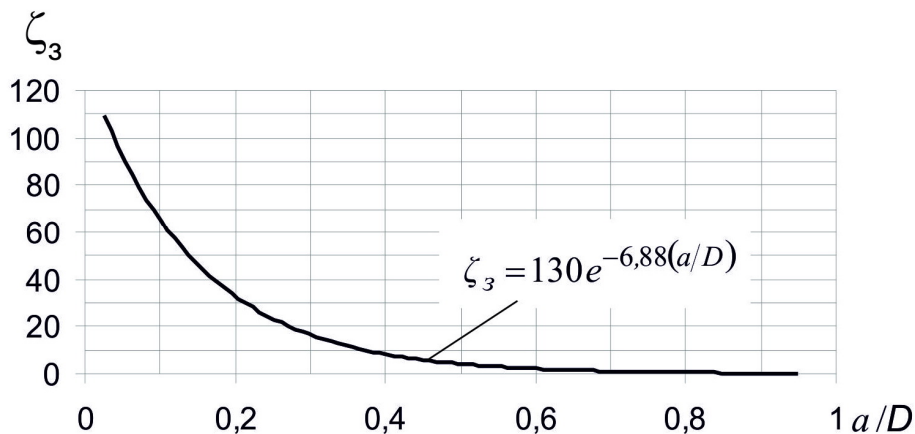


Рис.3. Залежність  $\zeta_3 = f(a/D)$  при  $\Gamma = 130$ ,  $\Phi = 6,88$

Враховуючи (6), отримаємо залежність коефіцієнта опору засувки  $\zeta_3$  від відношення  $T/t_3$  (рис.4), тобто фактично від часу її закриття  $t_3$

$$\zeta_3 = Y e^{\left(\frac{\Phi T}{t_3}\right)}, \quad (8)$$

де  $Y = \Gamma/e^\Phi$  – параметр, що залежить від особливостей засувки, при  $\Gamma = 130$  і  $\Phi = 6,88$  значення  $Y = 0,134$ . Доцільно відмітити, що при відкритій засувці ( $t_3 \gg T$ ) коефіцієнт її опору  $\zeta_3 \approx Y$ .

Звідси бачимо, що при відносно малому відкритті засувки  $n = a/D$ , або при зменшенні часу її відкриття  $t_3$  (зростанні відношення  $T/t_3$ ) коефіцієнт її опору  $\zeta_3$  значно збільшується. Подібні графіки для  $\zeta_3$  можна отримати і для інших типів засувок, або затворів при різних їх параметрах  $\Gamma$ ,  $Y$  і  $\Phi$ .

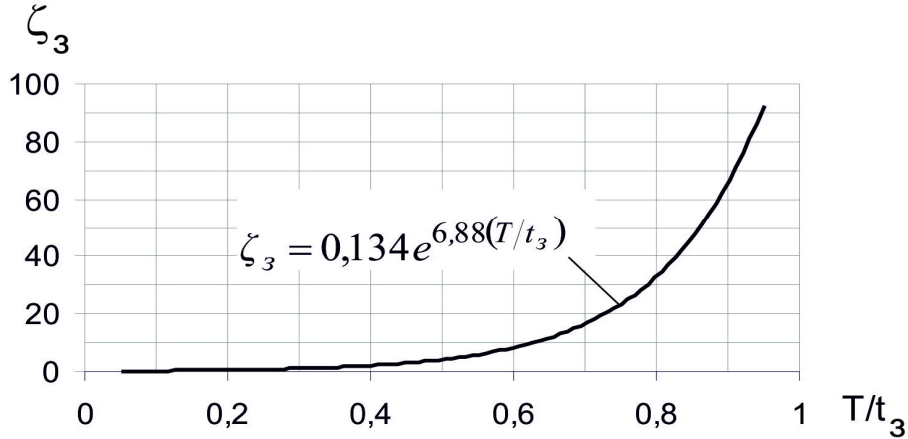


Рис. 4. Графік залежності  $\zeta_3 = f(T/t_3)$  для засувки при  $Y = 0,134$ ,  $\Phi = 6,88$

Аналогічно для поворотних запірних пристроїв [2] визначаються залежності  $\zeta_3$  від кута повороту  $\varphi$  (рис. 5).

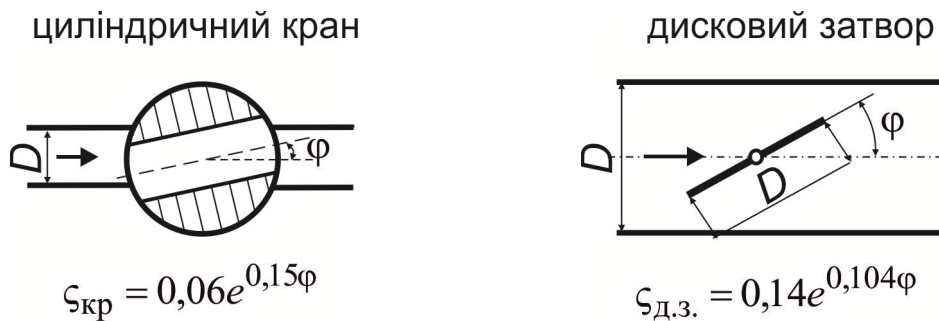


Рис.5. Схеми поворотних пристроїв

Як і в попередньому випадку, вважаємо, що поворот затвору в межах  $\varphi = 0^\circ \dots 90^\circ$  здійснюється рівномірно, тобто  $\varphi/90^\circ = T/t_3$ . Тоді після перерахунку формул, що показані на рис.5 у форматі  $\zeta = f(\varphi/90^\circ)$ , отримаємо

$$\zeta_{кр(д.з)} = f(T/t_3). \quad (9)$$

Ця залежність перетворюється у формулу (8), зі значеннями  $Y$  і  $\Phi$  для вказаних типів затворів (рис.6). Узагальнюючі це положення, необхідно відзначити, що для будь-якого затвора (засувки), при відомих залежностях коефіцієнта опору  $\zeta$  від відносного відкриття  $a/D$  або кута повороту  $\varphi$  [2], можна отримати параметри  $Y$  і  $\Phi$ .

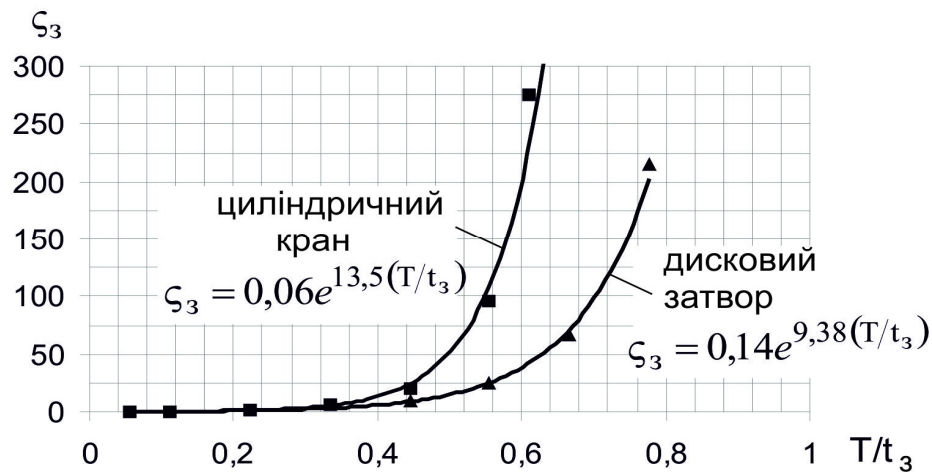


Рис.6. Залежності  $\zeta_3 = f(T/t_3)$  для поворотних затворних влаштувань

В трубопроводі існують також опори по довжині та інші місцеві опори, що визначаються такими узагальненими даними:

- коефіцієнт опору трубопроводу при відкритій засувці:

$$\zeta_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{D} + \sum \zeta; \quad (10)$$

- коефіцієнт опору трубопроводу при засувці, що відкрита частково:

$$\zeta'_{\text{тр}} = \lambda' \frac{l}{D} + \sum \zeta, \quad (11)$$

де  $l$  – довжина трубопроводу;  $\sum \zeta$  – сума всіх коефіцієнтів місцевих опорів (крім засувки);  $\lambda$ ,  $\lambda'$  – гідравлічні коефіцієнти тертя при повністю або частково відкритій засувці, що залежать від числа  $Re = VD/\nu$  (тобто від швидкостей  $V_0$  і  $V$  для конкретних діаметра труби  $D$  і кінематичної в'язкості  $\nu$ ). Для стандартних труб засоби визначення  $\lambda = f(Re)$  наведені в [5]. Якщо в обох випадках течія в трубі відповідає квадратичній області опору, то  $\lambda' = \lambda$ .

Якщо на початку трубопроводу встановлюється напір  $H$ , то при повністю відкритій засувці:

$$H = \Delta z + \zeta_{\text{тр}} \frac{V_0^2}{2g}, \quad (12)$$

а при частковому її відкритті:

$$H = \Delta z + (\zeta'_{\text{тр}} + \zeta_3) \frac{V^2}{2g_3}, \quad (13)$$

де  $\Delta z$  – різниця геодезичних відміток біля засувки і на початку трубопроводу.

Рівняння (4) представимо у вигляді

$$\Delta p = \rho C_v V_0 (1 - k_v), \quad (14)$$

де  $k_v = V/V_0$  – коефіцієнт зменшення швидкості при непрямому ударі.

Спрощено, не враховуючи коливання тисків при ударі [6], і дорівнюючи вирази (12) і (13), отримаємо

$$k_v = \frac{V}{V_0} = \sqrt{\frac{\zeta_{\text{тр}}}{\zeta'_{\text{тр}} + \zeta_3}}. \quad (15)$$

Звідси бачимо, що відношення  $V/V_0$  залежить від  $\zeta_{\text{тр}}$ ,  $\zeta'_{\text{тр}}$ ,  $\zeta_3$ . В свою чергу  $\zeta'_{\text{тр}}$  також є функцією від  $V$ , а  $\zeta_3$  залежить від часу закриття засувки (затвору)  $t_3$ . З цього маємо, що залежність  $V/V_0 = f(T/t_3)$  змінюється не за лінійним законом, а за більш складним степеневим. На неї впливають втрати напору в трубопроводі при відкритій і частково закритій засувці. Вона враховує також час закриття засувки. Як приклад, відношення  $V/V_0$  для засувки з коефіцієнтами опору  $\zeta_3$  (8) при параметрах  $Y = 0,134$  і  $\Phi = 6,88$  і коефіцієнтами опору трубопроводу в межах  $\zeta_{\text{тр}} = 5 \dots 100$  наведено на рис.7.

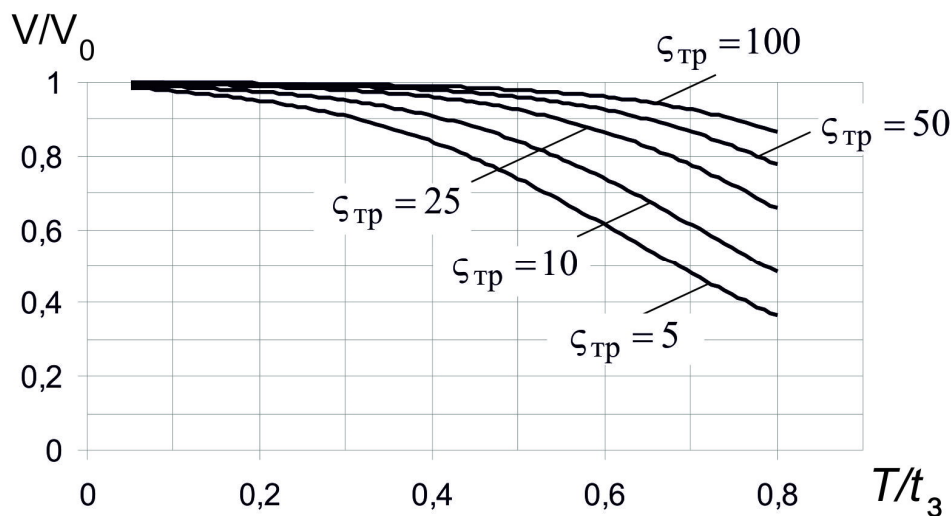


Рис.7. Залежності  $V/V_0 = f(T/t_3, \zeta_{\text{тр}})$  при різних коефіцієнтах опору трубопроводу і коефіцієнті опору засувки  $\zeta_3$  з параметрами  $Y = 0,134$ ,  $\Phi = 6,88$ .

З графіків бачимо, що при великих коефіцієнтах  $\zeta_{\text{тр}}$  (тобто при відносно великих втратах напору в трубопроводі) відношення  $V/V_0$  суттєво зменшується тільки при  $T/t_3 \geq 0,6$ , коли підвищення тиску при ударі є значним. Це було відзначено також в роботі [6]. В той же час, при відносно

малих  $\zeta_{\text{тр}}$ , опір засувки  $\zeta_3$  істотно зменшує швидкість після удару  $V$  у порівнянні із початковою  $V_0$  у більш широкому діапазоні зміни  $T/t_3$ .

Отримані залежності дозволяють більш обґрунтовано розв'язувати задачі стосовно гідравлічного удару. Наприклад, якщо при відомому допустимому підвищенні тиску в трубі  $\Delta p$  необхідно визначити мінімально допустимий час закриття засувки  $t_3$ , то з (4) знаходимо швидкість після удару  $V$  і відповідний коефіцієнт  $\lambda'$  [5]. Далі з (15) визначаємо коефіцієнт опору засувки  $\zeta_3 = \zeta_{\text{тр}} \left( \frac{1}{k_v^2} - \frac{\zeta'_{\text{тр}}}{\zeta_{\text{тр}}} \right)$ . Підставляючи це значення у (8), після деяких перетворень підраховуємо допустимий мінімальний час закриття засувки

$$t_3 = \frac{T\Phi}{\ln\left(\frac{\zeta_3}{Y}\right)}. \quad (16)$$

Якщо необхідно визначити підвищення тиску  $\Delta p$  при відомому часі закриття засувки  $t_3$ , то попередньо визначаємо значення гідравлічного коефіцієнта тертя [5]  $\lambda = f(V_0)$ , з (10) – коефіцієнт опору трубопроводу  $\zeta_{\text{тр}}$ , з (8) – коефіцієнт опору засувки  $\zeta_3$  і з (15) - відношення  $k_v = V/V_0$ . Потім уточнюємо значення  $\lambda' = f(V)$ ,  $\zeta'_{\text{тр}}$ ,  $k_v$  і далі з (14) отримуємо підвищення тиску  $\Delta p = \rho C_v V_0 (1 - k_v)$ .

#### Список літератури

1. *Константинов 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. *Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П.* Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 412 с.
4. *Смыслов В.В.* Гидравлика и аэродинамика. – К. Вища школа, 1979. – 336 с.
5. *Константинов Ю.М., Гіжа О.О.* Особливості втрат напору в перехідній і квадратичній областях опору.//Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К: КНУБА, 2013. – № 22. – С.140-148.
6. *Курганов А.М., Федоров Н.Ф.* Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник. – Л.: Стройиздат, 1986. – 440 с.

Надійшло до редакції 23.02.2014