

С.Я. Кравців, науковий співробітник, НМЦ НЗ ДСНС України,  
В.М. Халипа, к.т.н., доцент, НУЦЗУ

## РОЗПОДІЛ ЗГИНАЛЬНОГО МОМЕНТУ ПІД ЧАС ГІДРАВЛІЧНОГО УДАРУ У ТРУБИ ПОЖЕЖНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

(представлено д-ром техн. наук Куценком Л.М.)

Запропонована методика розрахунку напружено-деформованого стану тонкої циліндричної труби при гідравлічному ударі у момент включення і виключення пожежних насосів.

**Ключові слова:** протипожежний водопровід, гідравлічний удар, осесиметрична деформація, тиск, окружні напруження і напруження згину.

**Постановка проблеми.** Система протипожежного водопостачання – комплекс інженерних споруд, основним елементом якого є водопровідні мережі, що працюють в двох режимах – до пожежі (забезпечують пропуск води на господарсько – питні, виробничі потреби відповідних водоспоживачів) і при пожежі (забезпечують додаткову подачу води на потреби пожежогасіння). Подача додаткових пожежних витрат води здійснюється пожежними насосами, встановленими в насосних станціях, які включаються в роботу при надходженні сигналу про виникнення пожежі. При раптовій зупинці насоса в трубопроводі виникає гідравлічний удар, який може призвести до порушення нормальної роботи трубопроводу і навіть до руйнування труби, що негативно позначиться на можливості забезпечення подачі води на пожежогасіння.

Те що відбувається при гідравлічному ударі різке підвищення тиску  $\Delta P$  являє собою досить небезпечне явище, тому розроблені практичні заходи боротьби з ним. Існують конструктивні способи зменшення  $\Delta P$ , наприклад установка гідроакумуляторів або діафрагм, що руйнуються при підвищенні тиску та скидає рідину в компенсатор. Проте останнім часом проектувальники воліють збільшення міцності труби, що призводить до необхідності побудови розрахункових схем, що враховують всі особливості процесу деформування труби при гідравлічному ударі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існуючі методи розрахунку труб на міцність і жорсткість базуються на безмоментної теорії деформування тонких циліндричних оболонок під дією постійного тиску, рівного сумі  $P$  – експлуатаційного і  $\Delta P$  – ударного тисків. У такій постановці розтягують окружні напруги постійні в усіх осьових перетинах труби, і в цьому випадку коефіцієнт запасу міцності  $n$  щодо допустимого напруження  $[\sigma]$  становить  $[\sigma]$  до  $\sigma_{\theta}$ .

Насправді під час гідравлічного удару одна частина труби знаходиться під тиском  $P$ , а інша під тиском  $P + \Delta P$ . У запропонованій роботі викладається методика розрахунку напружено-деформованого стану тієї частини труби, яка знаходиться в околиці стрибкоподібної зміни тиску.

**Постановка завдання та його вирішення.** Для забезпечення міцності протипожежного трубопроводу при впливі гідравлічного удару необхідно розрахувати напружено-деформований стан труби в зоні стрибкоподібного підвищення тиску. Обґрунтування явища гідравлічного удару в трубах і метод його розрахунку були запропоновані проф. Н.Є. Жуковським. Його ім'я зокрема носить формула для визначення надлишкового  $\Delta P$  ударного тиску [1]

$$\Delta P = \rho V a, \tag{1}$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ,  $V$  – середня швидкість рідини, що перекачується по трубі,  $\text{м/с}$ ;  $a$  – швидкість поширення ударної хвилі,  $\text{м/с}$ , яка визначається по формулі

$$a = \sqrt{\frac{E_p}{\rho}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{E_p}{E_T} \cdot \frac{d}{h}}}, \tag{2}$$

де  $E_g$  – модуль пружності рідини,  $\text{Па}$ ;  $E_T$  – модуль пружності матеріалу труби,  $\text{Па}$ ;  $\frac{d}{h}$  – відношення внутрішнього діаметра труби до товщини її стінки.

Для дослідження осесиметричної деформації вигину труби, яка незалежно від величини експлуатаційного тиску визначається тільки величиною, розглянемо розрахункову схему рис. 1.

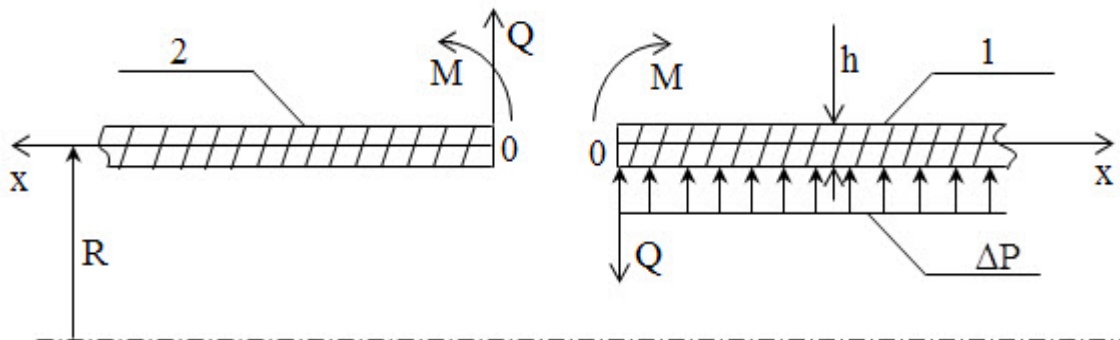


Рис. 1. Розрахункова схема вигину труби в зоні різкого підвищення тиску

Розділимо трубу на дві частини: перша у розглянутий момент вже під дією  $\Delta P$ , друга ще нічим навантажена, і для кожної з частин введемо свою локальну систему координат  $Ox$ .

Обидві частини труби далі розглядаються як довгі тонкі циліндричні оболонки постійної товщини  $h$ , радіусом серединної поверхні  $R$  і коефіцієнтом Пуассона матеріалу труби –  $\mu$ . Невідомими крайовими розподіленими навантаженнями  $Q$  – поперечною силою і  $M$  – згинаючим моментом замінимо силовий вплив однієї частини труби на іншу. Ці невідомі визначимо з геометричних умов сполучення обох частин труб при  $x = 0$

$$W_1 = W_2; \varphi_1 = \varphi_2, \quad (3)$$

де  $W_1$  и  $W_2$  – радіальне переміщення;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – кути повороту частин труб під дією всіх нагрузок.

Формули для визначення цих величин представлені в наступному вигляді

$$\begin{cases} W_1 = -\frac{Q}{2\beta^3 D} + \frac{M}{2\beta^2 D} + \frac{\Delta P R^2}{E_T h}; W_2 = -\frac{Q}{2\beta^3 D} + \frac{M}{2\beta^2 D}; \\ \varphi_1 = \frac{Q}{2\beta^2 D} - \frac{M}{\beta D}; \varphi_2 = \frac{Q}{2\beta^2 D} + \frac{M}{\beta D}, \end{cases} \quad (4)$$

де  $D = \frac{E_T h^3}{12(1 - \mu^2)}$  – циліндрична жорсткість оболонки;

$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1 - \mu^2)}{R^2 h^2}}$  – параметр оболонки.

Підставляючи (4) в (3) знаходимо  $M = 0$ ,  $Q = \frac{\Delta P R^2 \beta^3 D}{E_T h}$ .

Оскільки по трубі, крім  $\Delta P$ , діє простійний експлуатаційний тиск  $P$ , який створює постійне по всій довжині труби радіальне переміщення її стінок, рівне  $\frac{P R^2}{E_T h}$ , то остаточний вигляд функції розподілу радіальних переміщень в обох частинах труби запишеться так

$$W_1 = \frac{R^2}{E_T h} \left[ \Delta P \left( 1 - \frac{1}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x \right) + P \right]; W_2 = \frac{R^2}{E_T h} \left( \frac{\Delta P}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x + P \right). \quad (5)$$

Осьовий згинальний момент  $M_1$ , діючий в першій частині труби визначається виразом [6]

$$M_1 = D \frac{d^2 W_1}{dx^2} = \frac{\Delta P R^2 h^2 \beta^2}{6(1 - \mu^2)} e^{-\beta x} \sin \beta x. \quad (6)$$

Досліджуючи цю функцію на екстремум знаходимо, що свого найбільшого за модулем значення згинальний момент досягає при  $x = \frac{\pi}{4\beta}$  і дорівнює

$$M_{1\max} = \frac{\sqrt{2} \Delta P R^2 h^2 \beta^2}{12(1 - \mu^2)} e^{-\frac{\pi}{4}}. \quad (7)$$

Відповідний момент  $M_2$ , діючий в другій частині труби відрізняється від  $M_1$  тільки знаком  $M_2 = -M_1$ .

При плоскому напруженому стані міцність труби оцінюється  $s$  за допомогою головних напруг  $\sigma_\theta$  – діють в окружному напрямку і  $\sigma_x$  – в осевому напрямку в сеченні труби, в осьовому напрямку в перетині труби, де діє максимальний згинальний момент  $M_{1\max}$ . Ці напруги визначаються за такими формулами [3]

$$\sigma_\theta = \frac{(P + \Delta P)R}{h} \pm \frac{6\mu M_{1\max}}{h^2}; \quad \sigma_x = \pm \frac{6M_{1\max}}{h^2}. \quad (8)$$

Для забезпечення міцності з коефіцієнтом запасу щодо межі текучості  $\sigma_T$  необхідно при проектуванні виконати умову:

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 \leq \left[ \frac{\sigma_T}{n} \right]^2. \quad (9)$$

**Висновки.** Запропоновано методику розрахунку напружено-деформованого стану труби в зоні стрибкоподібного підвищення тиску, викликаного гідравлічним ударом при виключенні пожежних насосів. Вона дозволяє враховувати деформації і напруги в осьовому напрямку, вказані перетину, в яких згинальний момент досягає свого найбільшого значення, що дає можливість забезпечити міцність на етапі проектування трубопроводу при гідравлічному ударі.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Кулінченко В.Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник / В.Р. Кулінченко. – Київ: ІНК ОС, Центр навчальної літератури, 2006. – 616 с.
2. Тимошенко С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М: Наука, 1966. – 636 с.
3. Ван ЦЗИ – ДЕ Прикладная теория упругости. Государственное издательство физико-математической литературы. Москва, 1959. – 400 с.

С.Я. Кравців, В.М. Халыпа

### **Распределение изгибающего момента при гидравлическом ударе в трубе пожарного водоснабжения**

Предложена методика расчёта напряжённо-деформированного состояния тонкой цилиндрической трубы при гидравлическом ударе в момент включения и выключения пожарных насосов.

**Ключевые слова:** противопожарный водопровод, гидравлический удар, осесимметричная деформация, давление, окружные напряжения и напряжения изгиба.

S.Ya. Kravtsiv, V.M. Halypa

### **Distribution bending moments during water hammer in pipes fire water**

The method of calculation the stress-strain state of a thin cylindrical pipe with water hammer at the moment of switching on and off fire pumps is offered.

**Keywords:** fire-prevention water supply, water hammer, axisymmetric strain, pressure, circumferential stress and bending stress.