

УДК 628.14

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4\(35\).120-126](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2021.4(35).120-126)

**В.В. Клименко**, проф., д-р техн. наук, **Н.В. Ковальчук**, викл., **В.І. Гуцул**, доц., канд. техн. наук, **Р.В. Телюта**, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*e-mail: klymvas@ukr.net*

## Проблема надійності водопровідних мереж на прикладі міста Кропивницького

В статті проаналізовано причини аварій та витоків на водопровідних трубах розподільчої мережі м. Кропивницького та обраховано статистичні дані експлуатаційної організації по аварійним ситуаціям при експлуатації трубопроводів діаметром від 25 до 1100 мм протягом останніх п'яти років. Встановлено, що основними видами пошкоджень труб водопровідної мережі є: наскрізні свищі сталевих труб – 54,4%; корозія сталевих труб – 25,6%; розчekanка стиків чавунних труб – 9,7%, переломи та тріщини чавунних труб – 6,1%; тріщини на стиках пластикових труб та інші – 4,2%. Отримано аналітичні залежності середнього значення параметра потоку відмов трубопроводу  $\omega_{\text{ср}}$  від діаметра труб  $D$  та підтверджено тенденцію зменшення  $\omega_{\text{ср}}$  при збільшенні  $D$ .

Рекомендовано для підвищення надійності водопровідних мереж проводити заміну 2% мережі на рік та використовувати пластикові труби. Для зменшення  $\omega_{\text{ср}}$ , зокрема на ділянках труб з понаднормовим терміном експлуатації, показана доцільність встановлення парціально безпосередньо в трубопровод водоповітряних гасників коливань тиску, в яких відбувається поступове і повне гасіння ударної хвилі.

**водопровідна мережа, труби, аварії, надійність, потік відмов**

**Постановка проблеми.** Масове будівництво систем водопостачання в нашій країні припало на 80–90-ті роки ХХ-го сторіччя. Термін експлуатації більшості з них вийшов і в останнє десятиріччя спостерігається високий рівень аварійності зношених мереж, що приводить до великої частки втрати води [1]. На причини аварій впливають, зокрема, перепади тиску в системах водопостачання, які можуть викликати гідроудари [2], неналежна якість будівельних робіт при прокладанні трубопроводів. Крім того на ліквідацію аварій потрібні додаткові матеріально-технічні та фінансові затрати експлуатаційних організацій.

Отже, дослідження надійності роботи системи водопостачання і розробка рекомендацій для її підвищення є актуальними. Для цього доцільно застосувати метод статистичного аналізу даних експлуатаційної організації по аварійним ситуаціям та обстеженню технічного стану діючих систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В напрямку встановлення причин відмов систем водопостачання, зокрема трубопроводів розподільчої мережі, відомі роботи авторів О.А. Ткачука, В.Г. Новохатнього, О.В. Матяша та інших [1,3,5]. Ними були проведені якісні та кількісні аналізи надійності водопровідних труб і порівняння з показниками як вітчизняних так і закордонних досліджень.

Як показав аналіз літературних джерел, показники надійності водопровідних мереж різні у кожному місті чи регіоні України, що потребує додаткових досліджень у кожному конкретному випадку.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення основних видів пошкоджень труб розподільчої мережі системи водопостачання міста Кропивницький, аналіз потоку відмов цієї системи та надання рекомендацій для їх зменшення.

**Виклад основного матеріалу.** За даними експлуатаційної організації міста Кропивницький загальна протяжність міської водопровідної мережі 854,414 км. В тому числі: сталеві труби – 348,84 км, чавунні – 367,576 км, залізобетонні – 28,424 км, азбестоцементні – 8,6 км, пластикові – 100,96 км. У водопровідній розподільчій системі використовуються труби діаметром від 25 до 1100 мм.

Сегментарний розподіл видів пошкоджень водопровідної системи м. Кропивницький, що були причиною аварійних ситуацій за останні п'ять років, приведено на рис. 1

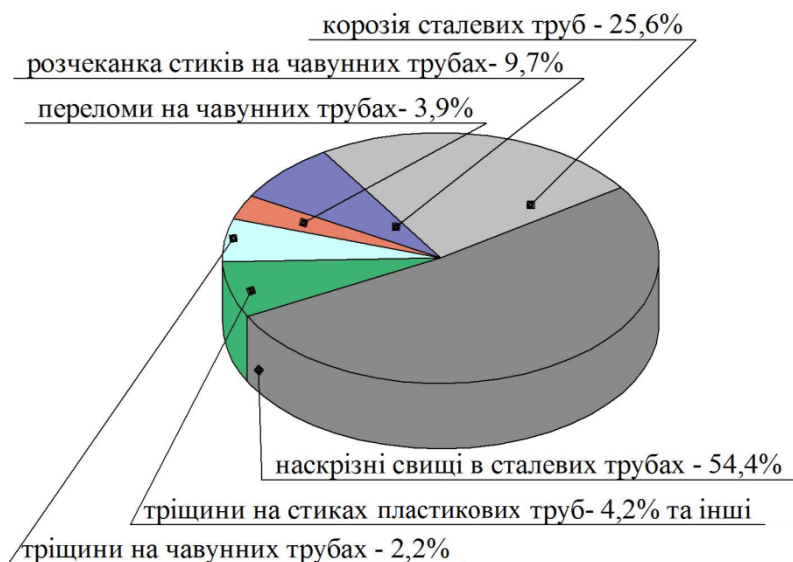


Рисунок 1 – Сегментарний розподіл видів пошкоджень водопровідної системи м. Кропивницький  
Джерело: розробка авторів

В результаті проведеного аналізу було виділено основні види пошкоджень водопровідних мереж, серед яких найбільшу частину складають наскрізні свищі в сталевих трубах – 54,4% та корозія – 25,6%. Вагомі втрати води виникають внаслідок витоків при розчєканці стиків на чавунних трубах, які складають – 9,7% від загальної кількості основних пошкоджень. Решта відсотків припадає на: переломи на чавунних трубах – 3,9%; тріщини на чавунних трубопроводах – 2,2%; тріщини на стиках пластикових труб та інші – 4,2%.

Такий розподіл можна пояснити тим, що основна частина водопровідних розподільчих мереж прокладена зі сталевих та чавунних труб (84%). Це характерно для більшості міст України. Тому в подальшому аналізі надійності розподільчої системи водопостачання бралися до уваги саме сталеві та чавунні труби.

Одним з основних показників надійності водопровідної мережі прийнято параметр потоку відмов  $\omega$  трубопроводу [4]. Для розрахунку середнього значення параметру потоку  $\omega_{0cp}$  використана наступна формула:

$$\omega_{0cp} = \frac{n}{t \cdot \sum L}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість відмов ділянки водопровідної мережі;

$t$  – термін спостереження;

$\sum L$  – протяжність ділянок водопровідної мережі відповідного діаметра, км.

Інтервальні оцінки для параметра потоку відмов обчислювались за формулами:

Верхня інтервальна оцінка параметра потоку відмов  $\omega_{sp}$  :

$$\omega_{ep} = \frac{\omega_0}{r_2}. \quad (2)$$

Нижня інтервальна оцінка параметра потоку відмов:

$$\omega_{np} = \frac{\omega_0}{r_1}, \quad (3)$$

де  $r_1$  і  $r_2$  – коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок при експоненціальному розподілі (таблиці 6 і 7) [4].

Довірча ймовірність прийнята  $\gamma = 0,95$ .

Результати розрахунку інтервальних оцінок для параметра потоку відмов  $\omega_0$  водопровідної мережі міста Кропивницький діаметром від 50 мм до 300 мм виконані в табличній формі (табл.1).

Таблиця 1 – Розрахунок інтервальних оцінок для параметра потоку відмов  $\omega_0$  водопровідної мережі міста Кропивницький

Матеріал труб	Діаметр, мм	Об'єм вибірки, $n$	Коефіцієнти для визначення інтервальних оцінок		Параметр потоку відмов $\omega_0$ , 1/рік·км		
			$r_1$	$r_2$	Середнє значення	Інтервальна оцінка	
						нижня	верхня
Сталеві	50	1186	1,05	0,953	4,21	4,01	4,42
	100	1184	1,05	0,953	8,95	8,24	9,39
	150	352	1,095	0,916	6,94	6,34	7,58
	200	168	1,142	0,881	3,68	3,22	4,18
	250	81	1,21	0,83	1,306	1,08	1,57
	300	132	1,163	0,866	5,52	4,75	6,37
Чавунні	50	65	1,24	0,815	1,18	0,95	1,45
	100	408	1,087	0,922	0,51	0,47	0,55
	150	192	1,132	0,888	0,59	0,52	0,66
	200	129	1,165	0,865	0,66	0,57	0,76
	250	37	1,34	0,76	0,27	0,20	0,36
	300	134	1,161	0,867	0,58	0,5	0,67

Джерело: розробка авторів

Для розрахунку середніх значень потоку відмов  $\omega_{0cp}$  отримано вирази:

- для чавунних труб

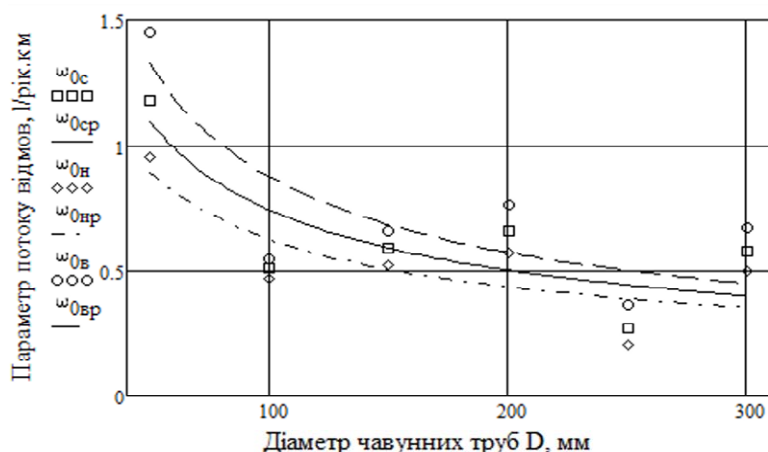
$$\omega_{0cp} = 9,909 \cdot D^{-0,503}, \quad (4)$$

- для сталевих труб

$$\omega_{0cp} = 12,907 \cdot D^{-0,186}. \quad (5)$$

На рисунках 2 і 3 приведено графіки залежності  $\omega_0 = f(D)$  для чавунних і сталевих труб відповідно.

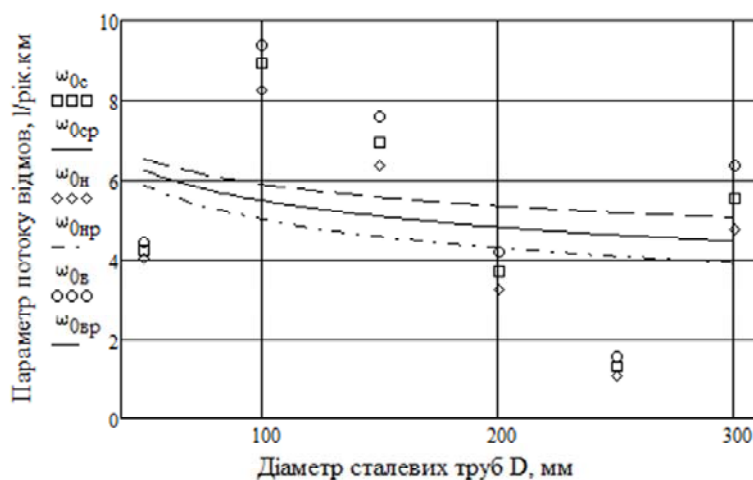
Для розрахунків при обробці статистичних даних та побудові графіків використовувався пакет прикладних програм MathCAD.



$\omega_{0ср}$ ,  $\omega_{0нр}$ ,  $\omega_{0вр}$  – відповідно середнє значення, нижня та верхня інтервальні оцінки параметру потоку відмов, знайдені за аналітичною формулою (4)  $\omega_{0с}$ ,  $\omega_{0н}$ ,  $\omega_{0в}$  – ті ж самі величини для табличних точок.

Рисунок 2 – Графік залежності  $\omega_0 = f(D)$  для чавунних труб

Джерело: розробка авторів



$\omega_{0ср}$ ,  $\omega_{0нр}$ ,  $\omega_{0вр}$  – відповідно середнє значення, нижня та верхня інтервальні оцінки параметру потоку відмов, знайдені за аналітичною формулою (5),  $\omega_{0с}$ ,  $\omega_{0н}$ ,  $\omega_{0в}$  – ті ж самі величини для табличних точок

Рисунок 3 – Графік залежності  $\omega_0 = f(D)$  для сталевих труб

Джерело: розробка авторів

Аналіз отриманих результатів показує тенденцію зменшення параметру потоку відмов при збільшенні діаметру, що добре узгоджується з даними в роботах [3,5,6]. Але за нашими даними середньозважені значення потоку відмов незалежно від діаметра складають:

- для чавунних труб  $\omega_{0ср} = 0,48$  1/рік·км
- для сталевих труб  $\omega_{0ср} = 5,21$  1/рік·км

а за даними [3,5,6] ці значення коливаються в межах від 0,1 1/рік·км до 3,59 1/рік·км.

Суттєво більші значення  $\omega_{0ср}$  в нашому випадку, порівняно з аналогічними, наведеними в літературних джерелах для інших міст, можна пояснити значним перевищенням нормативних строків експлуатації сталевих та чавунних труб водопровідної мережі м. Кропивницький.

Розподіл протяжності мереж міста в залежності від терміну експлуатації надано в табл.2.

Таблиця 2 – Розподіл протяжності водопровідних мереж м. Кропивницький в залежності від терміну їх експлуатації

Матеріал труб	Строк експлуатації (років)					
	<5	6-15	16-25	26-35	36-50	>50
Сталь	10,322	20,701	21,826	65,675	147,089	83,228
Чавун	0,092	10,912	7,97	60,721	194,97	92,911

*Джерело: розробка авторів*

Згідно з нормативними документами строк експлуатації сталевих трубопроводів становить – 25 років, чавунних – 30-40 років [6]. З таблиці 2 випливає, що для 85% сталевих та для 50% чавунних труб цей термін перевищено майже в 2-а рази. В результаті старіння і втрати міцності матеріалу труб значно збільшується кількість аварійних ситуацій при робочому навантаженні незалежно від діаметру труб.

Рішенням цієї проблеми в першу чергу є заміна труб на труби з більш сучасних пластикових матеріалів, що підвищить нормативний термін експлуатації труб до 50 років. Іншою частиною рішення в цьому напрямку може бути впровадження практики європейських країн – обов'язкова заміна 2% мережі на рік, тобто оновлення за 50 років всієї систем трубопроводів.

Для зменшення фактору відмов водопровідних мереж міста внаслідок гідравлічних ударів, які можуть виникати при наповненні труб після ліквідації аварій на них, доцільно встановлювати гасники коливань тиску. Але їх наявність не завжди може забезпечити повне гасіння ударної хвилі, а разом з тим і надійність роботи водопровідних мереж. Це пояснюється тим, що більшість гасників встановлюється зовні на трубопроводі. Тому ударна хвиля встигає частково повз нього проскочити через сповільнену швидкість спрацьовування запобіжника в порівнянні з швидкістю гідроудару. Іноді робоча діафрагма самого гасника, яка являє собою жорстку систему, приймає участь в коливальному процесі і не забезпечує гасіння коливань тиску.

Підвищення ефективності запобігання гідроудару можна досягти за рахунок гасників, що встановлюються парціально в трубопроводі при русі через який відбувається поступове і повне гасіння ударної хвилі.

Одним з таких є гасник коливань тиску на основі винаходу Ніколи Тесли [7]. Крім того, сам клапан Тесли [8] є альтернативою звичайному зворотному клапану, який є обов'язковою запобіжною арматурою на насосних станціях при аварійній зупинці насосів. Обидва пристрої набагато менше схильні до зносу, так як їхні конструкції не містять рухомих частин, що підвищує надійність роботи трубопроводів.

В роботах [2,9] розглянуто водоповітряний гасник коливань тиску, який також встановлюється парціально в трубопроводі і запобігає гідроудару. Апробацію дослідного зразка цього гасника проведено в лабораторії гідравліки Центральноукраїнського національного технічного університету і підтверджено його працездатність та ефективність.

### **Висновки.**

1. Виконано аналіз статистичних даних причин аварій та витоків на водопровідних трубах розподільчої мережі м. Кропивницького за даними експлуатаційної організації на протязі останніх п'яти років.

2. В результаті сегментарного аналізу встановлено, що основними видами пошкоджень труб мережі є : наскрізні свищі сталевих труб – 54,4%; корозія сталевих

труб – 25,6%; розчekanка стиків чавунних труб – 9,7%, переломи та тріщини чавунних труб – 6,1%; тріщини на стиках пластикових труб та інші – 4,2%.

3. Проведено розрахунок інтервальних оцінок параметра потоку відмов  $\omega_0$  для сталевих та чавунних труб водорозподільчої мережі м. Кропивницький, оскільки саме з цих труб прокладено 84% мережі та отримано аналітичні вирази для визначення середніх значень  $\omega_{0cp}$  в залежності від їх діаметру.

4. Суттєво більші значення  $\omega_{0cp}$  водорозподільчої мережі м. Кропивницький порівняно з аналогічними, наведеними в літературних джерелах для інших міст, можна пояснити перевищенням  $\sim$  в 2-а рази нормативних строків експлуатації 85% сталевих та 50% чавунних труб водопровідної мережі м. Кропивницький.

5. Для підвищення надійності водопровідних мереж доцільно проводити заміну 2% мережі на рік та використовувати пластикові труби.

6. Для зменшення фактору відмов водопровідних мереж, зокрема на ділянках, де експлуатуються труби з понаднормовим терміном експлуатації, доцільно установлювати парціально безпосередньо в трубопровід водоповітряних гасників коливань тиску, в яких відбувається поступове і повне гасіння ударної хвилі.

7. В цілому аналіз статистики пошкоджень та параметрів відмов водопровідних мереж дає можливість більш обґрунтовано планувати ремонтні роботи та заходи по заміні труб з метою запобігання виникнення аварій.

## Список літератури

1. Ткачук О. А. Удосконалення систем подачі та розподілення води населених пунктів. Рівне : НУВГП, 2008. 301 с.
2. Ковальчук Н.В., Мещишена Л.Г. Порівняльна характеристика конструктивних параметрів водоповітряних гасників коливань тиску. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2009. Вип. 22. С. 49-52.
3. Матяш О. В. Висока надійність водопровідних мереж – шлях до зменшення втрат води. *Комунальне господарство міст*. 2013. Вип. 110. С.126-130.
4. ГОСТ 11.005-74. Прикладная статистика. Правила определения оценок и доверительных границ для параметров экспоненциального распределения и распределения Пуассона. Москва : Издательство стандартов, 1974. 29 с.
5. Новохатній В.Г. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.23.24 / Київ. нац. ун-т. буд. і арх-ри. Київ, 2012. 351 с.
6. ДБН В.2.5–74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинний від 2014–01–01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово–комунального господарства України, 2013. 281 с. (Національні стандарти України).
7. Пат. US10808874B2 США, F16L 55/04; F16L 55/05; F02M 37/00; F16L 11/26; F15D 1/00. Inline fluid damper device / Samarasinghe R. J., Magina N. A., Wickersham A., Cross A., Han F. (США) – № 15/827,587; заявл. 30.11.17; опубл. 20.10.20. 26 с.
8. Пат. 1329559 США. Valvuar conduit / Tesla N. заявл. 21.02.16; опубл. 3.02.20. 6 с.
9. Ткач А.А., Мещишена Л.Г., Кулеба Н.В. Результаты исследований гидроударов в длинных и коротких гидромагистралях. *Збірник наукових праць Кіровоградського державного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2001. Вип. 8. С.134-138.

## References

1. Tkachuk, O.A. (2008). Udoskonalennia system podachi ta rozpodilennia vody naselenykh punktiv [Improvement of water supply and distribution systems of settlements]. Rivne: NUWN [in Ukrainian].
2. Kovalchuk, N.V. & Meshchyshena, L.H. (2011). Porivnialna kharakterystyka konstruktivnykh parametriv vodopovitrianykh hasnykiv kolyvan tysku [Comparative characteristics of design parameters of water-air dampers of pressure fluctuations]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia*,

- avtomatyzatsiia - Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, Vol. 22, 49-52 [in Ukrainian].*
3. Matiash, O. V. (2013). Vysoka nadiinist vodoprovodnykh merezh – shliakh do zmenshennia vtrat vody [High reliability of water supply networks is a way to reduce water losses]. *Komunalne hospodarstvo mist - Municipal utilities. Vol. 110, 126-130 [in Ukrainian].*
  4. Applied statistics. Rules for determining estimates and confidence limits for parameters of exponential distribution and Poisson distribution. (1974). *HOST 11.005-74*. Moscow : Publishing house of standards. [in Russian].
  5. Novokhatnii V.H. (2012). Nadiinist funktsionuvannia podavalno-rozpodilnoho kompleksu system vodopostachannia [eliability of functioning of supply and distribution complex of water supply systems]. *Doctor's thesis*. Kiev [in Ukrainian].
  6. Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. [Water supply. External networks and structures. Basic design provisions.]. (2013). *DBN V.2.56-74:2013 from 01 January 2014*. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing of Ukraine [in Ukrainian].
  7. Samarasinghe R. J., Magina N. A., Wickersham A., Cross A., Han F., (2020). U.S. Patent No. US10808874B2 [in English].
  8. Tesla N., (1920). U.S. Patent No. 1.329.559 [in English].
  9. Tkach, A.A., Meshchysheva, L.H. & Kuleba, N.V. (2001). Rezultaty issledovaniy gidroudarov v dlennykh i korotkikh gidromagistralyakh [Results of studies of water hammer in long and short hydraulic lines]. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia - Collection of scientific works of Kirovograd National Technical University. Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation, Vol. 8, 134-138 [in Ukrainian].*

**Vasyl Klymenko**, Prof., DSc., **Nataliia Kovalchuk**, lecturer, **Vasyl Hutsul**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ruslan Teliuta**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Central Ukrainian National University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

### **The Problem of Reliability of Water Supply Networks on the Example of the City of Kropyvnytskyi**

The article presents the analysis of statistical data of the causes of breakages and leaks in water pipes of the distribution network of Kropyvnytskyi. Breakage statistics for pipelines with a diameter of 25 to 1100 mm during the last five years were calculated.

As a result of segmental analysis, it was found that the main types of damage to the pipes of water supply system are through fistulas of steel pipes – 54.4% and corrosion – 25.6%; loss of integrity of cast iron pipes on joints – 9.7%, fractures and cracks of cast iron pipes – 6.1%; fractures in joints of polyethylene pipes and other damages – 4.2%.

To characterize the reliability of the municipal water supply networks, the pipeline failure flow parameter  $\omega$  was used. It was defined as the ratio of the number of failures of the water supply network section to the observation period and the length of pipe network sections of the corresponding diameter.

The calculation of interval estimates for the failure rate parameter  $\omega_0$  for steel and cast iron pipes of the water distribution network of Kropyvnytskyi was carried out. According to the operational organization 84% of the network was laid using these pipes and analytical expressions were obtained to determine average values of  $\omega_{0cp}$  depending on their diameter.

Significantly higher values of  $\omega_{0cp}$  were noted in comparison with similar ones given in the literature for other cities, which can be explained by a significant excess of the standard service life of 85% of steel and 50% of cast iron pipes in the water supply network of Kropyvnytskyi.

To increase the reliability of water supply networks, it is recommended to implement the experience of European countries and replace 2% of the network per year and use polyethylene pipes.

To reduce the failure factor of water supply networks, particularly in those areas where overtime pipes are used, the expediency of partial installation of water-air dampers for pressure fluctuations directly in the pipeline, in which there is a gradual and complete damping of the shock wave. Approbation of a prototype of a hydraulic shock absorber of this design was carried out in the hydraulics laboratory at Central Ukrainian National Technical University and its efficiency and high efficiency at full shock wave damping was confirmed.

**breakages, steel pipelines, distribution network, reliability, failure**

*Одержано (Received) 07.04.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 19.04.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 26.04.2021*