

УДК 622.691.4

Братах М.І., Рузіна І.М., Сіроус В.С., Криволапчук І.П.

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ УМОВ ВИНИКНЕННЯ ГІДРОУДАРУ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Гідравлічним ударом називається різка зміна тиску в напірному трубопроводі внаслідок раптової зміни швидкості рідини в часі.

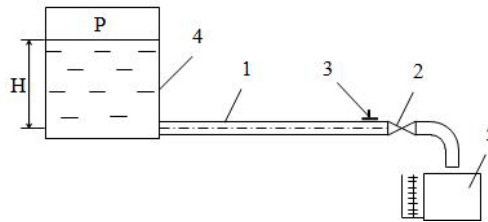


Рисунок 1 – Дослідження гідравлічного удару: 1 – довга труба, 2 – запірний пристрій, 3 – датчик тиску, 4 – резервуар, 5 – мірна ємність

На рис. 1 представлений стенд для дослідження параметрів гідравлічного удару. При гідравлічному ударі відбувається різке підвищення тиску в трубі. Кінетична енергія шарів рідини, що зупинились в трубі, перетворюється в потенціальну енергію стиснутої рідини. В першу чергу тиск збільшується безпосередньо біля запірного пристрою після зупинки перших шарів рідини. Потім, по мірі зупинки наступних шарів, збільшення тиску буде швидко розповсюджуватись вгору по трубопроводу, утворюючи хвилю підвищення тиску. Підвищення тиску, розповсюджуючись по трубопроводу з великою швидкістю, викликає стиск рідини і розширення стінок труби. Вказана пружна деформація рідини і труби відбувається зі швидкістю розповсюдження тиску по довжині труби. Швидкість розповсюдження пружних деформацій називається швидкістю розповсюдження ударної хвилі. Після того як зупиниться останній шар рідини в резервуарі, з котрого починається трубопровід, тиск біля запірного пристрою досягне свого максимуму. Характер підвищення тиску біля запірного пристрою показаний на схематичній „ударній діаграмі” (рис. 2), із розгляду котрої витікає, що підвищення тиску біля засувки відбувається не на самому початку удару, а через деякий дуже малий проміжок часу від початку підвищення тиску. Це пояснюється тим, що явище удару відбувається в пружному середовищі.

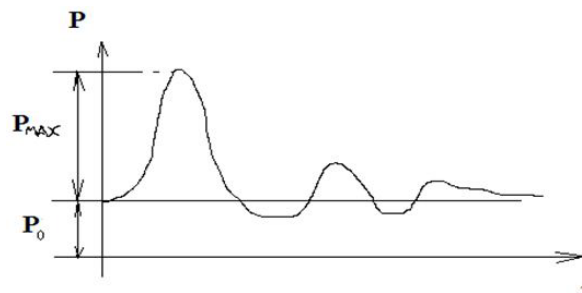


Рисунок 2 – Діаграма зміни тиску – «ударна діаграма»

Таким чином, після зупинки останнього шару вся рідина в трубопроводі буде стиснута. Але, так як в цей момент тиск в резервуарі буде меншим, ніж тиск в трубопроводі, то рідина буде рухатись по напрямку до резервуару. Внаслідок цього відбудеться

різке зниження тиску в трубопроводі. Зниження тиску, яке передається від шару до шару і розповсюджується по напрямку до запірного пристрою, називається зворотною ударною хвилею. Час пробігу прямої і зворотної ударної хвилі складає тривалість фази гідравлічного удару. Коли тиск знизиться по всьому трубопроводу, рідина зупиниться, знаходячись під пониженим тиском. В цьому положенні, коли тиск в трубопроводі буде менший, ніж в резервуарі, почнеться зворотний рух рідини до запірного пристрою з відновленням швидкості і тиску, а потім знову відбудеться гідравлічний удар. Він буде характеризуватись меншим підвищенням тиску, так як частина енергії втрачена. За цією зворотною хвилею настане друга, тобто повториться фаза гідравлічного удару і т.д. Описаний процес відбувається надзвичайно швидко, так як швидкості розповсюдження ударної хвилі дуже великі. Втрати енергії, супутні коливальному руху рідини, призводять до поступового згасання даного процесу.

На рис. 2 схематично показана діаграма зміни тиску в умовах гідравлічного удару в залежності від часу, котра показує, що підвищення тиску при гідравлічному ударі може в декілька разів перевищувати тиск в умовах постійного напору.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вперше явище гідравлічного удару експериментально і теоретично було вивчено Н.Є. Жуковським, котрий в 1898 році розробив теорію гідравлічного удару. При виведенні основних залежностей гідравлічного удару Жуковський користувався теоремою про кількість руху, а також фрагментами теорії пружності  $\left(\frac{\Delta d}{d}, \frac{\Delta \sigma}{E}\right)$ . Формула для швидкості розповсюдження ударної хвилі має вигляд:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\left(\sqrt{1 + \frac{E_0 \cdot d}{E \cdot \delta}}\right)}, \quad (1)$$

де  $\delta$  – товщина стінок труби;  $E$  – модуль пружності матеріалу, із якого зроблений трубопровід;  $\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$  – швидкість розповсюдження пружних деформацій в рідині з густиною

$\rho$  і модулем пружності  $E_0$ , для води  $C_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}} = 1425 \text{ м/с}$ .

**Формулювання цілі статті.** Але, нормативна база для перевірки можливості виникнення гідроудару відсутня, тому за мету цієї роботи поставлено створення вищезгаданої методики на базі даних, отриманих з лабораторного стенду (рис. 1) та підтвердження результатів під час опрацювання в реальних умовах (дані щодо проходження гідроудару на діючому обладнанні газового промислу).

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Згідно до [1] допустимий внутрішній надлишковий тиск слід розраховувати за формулою:

$$[p] = \frac{2[\sigma] \cdot \phi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 410 \cdot 1 \cdot (11 - 1)}{124 + (11 - 1)} = 61,19, \text{ МПа}, \quad (2)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження при розрахунковій температурі, МПа (при розрахунку на руйнування приймають  $[\sigma] = \sigma_{\text{тимчасове}} = 410$  МПа;  $\phi_p$  – коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва,  $\phi_p = 1$ ;  $s$  – товщина стінки труби, мм;  $c$  – додавання до розрахункової товщини стінки труби,  $c = 1$  мм;  $D$  – внутрішній діаметр труби, мм.

Стрибок тиску, що призведе до руйнування стінки ємності (в реальних умовах – теплообмінника) при робочому максимальному тиску 9,31 МПа:

$$[\Delta p] = [p] - P_{\text{роб}}^{\text{max}} = 61,19 - 9,31 = 51,88 \text{ МПа.} \quad (3)$$

Якщо цей стрибок тиску був зумовлений гідроударом, то, за формулою Жуковського, мінімальна швидкість потоку при досяганні якої відбувається руйнування металу труби, дорівнює:

$$[V_0] = \frac{[p]}{\rho \cdot C_v} = \frac{51,88 \cdot 10^6}{1040 \cdot 1329,7} = 37,5 \text{ м/с,} \quad (4)$$

де  $C_v$  – швидкість поширення ударної хвилі, м/с, [2]:

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{E_{\text{pid}}} + \frac{\rho \cdot D}{E_{\text{mp}} \cdot \delta}}}, \quad (5)$$

де  $E_{\text{pid}}$  – модуль пружності води, Па;  $E_{\text{mp}}$  – модуль пружності сталі (матеріалу трубопроводу), Па;  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;  $\delta$  – товщина стінок трубопроводу, м.

Прийнявши за довідником  $E_{\text{pid}} = 2,2 \cdot 10^9$  Па,  $E_{\text{mp}} = 1,6 \cdot 10^{11}$  Па, а за матеріалами замовника  $D = 0,100$  м,  $\delta = 0,007$  м,  $\rho = 1040$  кг/м<sup>3</sup>, визначаємо:

$$C_v = \frac{1}{\sqrt{\frac{1040}{2,2 \cdot 10^9} + \frac{1040 \cdot 0,100}{1,6 \cdot 10^{11} \cdot 0,007}}} = 1329,7 \text{ м/с.} \quad (6)$$

Перепад тисків можна прийняти рівним різниці тисків у технологічному трубопроводі  $p_1$  і магістральному трубопроводі  $p_2$ :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 9,31 - 2,94 = 6,37 \text{ МПа.} \quad (7)$$

Якщо припустити, що цей перепад тисків, визначений за формулою (7), був втрачений між сепаратором С-1-6П і теплообмінником Т-6П, то можна обчислити середню швидкість руху продукту в трубопроводі.

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H ;$$

$$H = \sum h_l + \sum h_m + \frac{V_0^2}{2 \cdot g}, \quad (8)$$

де  $\sum h_l$  – втрати напору по довжині;  $\sum h_m$  – втрати напору на місцевих опорах.

Втрати напору вздовж ушкодженої ділянки трубопроводу відповідно до [3]:

1) місцевий опір – поворот  $90^\circ$  (труба діаметром  $114 \times 7$  мм) – 8 шт.  
 $\zeta_{90^\circ} = 0,23 \cdot 8 = 1,84$ ;

2) місцевий опір – вихід в трубу від сепаратора  $\zeta_{вих} = 0,2$ ;

3) місцевий опір – вхід у теплообмінник  $\zeta_{вх} = 1,0$ ;

4) по довжині (труба діаметром  $114 \times 7$  мм) – довжина  $l = 15,02$  м.

Коефіцієнт гідравлічного тертя для сталевих ненових труб  $\lambda = 0,02$ . Внутрішній діаметр трубопроводу  $D = 0,100$  м.

$$H \cong \left( \lambda \cdot \frac{1}{D} + \sum \zeta + 1 \right) \cdot \frac{V_0^2}{2 \cdot g}. \quad (9)$$

Звідси знайдемо витрату:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \frac{1}{D} + \sum \zeta + 1}} = \frac{3,14 \cdot 0,100^2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 624,25}}{2 \cdot 1,41 \cdot \sqrt{0,02 \cdot \frac{15,02}{0,100} + 1,84 + 1 + 0,2 + 1}} = 0,3285, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (10)$$

Миттєва середня швидкість руху рідини при такій витраті могла становити:

$$V_0 = \frac{Q}{F} = \frac{0,3285 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,100^2} = 41,85 \text{ м/с}. \quad (11)$$

Величина перевищення тиску рідини у випадку гідроудару могла складати за формулою Жуковського [2]:

$$\Delta p = \rho \cdot V_0 \cdot C_V, \quad (12)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_0$  – швидкість руху рідини в трубопроводі,  $\text{м/с}$ ;  $C_V$  – швидкість поширення ударної хвилі,  $\text{м/с}$ .

Перевищення тиску при цьому могло становити:

$$\Delta p = \rho \cdot V_0 \cdot C_V = 1040 \cdot 41,85 \cdot 1329,7 = 57,87 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Перевіряємо умову руйнування стінки теплообмінника:

$$[\Delta p] < \Delta p; \quad (14)$$

$$[51,88] < 57,87.$$

Умова виконується, отже руйнування стінки теплообмінника за рахунок втрати міцності труби могло статися при умові виникнення гідравлічного удару.

**Висновки.** Створено методику перевірки факту проходження гідроудару під час експлуатації газозбірної системи газових промислів, які експлуатують свердловини із значним водним фактором газового потоку. Методику можливо використати як для технологічних розрахунків для діючих об'єктів, так і в рамках навчального процесу, оскільки її сформовано на базі опрацювання нормативних документів, теорії гідравлічного удару Жуковського та методик гідравлічних і міцнісних розрахунків посудин, що працюють під тиском.

#### Література

1. ГОСТ 14249-89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность»
2. Константинов Д.М. Інженерна гідравліка / Д.М. Константинов, О.О. Гіжа – К.: Видавничий Дім «Слово». 2006. – 432 с.
3. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра. 1982. – 224 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. GOST 14249-89 «Sosudyi i apparaty. Normyi i metodyi rascheta na prochnost».
2. Konstantinov D.M. Inzhenerna gidravlika D.M. Konstantinov, O.O. Gizha – K.: Vidavnichiy Dim «Slovo». 2006. – 432 p.
3. Altshul A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya A.D. Altshul. 2-e izd. pererab. i dop. – M.: Nedra. 1982. – 224 p.

УДК 622.691.4

Братах М.И., Рузина И.М., Сероус В.С., Криволапчук И.П.

#### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОУДАРА**

В статье представлена оценка возможности образования явления гидравлического удара в сложной газосборной системе месторождений со значительным водным фактором. Представленный способ базируется на проверке допустимых напряжений при разрушении стенки трубопровода при гидравлическом ударе.

Bratakh M.I., Ruzina I.M., Sirous V.S., Krivolapchuk I.P.

#### **METHOD OF CALCULATION CONDITIONS OF WATER HAMMER ORIGIN**

The article presents an estimation of the possible formation of water hammer phenomenon in a complex gas gathering system of gas field with significant water factor. The present method is based on checking the allowable stress at failure of the pipeline wall under the pressure of water hammer.