

УДК 621.311

**Веремчук А. І., к.т.н., доцент, Сунічук С. В., к.т.н., ст. викладач**  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ В НАПІРНИХ ВОДОПРОВІДНИХ СИСТЕМАХ З ПНЕВМАТИЧНИМИ РЕЗЕРВУАРАМИ ЧИСЕЛЬНИМ МЕТОДОМ**

**Пропонується чисельний метод розрахунку коливальних процесів у пневматичних зрівнювальних резервуарах напірних водопровідних систем з використанням ЕОМ. Наведені порівняльні результати аналітичних розрахунків і лабораторних досліджень. Ключові слова: гідравлічний удар, пневматичний резервуар, рівень рідини, напірна система.**

Однією з основних задач підвищення темпів розвитку економіки на базі прискорення науково-технічного прогресу є розробка технічно-досконалих енергетичних водопровідних напірних систем.

При експлуатації таких систем досить часто спостерігаються випадки руйнування трубопроводів. Однією з причин цього руйнування є гідравлічний удар, що виникає в напірних системах при маневруванні запірно-регулюючою арматурою та режимами роботи агрегатів.

Ефективність роботи напірних енергетичних систем значною мірою залежить від правильності їх проектування. Актуальним є умова забезпечення надійної роботи водопровідних трактів, зокрема, захист напірних систем від гідравлічних ударів. Порівняно з іншими засобами боротьби з цим негативним явищем, достатньою надійністю і простотою конструкції зарекомендували себе зрівнювальні пневматичні (водоповітряні) резервуари. Наразі не існує єдиної методики розрахунку параметрів резервуарів і рекомендацій щодо місця їх приєднання до магістральних і тупикових трубопроводів напірних систем. Оскільки в основу розрахунків закладаються різні умови, параметри резервуарів, визначені за різними методиками, різняться в декілька разів для однієї і тієї ж системи.

Для України актуальним є використання гідроенергетичного потенціалу малих річок [1]. Для цього необхідне будівництво комплексних гідровузлів регіонального призначення, зокрема, дериваційних, де забезпечується мінімальне затоплення цінних земельних площ. До скла-

ду таких гідровузлів входять зрівнювальні резервуари. Потребують захисту від гідравлічних ударів трубопроводи систем водопостачання.

Основними рівняннями коливання мас рідини [2, 3] в напірних водопровідних системах з пневматичними резервуарами є рівняння стиску газів, рівняння інерції та рівняння нерозривності потоку, які аналогічні рівнянням розрахунку систем з циліндричними відкритими зрівнювальними резервуарами [4].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{g}{L} \left( -z + h_w - \frac{V^2}{2g} + \frac{P_a - P_p}{\rho g} \right); \quad (1)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_p}{F} = \frac{Q_{mp} - Q_n}{F} = \frac{Vf - Q_n}{F}; \quad (2)$$

$$P_{pn} W_{pn}^n = P_p W_p^n, \quad (3)$$

де  $V$  – швидкість руху рідини в трубопроводі;  $t$  – час;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $L$  – довжина трубопроводу;  $z$  – положення рівня рідини в резервуарі;  $h_w$  – втрати напору в трубопроводі;  $f$  – площа поперечного перерізу трубопроводу;  $F$  – площа поперечного перерізу резервуару;  $P_a$  – атмосферний тиск;  $P_{pn}$  і  $P_p$  – початковий і кінцевий тиск в резервуарі;  $W_{pn}$  і  $W_p$  – початковий і кінцевий об'єм повітря в резервуарі;  $n$  – показник політропи;  $Q_{mp}$  – витрата рідини в трубопроводі;  $Q_p$  – витрата рідини, яка втікає в резервуар;  $Q_n$  – витрата, яка протікає повз резервуар.

Динамічне рівняння (1) отримане за рівнянням Бернуллі для неусталеного руху рідини, складеного для перерізів 1-1 та 2-2 (рис. 1).

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w + \frac{1}{g} \frac{dQ}{dt} \int \frac{dL}{dt}.$$

Вираз (2) є рівнянням нерозривності потоку. Він складений для вузла з'єднання резервуару з трубопроводом та з урахуванням прийнятого напрямку осей.

$$Q_{mp} = Q_p + Q_n = F \frac{dz}{dt} + Q_n.$$

Втрати напору в системі включають: втрати напору в трубопроводі (довжиною та місцеві); місцеві втрати у вузлі з'єднання резервуару з трубопроводом; швидкісний напір, які визначаються відповідними коефіцієнтами місцевих опорів  $\psi$ ,  $\xi$  і  $\xi_e$ .

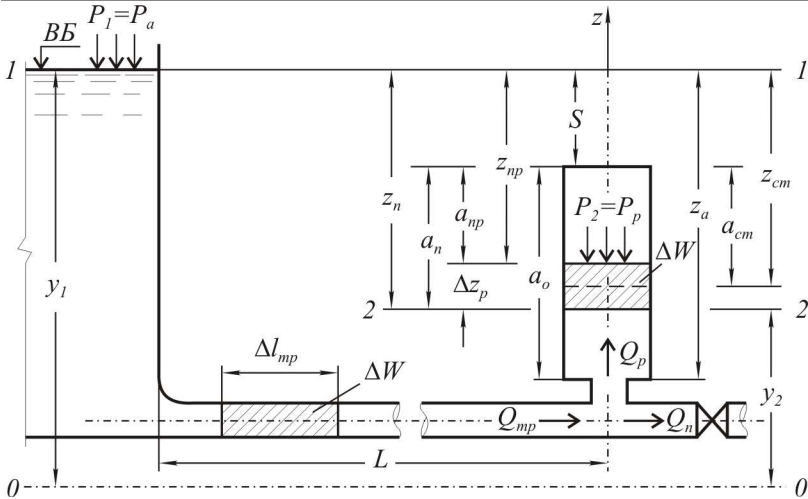


Рис. 1. Розрахункова схема

$$h_w = (\psi + \xi) \frac{V|V|}{2g} + \xi_g \frac{(V - V_n)|V - V_n|}{2g} + \frac{V^2}{2g} . \quad (4)$$

При виводі основних рівнянь переріз трубопроводу приймався постійним, вода і стінки трубопроводу нестиснені, інерційні сили у пневматичному резервуарі не враховувались, втрати напору визначались за законами усталеного руху. Зміна витрати  $Q_n$ , що споживається, приймалась лінійною за час закриття  $T_s$  запірного органу.

Спільний розв'язок рівнянь (1)–(3) проводиться чисельним методом з використанням ЕОМ.

Оскільки переріз резервуару приймається постійним – об'єм повітря в ньому пропорційний висоті повітряної подушки

$$\bar{P}_p = \bar{P}_{pn} \left( \frac{a_{pn}}{a_p} \right)^n , \quad (5)$$

Надлишковий тиск в резервуарі визначається виразом

$$\rho g H_p = \bar{P}_p - P_a = \bar{P}_{pn} \left( \frac{a_{pn}}{a_p} \right)^n - P_a ,$$

або в метрах водяного стовпа

$$H_p = \bar{H}_{pn} \left( \frac{a_{pn}}{a_p} \right)^n - H_a = \left( \frac{a_{pn}}{a_p} \right)^n (-z_n - h_w + H_a) - H_a .$$

Оскільки

$$a_{pn} = S - z_n \quad \text{і} \quad a_p = S - z ,$$

розрахункові залежності після перетворень набувають такого вигляду

$$\frac{dQ_{mp}}{dt} = \frac{gf}{L} \left( -z - h_0 - h_p - \frac{Q_{mp}^2}{2gf^2} - H_p \right); \quad (6)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{F} (Q_{mp} - Q_n); \quad (7)$$

$$H_p = \left( \frac{S - z_n}{S - z} \right)^n \left( -z_n - h_{0n} - \frac{Q_{0n}^2}{2gf^2} + H_a \right) - H_a. \quad (8)$$

Інтегрування наведених рівнянь, з урахуванням початкових умов, приводить до послідовності обчислень через інтервал часу  $\Delta t$  від початкового моменту  $t_i = t_0 = 0$ , що відповідає усталеному режиму роботи напірної водопровідної системи. Під кінець розрахункового періоду  $t_i = t_{i-1} + \Delta t$  послідовно вираховуються:

а) витрата, що споживається  $Q_{ni}$

- при  $t < T_s$ ,  $Q_{ni} = Q_{ni}(1 - t_i/T_s)$ ;

- при  $t \geq T_s$ ,  $Q_{ni} = 0$ .

б) витрата  $Q_p$ , що втікає в резервуар

- при  $t < T_s$ ,  $Q_{pi} = Q_{mpi} - Q_{ni}$ ;

- при  $t_i \geq T_s$ ,  $Q_{pi} = Q_{pi-1}$ .

в) приріст рівня рідини  $\Delta z_{pi}$  в резервуарі

$$\Delta z_{pi} = \frac{Q_{pi}}{F} \Delta t.$$

г) положення рівня рідини  $z$  в резервуарі відносно рівня рідини в верхньому б'єфі

$$z_i = z_{i-1} + z_i.$$

д) приріст витрати  $\Delta Q_{mp}$  в трубопроводі

$$\Delta Q_{mp} = \frac{gf}{L} \Delta t \left( -z_i - \kappa_{mp} Q_{mpi-1} |Q_{mpi-1}| - \kappa_p |Q_{pi}| \cdot |Q_{pi}| - \frac{Q_{mpi-1}^2}{2gf^2} - H_{pi-1} \right),$$

де  $\kappa_{mp}$  – коефіцієнт гідравлічного опору трубопроводу;

$k_p$  – коефіцієнт гідравлічного опору вузла з'єднання резервуару з трубопроводом.

е) витрата в трубопроводі  $Q_{mpi}$

$$Q_{mpi} = Q_{mpi-1} + \Delta Q_{mp} .$$

є) Надлишковий тиск  $H_{pi}$  в резервуарі в м. вод. ст.

$$H_{pi} = \left( \frac{S - z_n}{S - z_i} \right)^n \left( -z_n - h_w - \frac{Q_{mpn}^2}{2gf^2} + H_a \right) - H_a .$$

ж) тиск  $H_{pi}$  у вузлі з'єднання резервуару з трубопроводом

$$H_{pi} = H_{pi} + \kappa_p Q_p |Q_p| .$$

В наведеному алгоритмі ( $i-1$ )-й стан системи відповідає моменту часу  $t$ , а  $i$ -й, моменту часу  $t + \Delta t$ . За початковий приймається стан системи при усталеному режимі коли згідно з (8)

$$H_{pn} = \left( \frac{S - z_{cm}}{S - z_n} \right)^n \left( -z_n - h_{wn} - \frac{Q_{mpn}^2}{2gf^2} + H_a \right) - H_a , \quad (9)$$

де  $H_{pn}$  – тиск в резервуарі, який відповідає усталеному режиму і визначається за попередньо прийнятими розмірами та висотному положенню пневматичного резервуару відносно рівня рідини верхнього б'єфу.

Перетворивши останній вираз, отримаємо

$$S - z_n = (S - z_{cm}) \sqrt[3]{\frac{-z_{cm} + H_a}{-z_n - h_{mpn} + \frac{Q_{mpn}^2}{2gf^2} + H_a}} . \quad (10)$$

Отриманий вираз дозволяє визначити початкове положення рівня рідини  $z_n$  в резервуарі відносно рівня рідини у верхньому б'єфі при усталеному режимі роботи напірної водопровідної системи. Його можна розв'язувати методом підбору або графоаналітичним методом. Дане рівняння можна також отримати за рівнянням стану газів

$$(H_{pn} + 10)(S - z_n)^n = (H_{pcm} + 10)(S - z_{cm})^n ,$$

де

$$H_{pcm} = -z_{cm} ;$$

$$H_{pn} = -z_n - h_{mp} + \frac{Q_{mpn}^2}{2gf^2}.$$

Відповідно викладеному складена програма розрахунку перехідних процесів на ЕОМ в напірних водопровідних системах з пневматичними резервуарами, структурна схема якої наведена на рис. 2.

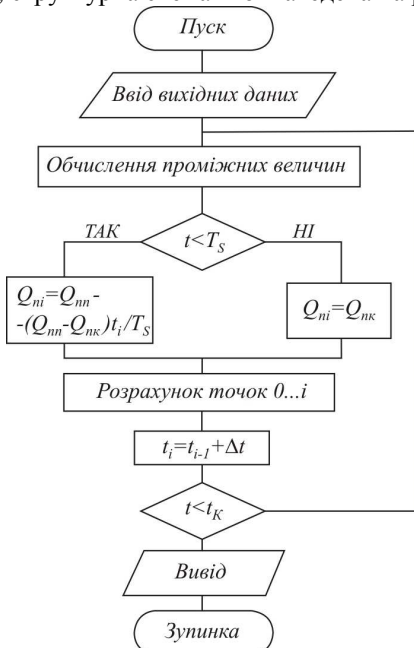


Рис. 2. Блок-схема програми розрахунку коливальних процесів

В практиці проектування та експлуатації напірних водопровідних систем з періодично спорожнюючими трубопроводами доцільно передбачати установку самозарядних пневматичних резервуарів. Це оправдане для випадку великого вмісту повітря у водному потоці, що спостерігається в багатьох системах. В цьому випадку початкове положення рівня рідини  $z_n$  в резервуарі визначається залежністю (10), за умови стиску защемленого об'єму повітря в резервуарі. Тут за вихідну кількість повітря необхідно приймати стиснений атмосферним тиском повний об'єм повітря в резервуарі, що відповідає висоті повітряної подушки  $a_0$  (рис. 1), а положення рівня рідини  $z_0$  на відмітці нижньої площини пневматичного резервуару. Тоді вираз (10) набуває такого

вигляду

$$S - z_n = (S - z_0) \sqrt{\frac{-z_0 + H_a}{-z_n - h_{mnp} + \frac{Q_{mnp}^2}{2gf^2} + H_a}}$$

Розроблена програма розрахунку параметрів перехідних процесів в напірній системі з пневматичним резервуаром може використовуватись при розрахунках чисельним методом за відомими параметрами системи, а також і для обробки експериментальних досліджень та їх порівняння.

Для оцінки точності одержаних розв'язків на кафедрі гідроенергетики та гідромашин виконані експериментальні дослідження на двох /великій і малій/ лабораторних установках.

Експериментальні установки різні, як за напором, так і за витратою, включають металеві трубопроводи діаметром 100 і 50 мм, довжиною 96 і 50 м відповідно. Установки обладнані відцентровими насосами та відкритими резервуарами, чим забезпечувався постійний статичний напір і швидкості руху рідини в трубопроводах. Вузли з'єднання пневматичних резервуарів з трубопроводами мали таку конструкцію, яка дозволяла змінювати коефіцієнт опору на вході в резервуар за допомогою звужуючих діафрагм. Резервуар великої установки був обладнаний п'єзометром для візуальної фіксації коливальних рівнів, а резервуар малої установки виконаний прозорим із органічного скла. Контроль за зміною тисків в резервуарах проводився за допомогою комплексу контрольно-виміральної апаратури.

№ дос- ліду	Коефіцієнт опору на вході в резервуар	Максимальний підйом рівня в резервуарі, м	
		За даними розрахунку	За експериментальними дослідженнями
Велика установка			
1	2,3	0,138	0,135
2	10	0,137	0,134
3	50	0,127	0,120
4	143	0,097	0,094
Мала установка			
1	3	0,171	0,161
2	7,6	0,166	0,154
3	37	0,130	0,122
4	106	0,088	0,087

В таблиці наведені результати експериментальних досліджень для дослідів з різним коефіцієнтом опору на вході в резервуар які порівнюються з результатами розрахунку на ЕОМ.

Як видно з таблиці відхилення результатів експериментальних досліджень та вирішень чисельним методом складає 1...6%, що дозволяє рекомендувати запроповану методику розрахунку параметрів коливальних процесів в напірних системах з пневматичними зрівнювальними резервуарами в інженерній практиці та дослідницькій роботі.

1. Природні багатства Закарпаття / Упоряд. В. Л. Боднар – Ужгород : Карпати, 1987. – 284 с. 2. Крисенков М. І., Веремчук А. І., Добровольський В. С. та інш. Використання ЕОМ при вивченні розділу нестационарних режимів роботи гідроелектростанцій зі зрівнювальними резервуарами // Наук.-метод. Зб. Технологія навчання. – Рівне, 1997. – С. 71-76. 3. Крисенков М. І., Веремчук А. І., Добровольський В. С. Математичне моделювання перехідного процесу в напірних системах із зрівнювальними резервуарами в умовах навчальних занять // Зб. доп. міжн. наук.-техн. конф. «Новітні технології навчання у вищих та середніх учбових закладах». – Рівне, 1995. – С. 61. 4. Орлов В. А. Уравнительные резервуары гидроэлектростанций. – М. : Энергия, 1968. – 180 с.

Рецензент: д.т.н., професор Рябенко О. А. (НУВГП)

---

**Veremchuk A. I., Candidate of Engineering, Associate Professor,  
Sunichuk S. V., Candidate of Engineering, Senior Lecturer** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

**DETERMINATION OF OSCILLATORY PROCESSES  
PARAMETERS IN COMPRESSED-AIR SURGE TANK OF WATER  
PRESSURE SYSTEMS WITH PNEUMATIC TANKS BY  
NUMERICAL METHOD**

**The numerical method of calculation of oscillatory processes in compressed-air surge tank of water pressure systems is offered with computer use. Analytical calculations are compared to results of laboratory researches.**

**Key words: water hammer, compressed-air surge tank, liquid level, water pressure system.**

---



**Веремчук А. И., к.т.н., доцент, Суничук С. В., к.т.н., ст. преподаватель** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В НАПОРНЫХ ВОДОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ С ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ РЕЗЕРВУАРАМИ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ**

**Предлагается численный метод расчета колебательных процессов в пневматических уравнительных резервуарах напорных водопроводных систем с использованием ЭВМ. Сравниваются аналитические расчеты с результатами лабораторных исследований. Ключевые слова: гидравлический удар, пневматический резервуар, уровень жидкости, напорная система.**

---