

Буравченко К. О.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ НАСОСНИМ АГРЕГАТОМ

У роботі розглянуто динаміку системи керування водопостачанням, і особливо, вплив параметрів трубопроводів на процес водопостачання, так як цьому питанню приділено не достатньо уваги. Показано, що трубопроводи додають запізнення у систему керування водопостачанням. Чим більше довжина трубопроводу, тим менш стійкою буде система керування.

**Ключові слова:** динаміка насосного агрегату, параметри трубопроводу, стійкість системи.

### 1. Вступ

Складовою частиною автоматизованої системи управління водопостачанням є насосна станція. Ядром насосної станції є насосний агрегат, який складається з електродвигуна та насосу. Насос створює напір. Напір — це різниця між повною енергією рідини на виході з насосу та на вході. Енергія, яка передається рідині створює тиск. В процесі водопостачання необхідно враховувати те, що вода практично не піддається стисненню в реальних технічних умовах експлуатації. Тому коливання тиску більші за норму для гідравлічної мережі будуть визивати негативні наслідки для обладнання та користувачів. Відповідно до [1] при різкій зміні тиску у трубопроводі виникає явище гідравлічного удару. Гідравлічний удар у більшості випадків в системі водопостачання несе негативні наслідки для роботи системи. Якісні показники водопостачання залежать від характеру перехідних процесів, які проходять при регулюванні параметрів насосного агрегату.

Важливим завданням при проектуванні системи керування водопостачанням є аналіз впливу параметрів насосних агрегатів та трубопроводів на динаміку роботи системи для забезпечення заданих якісних показників перехідного процесу. У роботі [2] проведено аналіз причин коливання тиску у трубопроводах і показано, що на процес водопостачання значно впливає загальна довжина трубопроводів та характер споживання води. Тому актуальною задачею є дослідження та аналіз динаміки процесу регулювання насосним агрегатом у системі водопостачання з включенням трубопроводу.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботах [3, 4] показано причини виникнення втрат води у трубопроводах за рахунок надлишкових величин тисків води. Для оцінки динаміки роботи систем водопостачання малих та великих міст застосовують математичні моделі, які бувають як лінійними [5], так і нелінійними [6] або стохастичними [7]. Проблему коливань тиску у трубопроводах автором роботи [3] запропоновано вирішувати за рахунок оптимального розташування засувки з необхідністю регулювання потоками у реальному часі. Так у роботі [8] показано, що за допомогою Scada системи та вимірювання значень тиску у контрольних точках

у реальному часі досягнуто зменшення витрати електричної енергії на 19–27 % за рахунок дискретного керування насосами. Взагалі проблемами зменшення витрат енергії на керування насосними агрегатами та зменшення витоків води присвячено багато робіт, зокрема [9, 10]. Наприклад, у роботі [11] запропоновано алгоритм оптимізації структури існуючих систем водопостачання на основі генетичних алгоритмів, де головним критерієм відбору є кінцева вартість труб. Хоча дослідження авторів розглянутих робіт спрямовано на вирішення широкого класу задач, але задачу визначення критичної довжини трубопроводів в плані стійкості системи керування практично не вирішено або не розглянуто в загалі. Тому необхідно дослідити вплив параметрів трубопроводу не тільки на вартість або точність керування системою водопостачання, а ще й на її стійкість.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

*Об'єкт дослідження* — процес водопостачання з артезіанських свердловин.

*Метою дослідження* є аналіз динаміки процесу регулювання насосним агрегатом та визначення таких параметрів системи автоматичного регулювання насосним агрегатом, при яких перехідний процес має аперіодичний характер.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати *такі задачі*:

- дослідити вплив параметрів трубопроводу на динаміку процесу водопостачання;
- визначити критичну довжину трубопроводів, при яких система водопостачання є стійкою.

### 4. Методи дослідження

Методи дослідження, використані в роботі, базуються на положеннях теорії автоматичного керування при дослідженні та аналізі систем керування.

### 5. Результати дослідження динаміки процесу регулювання насосним агрегатом

При проектуванні систем автоматичного керування водопостачанням об'єкта використовують контури

стабілізації тиску на виході з насосів. Недостатньо розглянуто питання впливу параметрів трубопроводів на якісні показники процесу передачі води користувачу, тому автор статті розглядає вплив трубопроводів на систему автоматичного керування водопостачанням.

Гідравлічна мережа характеризується наявністю транспортного запізнення, що показано у [12]. Тому в передаточну функцію введено запізнення:

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p^2 + T_2 p + k)} e^{-p\tau}, \quad T_1 = T_n T_{дв}, \quad T_2 = T_n + T_{дв}, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт підсилення системи;  $T_n$  – стала часу насоса;  $T_{дв}$  – стала часу двигуна;  $p$  – оператор диференціювання;  $e$  – стала Ейлера;  $\tau$  – величина запізнення.

Чисте запізнення виникає за рахунок нерівномірного розподілення тиску у трубопроводі. В залежності від відстані  $l$  між точкою подачі води та споживачем води величина  $\tau$  змінюється. Використання в системі водопостачання довгого трубопроводу призводить до того, що зміна тиску на кінці трубопроводу відбувається через деякий час  $\tau$ . Рівняння (1) має множник  $e^{-p\tau}$ , тому не є поліномом, а є трансцендентною функцією оператора  $p$  та має безліч коренів, тому що:

$$e^{-p\tau} = 1 - p\tau + \frac{p^2\tau^2}{2!} - \frac{p\tau^3}{3!} + \dots \quad (2)$$

Тому рівняння (2) можна розглядати як рівняння безкінечного ступеня. Знаходження коренів для такої системи є складним завданням.

Визначимо вплив трубопроводу на стійкість системи автоматичного керування водопостачанням. Для дослідження стійкості систем з запізненням зручно застосовувати критерій стійкості Найквіста. Амплітудно-фазо-частотна характеристика (АФЧХ) розімкненої системи в цьому випадку:

$$W(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau} = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \cdot e^{-j\omega\tau} = A(\omega) \cdot e^{j(\varphi(\omega) - \omega\tau)}, \quad (3)$$

де  $j$  – уявна одиниця;  $\omega$  – кутова частота;  $\varphi$  – фаза;  $A$  – амплітуда.

З виразу (3) видно, що запізнена ланка не змінює модуль  $A(\omega)$  АФЧХ розімкненої системи, а вносить лише додатковий негативний фазовий зсув  $\omega\tau$ , пропорційний частоті  $\omega$  з коефіцієнтом пропорційності, рівним часу запізнювання  $\tau$ . Для визначення критичного запізнення  $\tau_{кр}$  та критичної частоти  $\omega_{кр}$ , при яких система стає нестійкою, тобто коли годограф передаточної функції проходить через точку  $(-1, j_0)$ , запишемо рівняння:

$$W(j\omega_{кр}) \cdot e^{-j\omega_{кр}\tau_{кр}} = A(\omega_{кр}) \cdot e^{j[\varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр}]} = -1. \quad (4)$$

З рівняння (4) для амплітуд і фаз запишемо:

$$A(\omega_{кр}) = 1. \quad (5)$$

$$\varphi(\omega_{кр}) - \omega_{кр}\tau_{кр} = -\pi. \quad (6)$$

З рівнянь (5) та (6) знаходимо критичне запізнення:

$$\tau_{кр} = \frac{\varphi(\omega_{кр}) + \pi}{\omega_{кр}}. \quad (7)$$

В рівнянні (7) чисельник  $\varphi(\omega_{кр}) + \pi$  – це запас стійкості системи за фазою.

Застосуємо частотний аналіз для передаточної функції об'єкта, який складається з насосного агрегату та магістрального трубопроводу (1). Передаточну функцію можна представити у вигляді двох ланок: аперіодична ланка другого порядку та ланка чистого запізнення. Розкладемо аперіодичну ланку другого порядку на добуток двох аперіодичних ланок першого порядку:

$$W(s) = \frac{k}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1} \Rightarrow W(s) = \frac{k}{(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}. \quad (8)$$

Перейдемо в частотний домен:

$$W(j\omega) = \frac{k}{(jT_3\omega + 1)(jT_4\omega + 1)}. \quad (9)$$

Амплітуда тоді:

$$A = \frac{k}{\sqrt{T_3^2\omega^2 + 1}\sqrt{T_4^2\omega^2 + 1}}. \quad (10)$$

Так як амплітуда не залежить від чистого запізнення  $\tau$ , використаємо умову (5) і знайдемо  $\omega_{кр}$ . Прирівняємо (10) до одиниці:

$$A(\omega_{кр}) = \frac{k}{\sqrt{T_3^2\omega_{кр}^2 + 1}\sqrt{T_4^2\omega_{кр}^2 + 1}} = 1. \quad (11)$$

З рівняння (11) знаходимо  $\omega_{кр}$ :

$$k^2 = (T_3^2\omega_{кр}^2 + 1)(T_4^2\omega_{кр}^2 + 1), \quad x = \omega_{кр}^2. \quad (12)$$

$$T_3^2 T_4^2 x^2 + (T_3^2 + T_4^2)x + (1 - k^2) = 0. \quad (13)$$

З рівняння (13) визначаємо  $\omega_{кр}$ :

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\frac{-(T_3^2 + T_4^2) \pm \sqrt{(T_3^2 + T_4^2)^2 - 4T_3^2 T_4^2 (1 - k^2)}}{2T_3^2 T_4^2}}. \quad (14)$$

З рівняння (14) маємо дві  $\omega_{кр}$ . Для визначення  $\tau_{кр}$  використовуємо умову (7). З умови (7) бачимо, що на  $\tau_{кр}$  впливає тільки  $\omega_{кр}$ ,  $\tau_{кр}$  не залежить від амплітуди сигналу. Якщо запізнення в замкненій системі стає рівним або більшим ніж  $\tau_{кр}$ , то зворотний зв'язок

змінює знак і призводить до розбіжності перехідного процесу. Це означає, що при використанні трубопроводів, розповсюдження тиску, в яких запізнюються на величину більше ніж  $\tau_{кр}$  можлива нестійка робота системи автоматичного керування водопостачанням.

На основі проведеного аналізу промодельємо систему водопостачання і знайдемо  $\omega_{кр}$  та  $\tau_{кр}$ . Приклад:  $k = 26,41$ ;  $T_3 = 0,026$ ;  $T_4 = 0,231$ .

Використовуючи (14)  $\omega_1 = 3709,9$ . Другий корінь є від'ємним і його автор статті відкидає, тому що частота вхідного сигналу завжди має додатний знак. Визначимо критичне запізнення  $\tau_{кр}$ :

$$\tau_{кр} = \frac{\varphi(\omega_{кр}) + \pi}{\omega_{кр}} = \frac{\pi + (-\arctg(T_3\omega_{кр}) - \arctg(T_4\omega_{кр}))}{\omega_{кр}} = 0,0165 \text{ (с)}.$$

АФЧХ даної системи наведено на рис. 1.

Автор статті розглядає більш детально результат, який він отримав при моделюванні. За рахунок транспортного запізнення в системі фаза вихідного сигналу зміщена в порівнянні зі входом. Для компенсації запізнення по фазі зі зростанням частоти вхідного сигналу збільшується амплітуда.

Але якщо величина запізнення та частоти наближається до критичної точки, то зворотній зв'язок змінює знак з від'ємного на додатний і система стає нестійкою.

Розглянемо залежність швидкості розповсюдження тиску по трубопроводу від його параметрів. Із теоретичних основ гідравліки відомо, що відрізок трубопроводу характеризується наступними параметрами [12]:

$$\lambda = 0,11(k_e/d)^{0,25}, \quad (15)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт еквівалентного тертя;  $k_e$  – еквівалентна шорсткість трубопроводу;  $d$  – діаметр трубопроводу.

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5}, \quad (16)$$

де  $A$  – еквівалентне тертя трубопроводу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

$$h_{кв} = AlQ^2, \quad (17)$$

де  $h_{кв}$  – опір трубопроводу у квадратичній області;  $l$  – довжина трубопроводу.

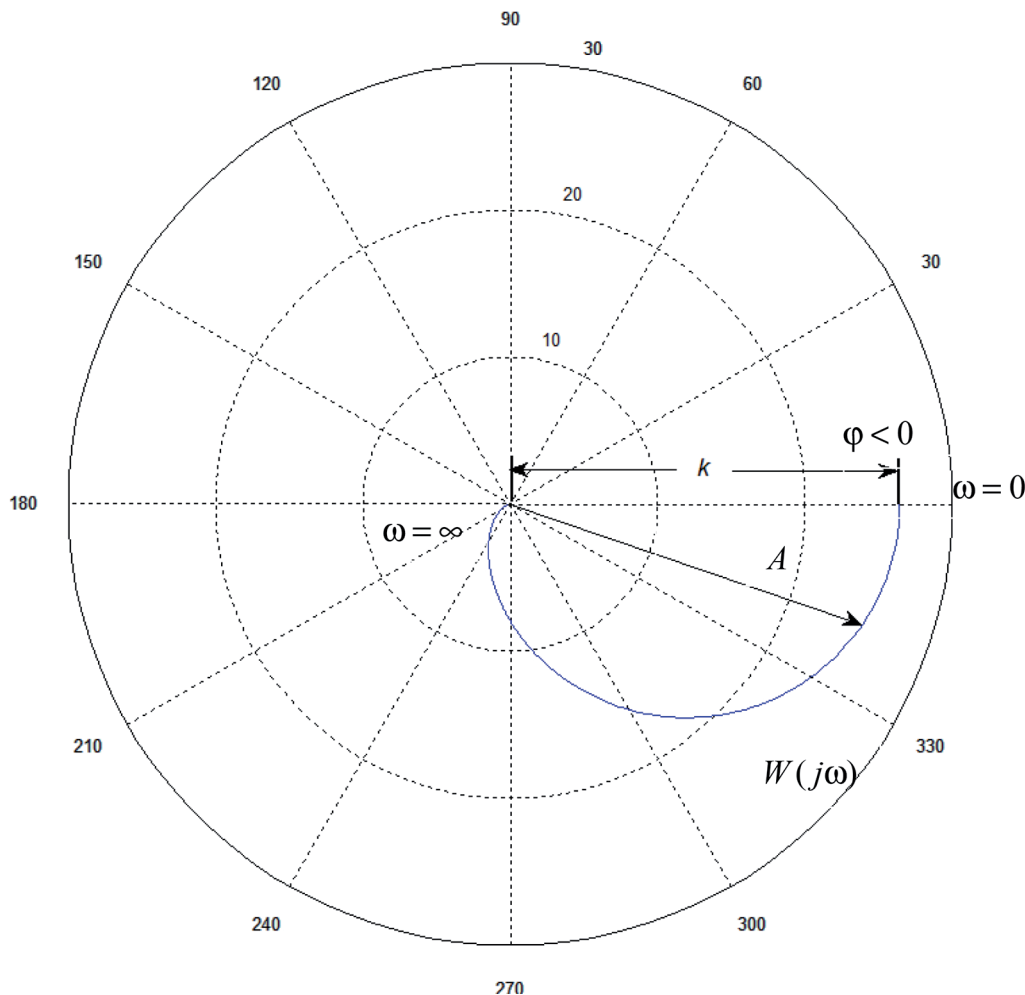


Рис. 1. Амплітудно-фазова характеристика автоматичної системи стабілізації тиску

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (18)$$

де  $v$  – швидкість потоку рідини у трубопроводі.

$$\Psi = \left(1 + \frac{68V}{vk_c}\right)^{0,25}, \quad (19)$$

де  $\Psi$  – поправка на неквадратичність;  $V$  – кінематична в'язкість рідини.

$$h = \Psi h_k, \quad (20)$$

де  $h$  – опір трубопроводу.

Автор статті розглядає систему стабілізації тиску на кінці трубопроводу. Для керування значенням тиску змінюють тиск на виході з насоса, що в свою чергу змінює тиск по всьому трубопроводу. Відомо, що швидкість розповсюдження хвиль тиску у пружному середовищі, при малих збурюваннях, чисельно рівна швидкості звуку (швидкості розповсюдження продольних хвиль) у цьому середовищі. Це означає, що зміна тиску в трубопроводі розповсюджується зі швидкістю звуку у воді.

Швидкість розповсюдження звуку для рідин визначається, як:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\beta\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (21)$$

де  $\beta = 1/E$  – коефіцієнт всебічного стискування середовища;  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – густина рідини.

Автором було прийнято припущення на те, що швидкість звуку у різних точках трубопроводу однакова. Трубопровід однорідний та немає крутих поворотів, тому хвилі розповсюджуються прямолінійно та рівномірно. Отже, критична довжина трубопроводу – це довжина, при якій система управління водопостачанням стає нестійкою, і визначається, як:

$$l_{кр} = \tau_{кр}v. \quad (22)$$

Залежність критичної довжини трубопроводу від величини запізнення (22) зображена на рис. 2.

При дуже стрімкій зміні швидкості потоку рідини у трубопроводі виникає гідравлічний удар. Гідравлічний удар буває як додатний, при закритті клапана, так і від'ємний – при відкритті. Явище гідроудару спростовує те, що рідина не стискається. Біля епіцентру гідро-

удару виникають ударні хвилі, які при розповсюдженні стискають рідину. Одним з перших явищ гідравлічного удару дослідив Жуковський Микола Єгорович. Жуковський довів, що швидкість поширення ударної хвилі знаходиться в прямопропорційній залежності від коефіцієнту стиснення рідини, величини деформації стінок трубопроводу, яка визначається модулем пружності матеріалу  $E$ , з якого він виконаний, а також від діаметра трубопроводу:

$$C_{уд.} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{1 + \frac{E D}{E_{tr} h} k}}, \quad (23)$$

де  $E$  – модуль Юнга;  $\rho$  – густина рідини;  $E_{tr}$  – модуль пружності матеріалу стінок трубопроводу;  $D$  – діаметр трубопроводу;  $h$  – товщина стінок труби;  $k$  – поправочний коефіцієнт.

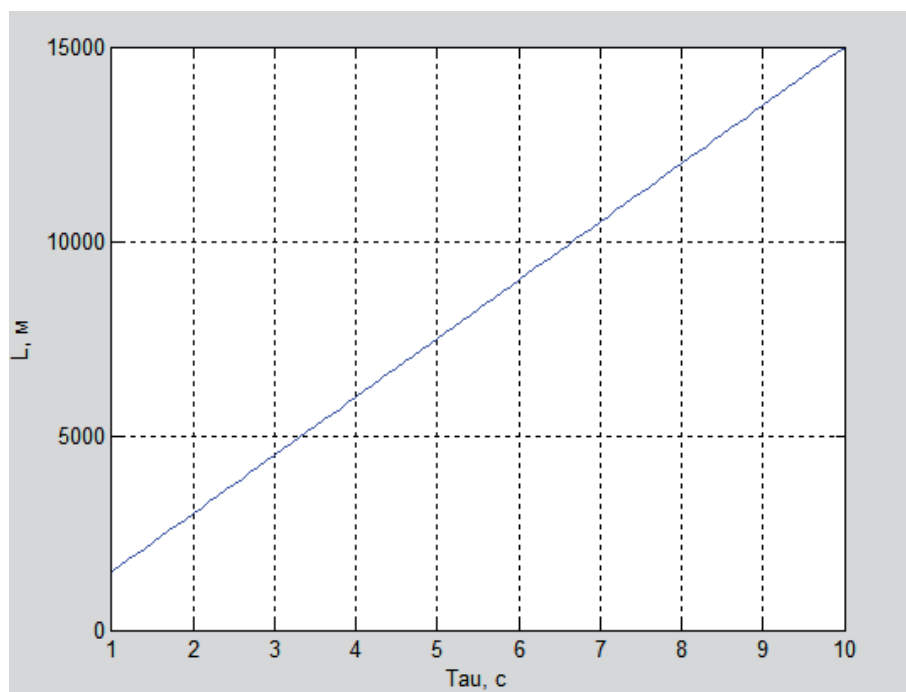


Рис. 2. Залежність критичної довжини трубопроводу  $l_{кр}$  від критичного запізнення  $\tau_{кр}$

Як видно із формули (23), якщо правий доданок знаменника не дорівнює нулю, то вся дріб стає меншою за одиницю, тому можна зазначити, що швидкість розповсюдження ударної хвилі у трубопроводі менше або дорівнює швидкості розповсюдження звуку у даному середовищі.

## 6. Обговорення результатів дослідження динаміки процесу регулювання насосним агрегатом

Мережу трубопроводів можливо представити у вигляді еквівалентного трубопроводу, при цьому довжину окремих ланок трубопроводів можливо скласти. Проектувальник системи водопостачання повинен визначити максимальну довжину трубопроводів, при якій система буде стійкою. Дослідження показали, що трубопроводи

значно впливають на якісні показники роботи системи водопостачання, а саме вносять запізнення. На величину запізнення не впливає діаметр трубопроводу та матеріал, з якого він зроблений, а впливає тільки його довжина. Тобто без урахування довжини трубопроводів у системі керування водопостачанням досягти стабільної роботи системи з заданими показниками стійкості неможливо. Недоліком проведеного дослідження є те, що було прийнято припущення на те, що трубопровід не має шорсткості та не змінює своїх параметрів з часом, хоча для проектування системи водопостачання ці неточності не несуть значного впливу. Крім того для більш точного визначення критичних довжин трубопроводів необхідно враховувати не тільки ідеальні режими роботи, а і такі, які описуються законами гідравліки, тобто явища турбулентного руху рідини, кавітації у трубопроводі та ін. Подальші дослідження будуть направлені на визначення критичних довжин трубопроводів в залежності від режимів потоку рідини.

## 7. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Визначено, що загальна довжина трубопроводу додає запізнення у систему керування водопостачанням, на відміну від його структури та матеріалу, з якого він зроблений.
2. Визначено залежність критичної довжини трубопроводу від величини запізнення. Показано, що довжина трубопроводу значно впливає на стійкість системи керування водопостачанням.

## Література

1. Лезнов, Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздушных установках [Текст] / Б. С. Лезнов. — М.: Энергоатомиздат, 2006. — 360 с.
2. Сидоренко, В. В. Аналіз причин коливання тиску у системах водопостачання з метою їх мінімізації [Текст] / В. В. Сидоренко, К. О. Буравченко // Збірник наукових праць. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. — 2015. — № 28(460). — С. 113–117.
3. Araujo, L. S. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management [Text] / S. Araujo, H. Ramos, S. T. Coelho // Water Resources Management. — 2006. — Vol. 20, № 1. — P. 133–149. doi:10.1007/s11269-006-4635-3
4. Piratla, K. Criticality Analysis of Water Distribution Pipelines [Text] / K. Piratla, S. Ariaratnam // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. — 2011. — Vol. 2, № 3. — P. 91–101. doi:10.1061/(asce)ps.1949-1204.0000077
5. Price, E. A Successive Linear Programming Scheme for Optimal Operation of Water Distribution Networks [Text] / E. Price, A. Ostfeld // World Environmental and Water Resources Congress. — 2012. — P. 2964–2970. doi:10.1061/9780784412312.297
6. Price, E. Iterative Linearization Scheme for Convex Nonlinear Equations: Application to Optimal Operation of Water Distribution Systems [Text] / E. Price, A. Ostfeld // Journal of Water Resources Planning and Management. — 2013. — Vol. 139, № 3. — P. 299–312. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000275

7. Schwartz, R. Limited Multistage Stochastic Programming for Water Distribution Systems Optimal Operation [Text] / R. Schwartz, M. Housh, A. Ostfeld // Journal of Water Resources Planning and Management. — 2016. — P. 06016003. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000687
8. Jung, D. Real-time pump scheduling for water transmission systems: Case study [Text] / D. Jung, D. Kang, M. Kang, B. Kim // KSCE Journal of Civil Engineering. — 2014. — Vol. 19, № 7. — P. 1987–1993. doi:10.1007/s12205-014-0195-x
9. Bakker, M. Reducing energy consumption and leakage by active pressure control in a water supply system [Electronic resource] / M. Bakker, T. Rajewicz, H. Kien, J. H. G. Vreeburg, L. C. Rietveld // ICEAM 2013: International Conference of Economics and Asset Management «Asset Management for Enhancing Energy Efficiency in Water and Wastewater Systems», 24–26 April 2013, Marbella, Spain. — Available at: \www/URL: http://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:256adb08-d5bd-4240-84cb-1816ac01b481/datastream/OBJ/download
10. Reza, J. Application of Several Meta-Heuristic Techniques to the Optimization of Real Looped Water Distribution Networks [Text] / J. Reza, J. Martinez, C. Gil, R. Baños // Water Resources Management. — 2008. — Vol. 22, № 10. — P. 1367–1379. doi:10.1007/s11269-007-9230-8
11. Сердюк, А. А. Особенности моделей водопроводных насосных комплексов [Текст] / А. А. Сердюк, Т. В. Коренькова // Вісник КДПУ. — 2007. — № 4. — С. 143–147.
12. Петросов, В. А. Стійкість водопостачання [Текст] / В. А. Петросов. — Х.: Фактор, 2007. — 360 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

В работе рассмотрена динамика системы управления водоснабжением, и особенно, влияние параметров трубопроводов на процесс водоснабжения, так как этому вопросу уделено недостаточно внимания. Показано, что трубопроводы добавляют запаздывание в систему управления водоснабжением. Чем больше длина трубопровода, тем менее устойчивой становится система управления.

**Ключевые слова:** динамика насосного агрегата, параметры трубопровода, устойчивость системы.

*Буравченко Костянтин Олегович, асистент, кафедра програмування та захисту інформації, Кіровоградський національний технічний університет, Україна, e-mail: buravchenkok@gmail.com.*

*Буравченко Константин Олегович, ассистент, кафедра программирования и защиты информации, Кировоградский национальный технический университет, Украина.*

*Buravchenko Kostyantyn, Kirovohrad National Technical University, Ukraine, e-mail: buravchenkok@gmail.com*