УДК 628.12 : 62.503.56

Косінов В. П., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ВСТАНОВЛЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА РОБОЧИХ НАСОСІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОЇ ПОДАЧІ ВОДИ СИСТЕМОЮ «НАСОСНА СТАНЦІЯ – ВОДОВІД» ПРИ УМОВІ АВАРІЇ НА ВОДОВОДІ

Наведено результати теоретичного дослідження критерію оптимальності числа робочих агрегатів насосної станції водопостачання при спільній роботі системи «насос-водовід» при умові виникнення аварії на водоводі. Встановлено характер впливу конструктивних характеристик водоводу (кількість паралельних ниток і переключень між ними), насосної станції (паспортні характеристики насосів), головних експлуатаційних показників водоводу (ступінь зниження розрахункової подачі води по водоводу) на координати «оптимальної робочої точки Q-H і Q-N – характеристик насосів у разі, коли на водоводі виникає аварія.

***Ключові слова*: насос, водовід, надійність, гідравлічний опір труб, розрахункова подача води водоводом, аварія, система подачі та розподілення води.**

Як відомо із практики проектування нових, та при проведенні реконструкції вже діючих СПРВ (систем подачі та розподілу води) сучасних населених пунктів дуже важливим завданням, що постає перед фахівцями є вибір оптимального числа робочих насосних агрегатів насосних станцій, які безпосередньо живлять водоводи та водопровідні мережі (трубопровідні системи). При цьому слід враховувати безліч впливових факторів, головними із яких є економічна робота насосів та безперервна подача води в трубопровідну систему, навіть якщо на ній виникають аварії (відмови).

У разі «безбаштової» схеми живлення СПРВ завжди розглядають сумісну роботу споруд системи «насосна станція – водовід – водопровідна мережа». При цьому, задаються гідравлічними параметрами такої системи у її проектному, розрахунковому режимі. Але, враховуючи особливу «схильність» трубопроводів, які працюють під напором в умовах багатоточкового розбору води до виникнення потоку аварій на них слід обов’язково забезпечувати надійну подачу води до мережі за допомогою підсистеми «насоси – водовід», яка принаймні

гарантуватиме надійне (безперебійне) надходження води до водопровідної мережі. Тут виникає принаймні два великих завдання, які потрібно вирішити для надійного транспортування води до мережі.

По-перше, це надійна і безперебійна та економічна експлуатація водоводу, а по-друге, вибір оптимальної кількості робочих насосних агрегатів для участі у сумісній роботі споруд системи «насоси – водовід».

Дослідження багатьох фахівців (Абрамов М.М. [1], Хоружий П.Д. [2; 3], Ткачук О.А. [8; 17], Ільїн Ю.О. [4], Белозеров Н.П. [5], Орлов В.О. [6; 7] та ін.) показують, що найбільш ефективним методом забезпечення експлуатаційної та структурно-конструктивної надійності водоводів є їх резервування шляхом прокладання в декілька ліній (ниток), та улаштування перемичок між цими нитками.

Удосконаливши алгоритм підвищення економічності роботи водоводів, прокладених у декілька ниток, Хоружий П.Д запропонував чіткий алгоритм встановлення числа перемикань між нитками, який дозволяє досить простим розрахунком визначати їхню оптимальну кількість $К_{пер}$ [2; 8].

Однак, отримані ним розрахункові залежності є громіздкими, незручними для практичних розрахунків і при цьому не дають можливість аналізу впливу числа перемикань $К_{пер}$ на гідравлічні характеристики як самого водоводу, так і насосної станції, що знаходиться з ним у гідравлічному взаємозв'язку, а також його впливу на надійність водоводу.

Тому з метою усунення цього недоліку алгоритму нами був запропонований алгоритмічний аналіз отриманих Хоружим П.Д. залежностей та запропоновані практичні числові коефіцієнти, які надавали б фахівцям із проектування практичні рекомендації щодо забезпечення надійності водоводу та вибору оптимального числа робочих насосів для подачі води в мережу [9; 10].

Відповідно до рекомендацій Хоружого П.Д. [2; 3; 8] і Ткачука О.А. [12; 17] аналітична залежність для визначення кількості ремонтних ділянок, на які поділяють перемикання між нитками кожну нитку водоводу,

$$K_{рем.} = \frac{\alpha_{ав}^2 \cdot S_в \cdot \left(2 \cdot m_{вод.} - 1\right)}{\left(1 - \alpha_{ав}^2\right) \cdot \left(m_{вод} - 1\right)^2 \cdot \left(S_{ф.гр.} + S_k + S_в\right)}, \qquad (1)$$

де $\alpha_{ав}$ – коефіцієнт аварійного зниження подачі води водоводом у період аварії на одній із ниток, та визначається співвідношенням

$$\alpha_{ав.} = \frac{Q_{в.ав}}{Q_в}, \qquad (2)$$

де $Q_в, Q_{в.ав.}$ – відповідно «розрахункова» і «аварійна» подача води водоводом;

$m_{вод.}$ – кількість ліній («ниток») водоводу;

$S_в$ – повний розрахунковий гідравлічний опір водоводу, що визначається для водоводу прокладеного у кілька ліній $m_{вод}$, і який працює в заданому «розрахунковому» режимі експлуатації, як

$$S_в = \frac{A_{пит.} \cdot L_в}{m_{вод.}^2}, \qquad (3)$$

де $A_{пит.}$ – питомий гідравлічний опір одної нитки водоводу, який напряму залежить від конструктивних особливостей улаштування кожної лінії (матеріал та шорсткість внутрішніх стінок труб), і може бути прийнятий за рекомендаціями Шевелева Ф.О. [11];

$L_в$ – фактична довжина одної нитки, м (може бути прийнята за технічною документацією, проектом, або визначена в натурних умовах в процесі досліджень);

S_k – повний гідравлічний опір внутрішньостанційних комунікацій насосної станції, що приймаються відповідно до проекту насосної станції або встановлюються експериментальним шляхом за допомогою натурних досліджень [2; 12; 17];

$S_{ф.гр.}$ – гідравлічний опір, який створюватимуть насоси, працюючи у відповідному зв'язку, який можна цілком з високим ступенем довіри визначати за їхньою аналітичною характеристикою [9].

З метою встановлення оптимального числа робочих насосів насосної станції, розв'яжемо рівняння виду (1) відносно величини $S_{ф.гр.}$.

Після кількох етапів перетворень остаточно отримаємо залежність

$$S_{ф.гр.} = S_в \cdot \left[\frac{\alpha_{ав}^2 \cdot (m_{вод} - 1)}{K_{рем.} \cdot (1 - \alpha_{ав.}^2) \cdot (m_{вод.} - 1)^2} - 1 \right] - S_k. \qquad (4)$$

Для спрощення форми отриманої аналітичної залежності введемо деякі заміни:

$k_{\alpha_{ав}}$ – коефіцієнт, що залежить суто від рівня зниження подачі води водоводом, визначається як

$$k_{\alpha_{ав}} = \frac{\alpha_{ав.}^2}{1-\alpha_{ав.}^2}, \tag{5}$$

і є константою для будь-якого водоводу, що розглядається, та залежить від категорії надійності системи водопостачання. Він може прийматися за нашими рекомендаціями [10].

$k_{m_{вод.}}$ – коефіцієнт, що залежить від числа ліній (ниток) водоводу, також є сталим для водоводу, що розглядається, аналітично визначається як

$$k_{m_{вод.}} = \frac{2 \cdot m_{вод.} - 1}{\left(m_{вод.} - 1\right)^2}. \tag{6}$$

Так, у разі $m_{вод.} = 2$ він може бути чисельно прийнятий за нашими рекомендаціями для $k_{m_{вод.}} = 3$;

$k_{р.д.}$ – коефіцієнт, який залежить від рекомендованого числа перемикань між нитками $K_{пер.}$, відповідно і кількості «ремонтних ділянок», на які поділено водовод перемиканнями та, опосередковано, залежить від довжини ниток водоводу $L_в$.

Аналітично він є оберненою величиною до кількості ремонтних ділянок водоводу $K_{рем.}$

$$k_{р.д.} = \frac{1}{K_{рем.}}. \tag{7}$$

Пропонується його визначати за нашими рекомендаціями [10] .

Остаточно отримаємо аналітичний вигляд модельної залежності для визначення повного опору насосної станції, який в ній створює група насосів, яка безпосередньо живить систему «насоси – водовід»

$$S_{ф.гр.} = S_в \cdot \left(k_{\alpha_{вп.}} \cdot k_{m_{вод.}} \cdot k_{р.д.} - 1\right) - S_k. \tag{8}$$

Як показує аналіз залежності (8) добуток у дужках може ідентифікуватися як комплексний коефіцієнт конструктивної і експлуатаційної надійності водоводу і може розглядатися як коефіцієнт готовності во-

доводу, аналітично пропонується його визначати

$$K_{г.в.} = k_{\alpha_{вп.}} \cdot k_{m_{вод.}} \cdot k_{р.д.}. \quad (9)$$

Цей комплексний коефіцієнт повинен завжди бути більшим за одиницю, і залежить від конструктивних (матеріал труб, довжина ниток водоводу) так і структурних характеристик (кількість перемикань між нитками) та надійнісних характеристик (допустима величина зниження подачі води по водоводу $\alpha_{вп.}$) та є сталим для окремо розглянутого водоводу.

Нами запропоновано також рекомендації щодо його числового значення для водоводів різних діаметрів ($D_{в.}$), числа ниток ($m_{вод.}$) і величини рекомендованого зниження подачі води ($\alpha_{вп.}$), де $S_{ф.i}$ – гідравлічний аналітично отриманий опір одного із *i*-однотипних насосів, який за рекомендаціями [2; 8; 12; 17] визначається за паспортною $Q-H$ – характеристикою насоса і для його «робочої зони»

$$S_{ф.i} = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}, \quad (11)$$

де Q_1, Q_2 – відповідно подача одного однотипного насоса у «робочій зоні»,м^3/год;

H_1, H_2 – те саме напори, м, що відповідають відповідним Q_1 та Q_2 подачам і-го типу насоса (рис. 1).

Виходячи із отриманої теоретичним шляхом аналітичної характеристики насосів [9], відомо, що величина опору $S_{ф.гр.}$ залежить від числа робочих агрегатів, їхньої марки (в першу чергу однотипності) та схеми роботи на систему «насосна станція – водовід» (паралельна, послідовна).

Так, для окремого випадку роботи однотипних насосів у паралельному режимі (що є найбільш характерним для її живлення у разі відсутності водонапірної башти в складі СПРВ) Хоружим П.Д. та Ткачуком О.А. [2; 8; 12; 17] була отримана аналітична залежність

$$S_{ф.гр.} = \frac{S_{ф.i.}}{n_p^2}. \quad (10)$$

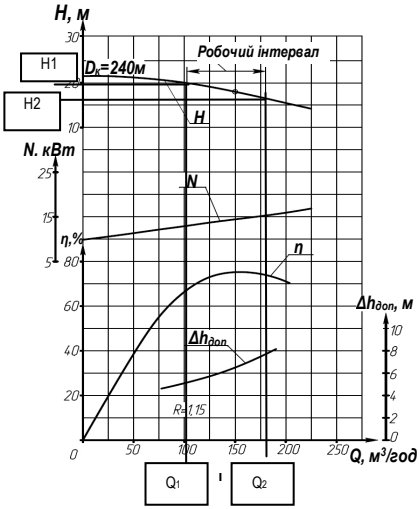

Рис. 1. Приклад аналітичних характеристик насоса Д250-125, n=1450 об/хв. та границі «робочого діапазону» Q-H-характеристики

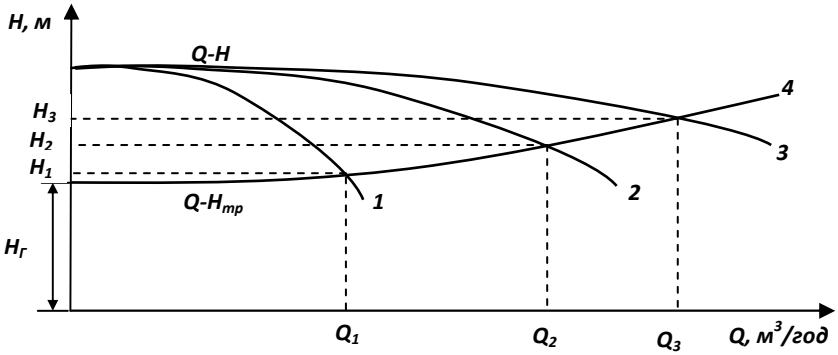

Рис. 2. Сумісні графіки паралельної роботи трьох насосів на систему трубопроводів:
1 – ***Q-H***-характеристика одного насоса; ***2*** – те ж, роботи двох насосів;
3 – те ж, трьох насосів; ***4*** – ***Q-H$_{тр}$***-характеристика трубопроводів

Зробивши відповідну підстановку (11) у рівняння (10), отримаємо:

$$S_{ф.гр} = \frac{H_1 - H_2}{\left(Q_2^2 - Q_1^2\right) \cdot n_p^2}. \qquad (12)$$

Звідки легко отримати аналітичний вираз для встановлення необхідного числа однотипних насосів, які повинні забезпечити надійну роботу водоводу

$$n_p^{опт} = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{S_{ф.гр} \cdot \left(Q_2^2 - Q_1^2\right)}}. \qquad (13)$$

Якщо підставити у залежність (13) отримане раніше (8), то рівняння набуває такого вигляду

$$n_p^{опт} = \sqrt{\frac{H_1 - H_2}{\left[S_в \cdot \left(K_{г.в.} - 1\right) - S_k\right] \cdot \left(Q_2^2 - Q_1^2\right)}}. \qquad (14)$$

ВИСНОВКИ: 1) Отримана аналітична залежність (14), яка дає змогу на практиці для заданого рівня надійності водоводу, вираженого через коефіцієнт його готовності $K_{г.в.}$ та враховуючи паспортні характеристики кожного насосного агрегату, встановлювати їхню оптимальну кількість ($n_p^{опт.}$), що забезпечить необхідний рівень надійності подачі води водоводом відповідно до установленої категорії надійності СПРВ.

2) Отримано практичні рекомендації щодо прогнозування змінюваності коефіцієнта готовності водоводу $K_{г.в.}$ залежно від його структурно-конструктивних особливостей та заданого рівня зниження подачі води по ньому у випадку аварій.

3) Отримані результати і модельні залежності дозволять фахівцям із проектування СПРВ забезпечити необхідний рівень надійності напірного водоводу, запроектувати оптимальне число робочих насосів насосної станції, яка працює для подачі води по водоводу і на стадії проектування нової СПРВ, так і на стадії реконструкції діючих водопровідних споруд.

1. Абрамов Н. Н. Надежность систем водоснабжения / Н. Н. Абрамов. – М. : Стройиздат, 1984. – 231 с. **2.** Хоружий П. Д. Расчет гидравлического взаимодействия водопроводных сооружений / П. Д. Хоружий. – Львов : Вища шк., 1984. – 152 с. **3.** Довідник по сільськогосподарському водопостачанню і каналізації / П. Д. Хоружий, В. О. Орлов, О. А. Ткачук, М. М. Гіроль та ін. ; за ред. Хоружого П. Д. – К. : Урожай, 1992. – 294 с. **4.** Ильин В. Г. Расчет совместной работы насосов, водопроводной сети и резервуаров / В. Г. Ильин. – К. : Госстройиздат УССР, 1963. **5.** Белозеров Н. П. Расчет систем водоснабжения с при-

менением вычислительной техники / Белозеров Н. П., Луговской М. В. – М. : Колос, 1973. – С. 248. **6.** Тугай А. М. Водопостачання: Підручник / А. М. Тугай, В. О. Орлов. – К. : Знання, 2009. – 735 с. **7.** Орлов В. О. Водопостачання та водовідведення: підручник / В. О. Орлов, Я. А. Тугай, А. М. Орлова. – К. : Знання, 2011. – 359 с. **8.** Хоружий П. Д. Водопровідні системи і споруди / П. Д. Хоружий, О. А. Ткачук. – К. : Вища школа, 1993. – 262 с. **9.** Косінов В. П. Визначення критеріїв оптимальності режимів роботи насоса на трубопровідну систему / В. П. Косінов // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Збірник наукових праць. – Рівне, 2007. – Вип. 31. – С. 372–377. **10.** Косінов В. П. Надійність систем водопостачання та водовідведення : навчальний посібник / В. П. Косінов, В. О. Орлов. – Рівне : Червінко А. В., 2013. – 228 с. **11.** Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. – М. : ООО «БАСТЕТ», 2008. – 352 с. **12.** Ткачук О. А. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. – Рівне : НУВГП, 2008. – 301 с. **13.** Насосы применяемые в мелиорации. Каталог насосов. – М. : Респ. ПТТ «Росоргтехводстрой». – 1988. – 229 с. **14.** ДБН В.2.5-74: 2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. – 280 с. **15.** ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. **16.** Хоружий П. Д. До питання розрахунку кількості і конструктивних елементів водопровідних мереж та водоводів з метою визначення їх надійності / П. Д. Хоружий, О. А. Ткачук, В. П. Косінов // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. – Вип. 20. – Львів : Вища школа, 1993. – С. 90–97. **17.** Ткачук О. А. Системи подачі та розподілення води населених пунктів: Навчальний посібник / О. А. Ткачук, В. П. Косінов, О. С. Новицька. – Рівне : НУВГП, 2011. – 273 с.

Рецензент: д.т.н., професор Орлов В. О. (НУВГП)

Kosinov V. P., Candidate of Engineering, Associate Professor (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

DEFINITION OF OPTIMUM NUMBER OF WORKING PUMPS FOR ENSURING RELIABLE WATER SUPPLY WITH «PUMP STATION – CONDUIT» SYSTEM ON CONDITION OF ACCIDENT ON THE CONDUIT

Results of theoretical research of criterion of an optimality of number of working units of pump station of water supply at collaboration of system «pump – conduit» are given and under a condition when on a conduit there is an accident. Nature of influence of constructive characteristics of a conduit (quantity of parallel threads and switchings

between them), and pump station of water supply is established to station (pump units's passport characteristics) of operational indicators of a conduit (extent of decrease in settlement water supply on a conduit) on coordinates «an optimum working point of Q-H and Q-N-characteristics of pumps in a case when there is an accident on a conduit.
***Keywords*: pump, water line, reliability, hydravlic resistance of pipes, the water supply is estimated that the water, accident, supply system for water distribution.**

Косинов В. П., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА РАБОЧИХ НАСОСОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ ПОДАЧИ ВОДЫ СИСТЕМОЙ «НАСОСНАЯ СТАНЦИЯ-ВОДОВОД» ПРИ УСЛОВИИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИИ НА ВОДОВОДЕ

Приведены результаты теоретического исследования критерия оптимальности числа рабочих агрегатов насосной станции водоснабжения при совместной работе системы «насос-водовод» и при условии, когда на водоводе возникает авария. Установлен характер влияния конструктивных характеристик водовода (количество параллельных ниток и переключений между ними), і насосної станции (паспортные характеристики насосов) експлуатационных показателей водовода (степень снижения расчетной подачи воды по водоводу) на координаты «оптимальной рабочей точки Q-H и Q-N-характеристик насосов в случае, когда на водоводе возникает авария.
***Ключевые слова*: насос, водовод, надежность, гідравлическое сопротивление труб, расчетная подача воды по водоводу, авария, система подачи и распределения воды.**