

УДК 626:532.542:532.592.2

Герасимов Г. Г., к.т.н., доцент; Герасімов Є. Г., к.т.н., доцент, Іванов С. Ю., асистент
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ СТАБІЛІЗАТОРІВ ТИСКУ

Розглянута конструкція і принцип дії стабілізатора тиску. Показана методика визначення основних параметрів стабілізатора тиску з диференційним вузлом приєднання демпфуючих камер до трубопроводу. Виконана оцінка необхідних конструктивних розмірів перфорації в магістральному трубопроводі і вузлі приєднання.

Ключеві слова: конструкція стабілізатора тиску, математичне моделювання, розрахунки об'єму повітря, тисків і параметрів перфорації елементів.

Трубопровідні мережі України є частиною доволі складного інженерного комплексу. Значна частина споруд цього комплексу відпрацювала нормативний термін і потребує оновлення. Тільки за офіційними даними в країні аварійними та застарілими визнано майже 38% водопровідних, 36% каналізаційних, 14% теплових мереж і ця частина мереж потребує невідкладної заміни або ремонту. Загальна протяжність центрального питного водопостачання по Україні становить 179809 км, з них ветхих та аварійних 68818 км; <http://ua-energy.org/>.

Закритих зрошувальних трубопроводів на Україні збудовано понад 31000 км, з них 15000 км із сталевих труб, а решта з азбестоцементних і залізобетонних [1].

В процесі експлуатації трубопровідних систем виникають хвильові явища різної природи – провали тиску, гідравлічні удари, вимушені коливання, автоколивання, резонансні явища і ін., а також пов'язані з ними вібраційні процеси; <http://www.volnotex.ru/>.

Гідравлічні удари, коливання і пульсації тиску, підвищена вібрація трубопроводів багатократно підвищують швидкість внутрішніх корозійних процесів, сприяють накопиченню мікротріщин утомленості в металі, особливо в місцях концентрації напружень (зварні шви, царапини, задири, виробничі дефекти і ін.) і є основним фоном аварійних ситуацій. Значна зношеність трубопровідних мереж сприяє постійному зростанню кількості аварійних ситуацій [2].

Призначення технології хвильової стабілізації тиску:

- забезпечення безаварійної експлуатації трубопровідних мереж шляхом зменшення до допустимого рівня амплітуд гідроударів, коливань тисків, вібрацій і резонансних явищ;
- повне виключення крупних аварійних розривів трубопроводів, виходу з ладу арматури і насосних агрегатів з причин гідроударів, пульсацій тисків і вібрації;
- підвищення корозійно-стомленісної довговічності труб за рахунок зниження до необхідного рівня амплітудно-частотних характеристик пульсацій тиску при перехідних процесах;
- продовження експлуатаційного ресурсу навіть для сильно зношених трубопроводів за рахунок зниження динамічного циклічного навантаження.

Запропонований нами стабілізатор тиску [3], рис. 1, включає наступні елементи: ділянку трубопроводу з приєднувальними фланцями 1 і перфорованою частиною 2, яка охоплена корпусом 3, що утворює предкамеру 4. До предкамери приєднуються демпфуючі камери 5 через середню камеру 6 за допомогою вузла з диференційним опором, який включає дві діафрагми: одну гнучку діафрагму 9 з центральним отвором, другу жорстку 8 з центральними дрібними отворами і периферійними збільшеними отворами, що перекриваються гнучкою діафрагмою. Демпфуючі і середню камери розділяють додаткові перфоровані вставки 9, які забезпечують спірання еластичної роздільної оболонки 10, що

наповнюється повітрям з заданим тиском через ніпель 11. Приклад виконання жорсткої діафрагми 8 показано в [4, С. 201].

Пристрій працює наступним чином [3]. При підвищенні тиску в трубопроводі і потраплянні рідини в стабілізатор тиску через отвори перфорації 2 відбувається поступове заповнення предкамери 4, середньої камери 6 і гідравлічних порожнин демпфуючих камер 5. При цьому рідина, проходячи центральними дрібними отворами жорсткої діафрагми 8 і через перфорацію вставки 9, заповнює демпфуючу камеру 5, стискаючи еластичну оболонку 10, яка заповнена повітрям. За рахунок дисипації енергії в перфорації і пружності в елементах демпфуючих камер підвищення тиску при гідроударі не перевищує допустимого, якщо гідравлічний опір перфорацій і об'єм повітря в демпфуючих камерах відповідають розрахунковим значенням.

При зниженні тиску в магістральному трубопроводі рідина з гідравлічних порожнин стабілізатора повертається в трубопровід, проходячи перфорацію вставки 9, всі отвори жорсткої діафрагми 8, тому що гнучка діафрагма під дією зворотного потоку відкриває периферійні отвори, а також рідина проходить перфораційні отвори самого магістрального трубопроводу. Гідравлічний опір зазначених елементів при спорожненні демпфуючих камер значно менший ніж при їх наповненні, тому падіння тиску відбувається уповільнено і розриву суцільності потоку в трубопроводі не відбувається.

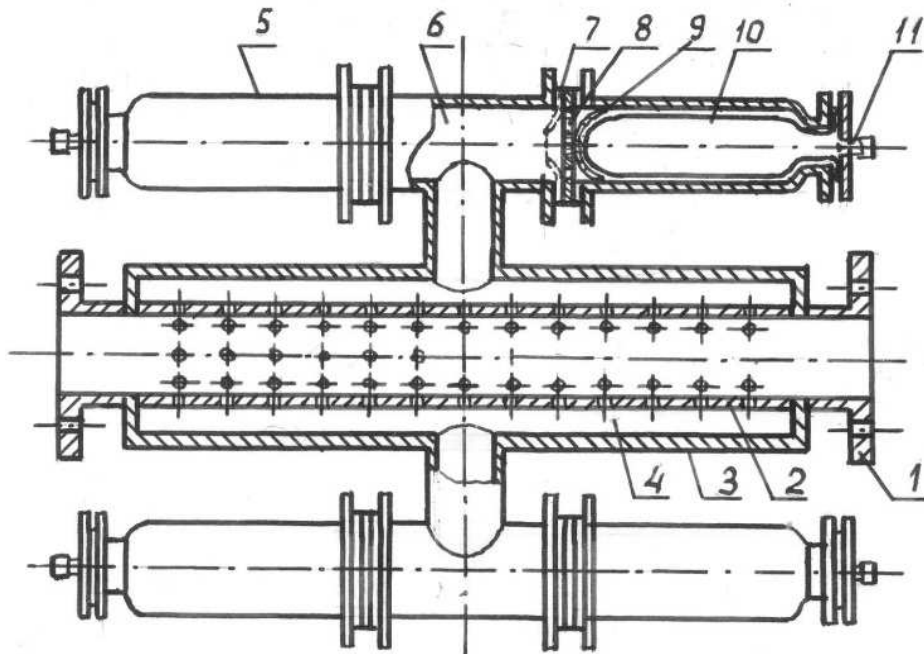


Рис. 1. Стабілізатор тиску з демпфуючими камерами:

- 1 – фланець, 2 – перфорована ділянка трубопроводу, 3 корпус, 4 – предкамера, 5 – демпфуюча камера, 6 – середня камера, 7 – гнучка діафрагма, 8 – жорстка діафрагма, 9 – перфорована перегородка, 10 – еластичний роздільний елемент, 11 – ніпель

Визначення основних параметрів стабілізатора тиску проводиться згідно методики, яка викладена в [4, С. 37–82]. Розглянемо порядок розрахунку для умов дослідів 1.13, який проводився в експериментальній установці з діаметром напірного трубопроводу $d_{mp}=100$ мм і розрахунковою довжиною $L=100$ м. Трубопровід живиться з напірного резервуару, у якого забезпечується постійний рівень води при статичному напорі $H_{cm}=11$ м. В кінці трубопроводу розташований запірний пристрій, що забезпечує закриття за умов прямого гідравлічного удару.

Для дослідів 1.13 [4, рис. 5.12, С. 209] початковий об'єм повітря в резервуарі $W_a=0$, початкова витрата $Q_n=0,0068$ м³/с, початковий напір у запірному пристрої $H_n=9,6$ м. За результатами дослідів максимальний ударний напір $H_{mp\ max}=74,6$ м; тоді дійсне прирощення тиску при гідроударі

$$\Delta H_{y\delta, \delta} = H_{mp \max} - H_n \quad (1)$$

$$\Delta H_{y\delta, \delta} = 74,6 - 9,6 = 65 \text{ м.}$$

Площа поперечного перерізу трубопроводу

$$f_{mp} = \pi d_{mp}^2 / 4 = 0,785 \cdot 0,01^2 = 0,00785 \text{ м}^2.$$

Середня швидкість води в трубопроводі

$$v_n = Q_n / f_{mp} \quad (2)$$

$$v_n = 0,0068 / 0,00785 = 0,866 \text{ м/с.}$$

Якщо прийняти фактичну швидкість розповсюдження хвилі гідравлічного удару за дослідними даними $a_\phi = 730 \text{ м/с}$, то для умов прямого гідравлічного удару прирощення напору за формулою М.Є. Жуковського

$$\Delta H_{y\delta} = a_\phi \cdot v_n / g \quad (3)$$

$$\Delta H_{y\delta} = 730 \cdot 0,866 / 9,81 = 64,4 \text{ м, що практично співпадає з дослідними даними } \Delta H_{y\delta, \delta} = 65 \text{ м.}$$

Визначаємо необхідні основні параметри стабілізатора тиску без диференційного опору у вузлі приєднання демпфуючої камери до трубопроводу за умови погашення гідравлічного удару, який виникає при закритті засувки в кінці водогону, графо-аналітичним методом [4, приклад 2.5, С. 76].

Приймаємо допустимий максимальний напір в кінці трубопроводу при наявності стабілізатора тиску $H_m = 19,5 \text{ м}$, що відповідає досліді 1.7 [4, рис. 5.2, С. 209].

За дослідними даними гідравлічний опір вузла приєднання стабілізатора тиску з діаметром $d_3 = 0,08 \text{ м}$ до трубопроводу при прямій течії, тобто при наповненні демпфуючих камер, становить $\zeta_1 = 2,47$ і при зворотній течії $\zeta_2 = 2,34$; тому коефіцієнти опору, які приведені до швидкості в магістральному трубопроводі, визначаються за формулами [4, ф-ли (5.8), (5.9); С. 200]

$$\zeta_{1y} = \zeta_1 (d_{mp} / d_3)^4 \quad (4)$$

$$\zeta_{2y} = \zeta_2 (d_{mp} / d_3)^4 \quad (5)$$

$$\zeta_{1y} = 2,47 \cdot (0,1 / 0,08)^4 = 6,03;$$

$$\zeta_{2y} = 2,34 \cdot (0,1 / 0,08)^4 = 5,71.$$

Знаходимо абсолютні напори при атмосферному напорі $H_a = 10 \text{ м}$:

- початковий в напірному резервуарі $H_{oa} = H_{cm} + H_a = 11 + 10 = 21 \text{ м}$;

- початковий в демпфуючій камері $H_{na} = H_n + H_a = 9,6 + 10 = 19,6 \text{ м}$;

- максимальний у трубопроводі $H_{ma} = H_m + H_a = 19,5 + 10 = 29,5 \text{ м}$.

Максимальне відхилення напору від статичного

$$Z_{max} = (H_{ma} - H_{oa}) / H_{oa} \quad (6)$$

$$Z_{max} = (29,5 - 21) / 21 = 0,405.$$

Приймаємо значення базових величин:

- витрати $Q_\delta = |Q_n| = 0,0068 \text{ м}^3/\text{с}$;

- напору $H_\delta = H_{oa} = 21 \text{ м}$;

- швидкості $v_\delta = Q_\delta / f_{mp} = 0,866 \text{ м/с}$.

Знаходимо критерій втрат напору в трубопроводі

$$k = H_{wn} / H_a = (H_{oa} - H_{na}) / H_\delta \quad (7)$$

$$k = (21 - 19,6) / 21 = 0,067.$$

Коефіцієнти опору вузла приєднання за формулами [4, ф-ли (2.17), (2.18), С. 41]:

$$k_{1y} = \zeta_{1y} \cdot v_\delta^2 / (2gH_\delta); \quad (8)$$

$$k_{2y} = \zeta_{2y} \cdot v_\delta^2 / (2gH_\delta); \quad (9)$$

$$k_{1y} = 6,03 \cdot 0,866^2 / (2 \cdot 9,81 \cdot 21) = 0,0109;$$

$$k_{2y} = 5,71 \cdot 0,866^2 / (2 \cdot 9,81 \cdot 21) = 0,0104.$$

У першому наближенні об'єм повітря визначаємо за формулою Главтранспроєкту [4, ф-ла (2.147), С. 97]

$$W_0 = \frac{L f C_0}{0,625 \cdot (h - 1)^2}, \quad (10)$$

де $C_0 = v_\delta^2 / (2gH_\delta) = 0,866^2 / (2 \cdot 9,81 \cdot 21) = 0,00182$ і $h_m = H_{na} / H_\delta = 29,5 / 21 = 1,405$, тоді

$$W_0 = \frac{100 \cdot 0,00785 \cdot 0,00182}{0,625 \cdot (1,405 - 1)} = 0,0138 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$W_0^* = W_0 H_{na} / H_0. \quad (11)$$

$$W_0^* = 0,0138 \cdot 19,6 / 21 = 0,0129.$$

Період коливань рідини $T = 2\pi \sqrt{\frac{LW_0^*}{gfH_{oa}}}$. (12)

$$T = 2 \cdot 3,14 \sqrt{\frac{100 \cdot 0,0129}{9,81 \cdot 0,00785 \cdot 21}} = 5,6 \text{ с}.$$

Критерій гомохронності $\delta^* = (L/a_0)/(T/4)$. (13)

$$\delta^* = (100/730)/(5,6/4) = 0,096 < 0,33.$$

Тому приймаємо математичну модель жорсткого гідравлічного удару з коефіцієнтами $K_{EI}=0$ і $K_E=0$.

Згідно [4, рис. А2 к), С. 300] при $k=0$; $k_{ly}=0,0109$; $Z_{max}=0,405$; $K_E=0$ знаходимо критерій подібності $\sigma = 0,09$.

Початкова приведена витрата

$$Q_{np} = Q_n \sqrt{\frac{H_{cm} + H_{wn}}{H_{cm}}}. \quad (14)$$

$$Q_{np} = 0,0068 \sqrt{\frac{11+1,4}{11}} = 0,0072 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{і} \quad \text{відповідна} \quad \text{середня} \quad \text{швидкість} \quad \text{води}$$

$$v_{np} = Q_{np} / f_{mp} = 0,0072 / 0,00785 = 0,92 \text{ м/с}.$$

Об'єм повітря в демпфуючій камері на початку перехідного процесу при напорі $H_{oa}=21$ м.

$$W_0 = \frac{L f_{mp} v_{np}^2}{2gH_0\sigma}. \quad (15)$$

$$W_0 = \frac{100 \cdot 0,00785 \cdot 0,92^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 21 \cdot 0,09} = 0,0179 \text{ м}^3.$$

Об'єм повітря на початку перехідного процесі при напорі $H_{na}=19,6$ м

$$W_a = W_0 (H_{oa} / H_{na})^{1/2}. \quad (16)$$

$W_a = 0,0179 (24/19,6)^{1/2} = 0,0189 \text{ м}^3$, що наближено до дослідних даних

$W_{a \text{ доc}} = 0,0187 \text{ м}^3$.

Для другого варіанту стабілізатора застосовуємо диференційний опір у вузлу приєднання до трубопроводу. Спочатку визначимо коефіцієнт опору перфорації трубопроводу. Якщо прийняти діаметр отвору $d_{om}=0,005$ м, то його площа буде $f_{om} = \pi d_{om}^2 / 4 = 0,785 \cdot 0,005^2 = 0,0000196 \text{ м}^2$. При рівності сумарної площі отворів і площі поперечного перерізу трубопроводу кількість отворів

$$n_{om} = f_{mp} / f_{om} = 0,00785 / 0,0000196 = 400 \text{ шт}.$$

Якщо виконувати по $z_p=12$ отворів в одному поперечному ряду, то таких рядів буде $n_p = n_{om} / z_p = 400 / 12 = 33,3 \approx 34$, тоді кількість отворів

$$n_{om1} = z_p \cdot n_p = 12 \cdot 34 = 408 \text{ шт}.$$

Сумарна площа всіх отворів перфорації трубопроводу

$$\sum f_{om} = f_{om} \cdot n_{om1}. \quad (17)$$

$$\sum f_{om} = 0,0000196 \cdot 408 = 0,08 \text{ м}^2.$$

Приймаючи крок отворів вздовж трубопроводу $l_{om}=15$ мм=0,015 м, довжина перфорованої ділянки трубопроводу, що дорівнює довжині предкамери, буде $l_{nk} = 0,015 \cdot 34 = 0,51$ м.

Площа перед перфорацією $F_1 = \pi d_{mp} L_1$. (18)

$$F_1 = 3,14 \cdot 0,01 \cdot 0,51 = 0,16 \text{ м}^2.$$

Відносна площа отворів

$$f = \sum f_{om} / F_1 = 0,08 / 0,16 = 0,05.$$

Згідно [5, т. 8-1, С. 331] приймаємо коефіцієнт опору перфорації $\zeta=1050$. Причому втрати напору в перфорації

$$\Delta H = \Delta p / (\rho g) = \frac{1}{\rho g} \left(\zeta \frac{\rho w_1^2}{2} \right) = \zeta \frac{w_1^2}{2g} \quad (19)$$

де w_1 – середня швидкість води перед перфорацією. Тоді коефіцієнт опору перфорації приведений до швидкості води в трубопроводі становить

$$\zeta_{ly \text{ перф}} = \zeta (f_{mp} / F_1)^2 \quad (20)$$

$$\zeta_{ly \text{ перф}} = 1050(0,00785/0,16)^2 = 2,3.$$

Приймаємо $k_{ly}=3$. При $k=0,067$; $Z_{max}=0,571$; $K_E=0$ з [4, рис. А2, ф), С. 305] знаходимо критерій подібності $\sigma=1,2$; тоді об'єм повітря при напорі $H_{oa}=21$ м за формулою (15)

$$W_0 = \frac{L f_{mp} v_{np}^2}{2g H_o \sigma} = \frac{100 \cdot 0,00785 \cdot 0,92^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 21 \cdot 1,2} = 0,00134 \text{ м}^3.$$

Об'єм повітря при початковому напорі $H_{na}=19,6$ м

$$W_a = W_0 (H_{oa} / H_{na})^{1/\chi} = 0,00134 (21/19,6)^{1/1,3} = 0,00141 \text{ м}^3.$$

Приймаємо $k_{2y} = k_{ly}/5 = 3/5 = 0,6$; тоді з [4, рис. А2.е), с. 298] $Z_{min}=0,69$.

Мінімальний напір в трубопроводі і одночасно в демпфуючій камері

$$H_{ka} = H_{oa} (1 - Z_{min}) \quad (21)$$

$$H_{ka} = 21(1 - 0,69) = 6,51 \text{ м}.$$

В цей момент вакуум в трубопроводі буде найбільший, а саме

$$H_{вак} = H_a - H_{ka} \quad (22)$$

$H_{вак} = 10 - 6,51 = 3,49$ м, що допустимо.

Максимальний об'єм повітря в демпфуючій камері

$$W_k = W_0 (H_{oa} / H_{ka})^{1/\chi} \quad (23)$$

$$W_k = 0,00134 (21/6,51)^{1/1,3} = 0,033 \text{ м}^3.$$

Розрахунок конструктивних параметрів вузла приєднання демпфуючих камер до трубопроводу. Приймаємо одну демпфуючу камеру. При $k_{ly}=3$ коефіцієнт опору вузла

$$\zeta_{ly} = \frac{k_{ly}}{v_n^2 / (2g H_o)} \quad (24)$$

$$\zeta_{ly} = \frac{3}{0,866^2 / (2 \cdot 9,81 \cdot 21)} = 1648.$$

Якщо прийняти діаметр приєднувального трубопроводу демпфуючої камери $d_3=50$ мм=0,05 м, то

$$\zeta_1 = \zeta_{ly} (d_3 / d_{mp})^4 \quad (25)$$

$$\zeta_1 = 1648 (50/100)^4 = 103.$$

Приймаємо шість отворів в центрі жорсткої діафрагми, тобто $z_{ome1} = 6$ шт. В результаті застосуванні методу підбору визначили діаметр отворів $d_{ome1} = 6,8$ мм=0,0068 м. Площа одного отвору $f_{ome1} = 0,785 \cdot 0,0068^2 = 0,00004624 \text{ м}^2$. Відносна площа отворів

$$f_1 = \frac{f_{ome1} \cdot z_{ome1}}{f_3} = \frac{0,00004624 \cdot 6}{0,00196} = 0,141.$$

Користуючись графіком [5, т. 8-3б, С. 334] при товщині діафрагми $l=3$ мм=0,003 м і відношенні $l/d_{ome1} = 0,003/0,0068 = 0,44$ отримаємо $\zeta_1 = 102,8$; що практично співпадає з раніше прийнятим значенням.

Відповідно $\zeta_2 = \zeta_1 / 5 = 103/5 = 20,6$ і тоді $\zeta_{2y} = \zeta_2 (d_{mp} / d_3)^4 = 20,6 (100/50)^4 = 330$. Користуючись графіком [5, т. 8-3б, с. 334] необхідна відносна площа отворів периферійної частини жорсткої діафрагми становить $f_2 = 0,28$. При сумісній роботі отворів в період зворотної течії води їх сумарна площа становить $\sum f_{ome} = f_2 f_3 = 0,28 \cdot 0,00196 = 0,00055 \text{ м}^2$, тоді площа периферійних отворів $\sum f_{ome2} = \sum f_{ome} - f_{ome1} z_{ome1} = 0,00055 - 0,00004624 \cdot 6 = 0,00027 \text{ м}^2$. Приймаємо кількість отворів на периферії жорсткої діафрагми $z_{ome2} = 6$ і площа одного отвору $f_{ome2} = \sum f_{ome2} / z_{ome2} = 0,00027/6 = 0,000045 \text{ м}^2$.

$$\text{Діаметр одного отвору } d_{\text{отв}2} = \sqrt{\frac{4 \cdot f_{\text{отв}2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000045}{3,14}} = 0,0075 \text{ м.}$$

Таким чином, основні параметри стабілізатора тиску з диференційним вузлом приєднання демпфуючих камер до предкамери можливо визначити за допомогою методики, яка була раніше розроблена для водоповітряних резервуарів [4].

В цілому, необхідно зазначити, що стабілізатор тиску – спеціальна врізка в трубопровід, яка практично не потребує технічного обслуговування і електроживлення. Пристрій дозволяє уникнути небезпечних гідроударів, причому загальна аварійність скорочується на 70...80%; допомагає затримати внутрішню корозію в трубах, скорочує втрати води в мережі.

1. Герасимов Г. Г. Гідравлічні та аеродинамічні машини. Підручник. – Рівне : НУВГП, 2008. – 241 с.
2. Дикаревский В. С. и др. Противоударная защита закрытых оросительных сетей. / В. С. Дикаревский, В. П. Зырянов, А. Е. Татура. – М. : Колос, 1981. – 80 с.
3. Патент на корисну модель. Україна № 92422 F 16L 55/04 (2006.01). Герасимов Г. Г., Герасимов Є. Г., Иванов С. Ю., Опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.
4. Герасимов Г. Г., Герасимов Є. Г. Трубопроводні системи з водоповітряними резервуарами. Монографія. – Рівне : НУВГП, 2005. – 328 с.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М. : Машиностроение, 1970. – 559 с.
6. Герасимов Є. Г., Иванов С. Ю., Рокочинський А. М. Покращення умов експлуатації закритих зрошувальних мереж при застосуванні удосконалених стабілізаторів тиску / – Збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції «Геодезія. Землеустрій. Природокористування: присвячується пам'яті П.Г. Черняги», 5-6 листопада 2014 року. – Рівне : НУВГП, 2014. – С. 137–139.

Рецензент: д.т.н., професор Рокочинський А. М. (НУВГП)

Gerasimov G. G., Candidate of Engineering, Associate Professor; Herasimov Y. H., Candidate of Engineering, Associate Professor, Ivanov S. Y., Assistant (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

DEFINITION OF BASIC PARAMETERS PRESSURE STABILIZER

Considered design and principle of operation of pressure regulator. Shown method of determining the basic parameters of the pressure stabilizer with differential connection of damping chambers to the pipeline. Estimated necessary constructional sizes of perforations in the main pipe and node connection.

Keywords: design of pressure regulator, mathematical modeling, calculations of parameters of air volume, pressure and perforation elements.

Герасимов Г. Г., к.т.н., доцент; Герасимов Е. Г., к.т.н., доцент, Иванов С. Ю. ассистент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАБИЛИЗАТОРА ДАВЛЕНИЯ

Рассмотрена конструкция и принцип действия стабилизатора давления. Показана методика определения основных параметров стабилизатора давления с дифференциальным узлом присоединения демпфирующих камер к трубопроводу. Выполненная оценка необходимых конструктивных размеров перфорации в магистральном трубопроводе и узле присоединения.

Ключевые слова: конструкция стабилизатора давления, математическое моделирование, расчеты объема воздуха, давления и параметров перфорации элементов.