

VI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ ГІДРОЕНЕРГЕТИКІВ

УДК 621.311

СУНІЧУК С.В., канд. техн. наук, доцент,
ВЕРЕМЧУК А.І., канд. техн. наук, доцент,
Національний університет водного
господарства та природокористування, м. Рівне



СУНІЧУК С.В.



ВЕРЕМЧУК А.І.

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

доповідь на VI Міжнародній конференції
"Світові тенденції та перспективи розвитку гідроенергетики України"
(14–15 березня 2013 р., Україна, м. Рівне)

Пропонується чисельний метод розрахунку коливальних процесів у пневматичних зрівнювальних резервуарах напірних водопровідних системах з використанням ЕОМ. Наведені порівняльні результати аналітичних розрахунків і лабораторних досліджень.

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

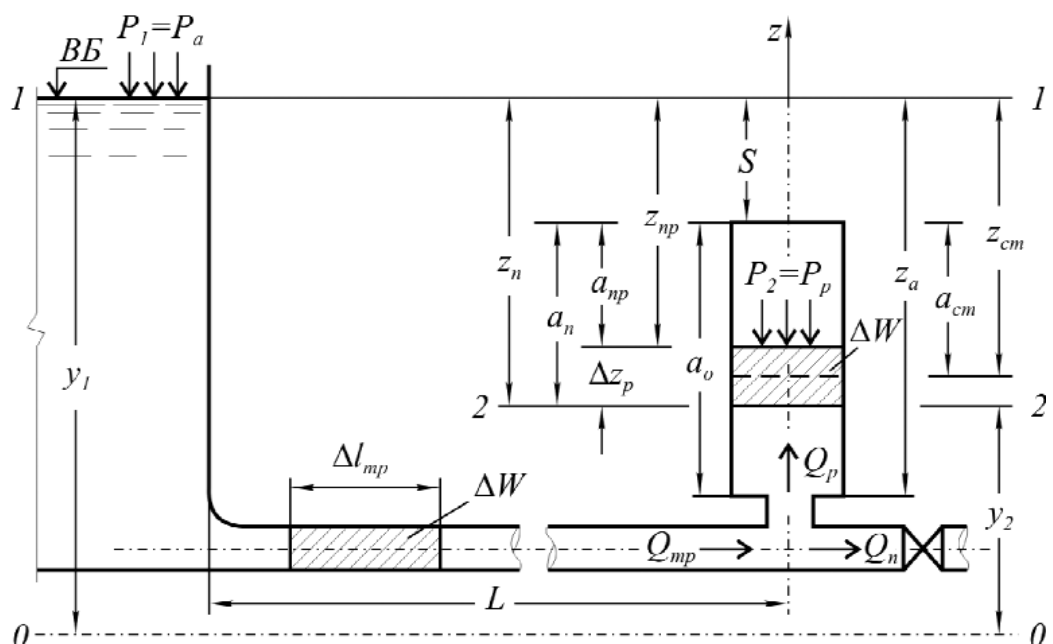


Рис. 1. Розрахункова схема.



гідроенергетичного потенціалу малих річок [1]. Для цього необхідне будівництво комплексних гідровузлів регіонального призначення, зокрема, дериваційних, де забезпечується мінімальне за-топлення цінних земельних площ. До складу 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 ψ , ξ і ξ_g .

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

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

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

розрахункові залежності після перетворень набувають такого вигляду

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

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

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

Інтегрування наведених рівнянь, з урахуванням початкових умов, приводить до послідовності обчислень через інтервал часу Δt 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 враховуються:

а) витрата, що споживається Q_{ni}

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



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

в) приріст рівня рідини Δz_{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

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

д) приріст витрати ΔQ_{mp} в трубопроводі

$$\Delta Q_{mp} = \frac{gf}{L} \Delta t \left(\begin{array}{l} -z_i - k_{mp} Q_{mpi-1} |Q_{mpi-1}| - \\ -k_p |Q_{pi}| \cdot |Q_{pi}| - \frac{Q_{mpi-1}^2}{2gf^2} - H_{pi-1} \end{array} \right)$$

де k_{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 метрах водного стовпа:

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

ж) тиск у вузлі з'єднання резервуару з трубопроводом

$$H_{pi} = H_{pi} + k_p Q_p |Q_p|.$$

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

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

Отриманий вираз дозволяє визначити почат-

кове 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.

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 в резервуарі

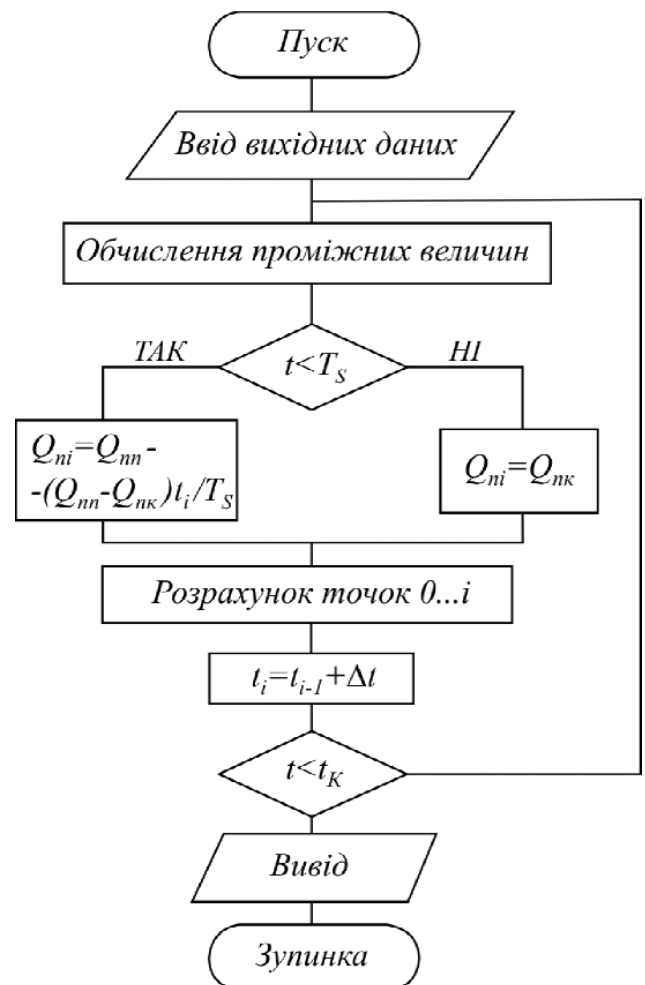


Рис. 2. Блок-схема програми розрахунку коливальних процесів



Таблиця 1.

№ досліджу	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

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 (Рис. 1), а положення рівня рідини на відмітці нижньої площини пневматичного резервуару. Тоді вираз (10) набуває такого вигляду

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

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 коливань рівнів, а резервуар малої установки виконаний прозорим із органічного скла. Контроль за зміною тисків в резервуарах проводився за допомогою комплексу контрольно-вимірювальної апаратури.

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 пропоновану методику розрахунку параметрів коливальних процесів в напірних системах з пневматичними зрівнювальними резервуарами в інженерній практиці та дослідницькій роботі.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Природні багатства Закарпаття / Упоряд. В.Л. Боднар* — Ужгород: Карпати, 1987. — 284 с.
2. *Крисенков М.І., Веремчук А.І., Добровольський В.С. та інші.* 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.

© Сунічук С.В., Веремчук А.І., 2014

