

*В.Г. Новохатний, д.т.н., професор  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

## **ТОПОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ НАДІЙНОСТІ ТРУБОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ**

*Наведено результати оцінювання надійності структури трубопровідних мереж методами теорії графів і теорії ймовірностей та отримано поліноми надійності; запропоновано метод оцінювання надійності кільцевих топологічних структур, який дозволяє вибрати таку структуру трубопровідної мережі, яка має більшу надійність, але для оцінювання надійності необхідно вводити поняття «відмова» мережі.*

**Ключові слова:** *трубопровідна мережа, топологічна структура, надійність.*

*В.Г. Новохатний, д.т.н., професор  
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

## **ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

*Даны результаты оценивания надежности структуры трубопроводных сетей методами теории графов и теории вероятностей, получены полиномы надежности; предложен метод оценки надежности кольцевых топологических структур, который позволяет выбрать такую структуру трубопроводной сети, которая имеет большую надежность, но для оценки надежности необходимо вводит понятие «отказ» сети.*

**Ключевые слова:** *трубопроводная сеть, топологическая структура, надежность.*

*V. Novokhatniy, ScD, Professor  
Poltava National Technical Yuriy Kondratyuk University*

## **TOPOLOGICAL ASPECTS RELIABILITY OF PIPELINE NETWORKS**

*The results of estimation of the reliability of the structures pipeline networks using graph theory and probability theory are given, polynomials of the reliability obtained; an efficient method for evaluating of the reliability of the ring topological structures, which allows you to choose a structure of the pipeline network, which is more reliable, but it is necessary to introduce the notion "failure" of the network.*

**Keywords:** *pipeline network, topological structure, reliability.*

**Вступ.** Для транспортування цільового продукту (води, газу, нафти) використовується трубопровідний транспорт, який включає трубопроводи та споруди, що створюють рух цього продукту в трубах (насосні, компресорні станції). Трубопроводи можуть бути як простим послідовним поєднанням ділянок труб, так і більш складним сполученням окремих ділянок труб та арматури. Таке поєднання називають трубопровідною мережею. За накресленням у плані ці мережі можуть бути розгалуженими, замкненими (кільцевими) та комбінованими (кільцевими з відгалуженнями) (рис. 1).

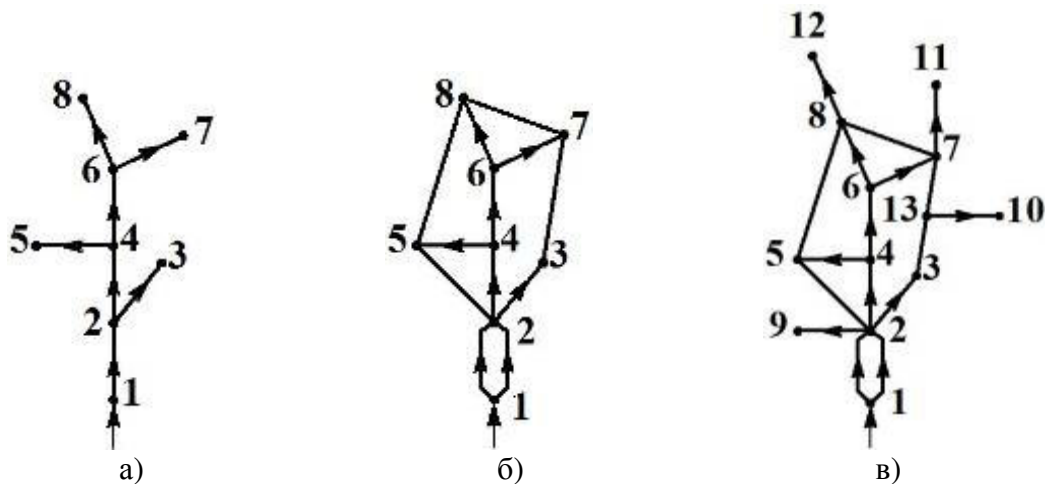


Рис. 1. Схеми мереж: а – розгалужена; б – кільцева; в – комбінована

У такому представленні деякій кількості споживачів відповідають вузли мережі, а зв'язкам між вузлами – ділянки. При абстрагуванні, коли ще не відомі величини потоків продукту на ділянках мережі, діаметри труб, довжини ділянок і вузлові відбори продукту, мережа може бути представлена графом. Граф мережі – це топологічна структура, яка не змінює своїх властивостей при будь-яких перетвореннях, крім розривів та склеювань.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Питання надійності трубопровідних мереж постійно залишаються в полі зору фахівців, що свідчить про те, що проблема ще не має остаточного розв'язання. Серед останніх публікацій слід указати на роботи А.Я. Найманова [1, 2], Є.П. Гальперіна [3], М.І. Самойленка [4, 5] та інших. Зазначені публікації демонструють різні точки зору й різні підходи до розв'язання задач надійності.

**Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Проблема надійності трубопровідних мереж є ще не настільки розв'язаною, щоб увійти складовою частиною в нормативні документи. Тому на сучасному етапі її вивчення потрібно вести дослідження за різними напрямками. Одним з них є топологічний підхід, який викладено в цій роботі.

**Постановка завдання.** Трубопровідна мережа, як будь-який технічний об'єкт, має таку властивість, як надійність. Тоді на першому етапі виникає завдання оцінювання надійності структури трубопровідної мережі з використанням методів теорії графів та теорії ймовірностей.

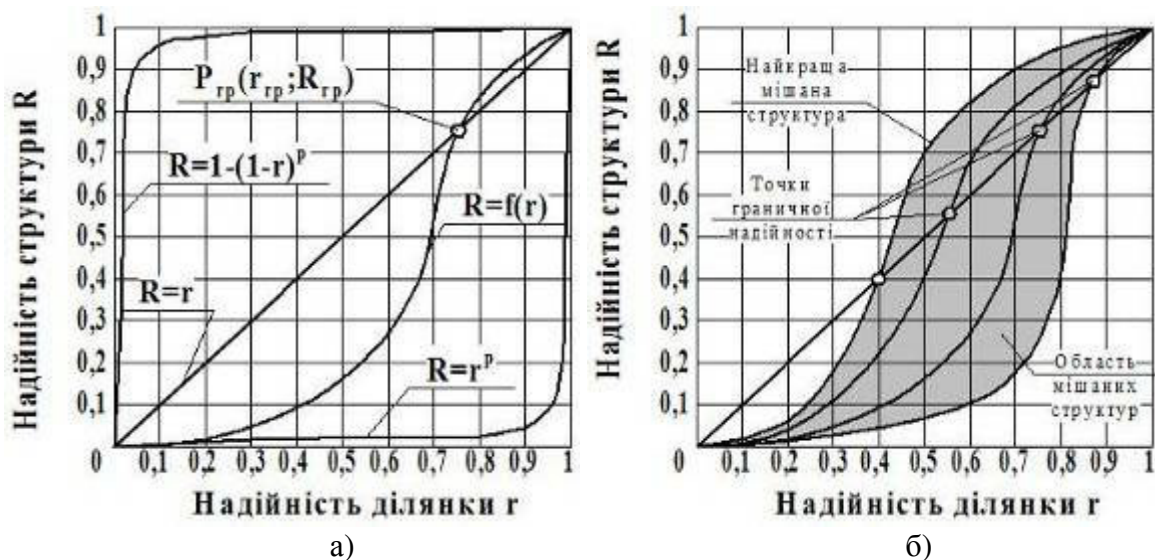
**Основний матеріал і результати.** При розрахунках надійності трубопровідних мереж розглядаються [6] такі топологічні структури (рис. 1): одна ділянка (ділянки 2-3; 4-5; 6-7; 6-8); послідовна структура (послідовні ділянки 1-2-4-6-8; 1-2-4-6-7); паралельна структура (паралельні ділянки між вузлами 1 і 2 на схемах б і в); мішана структура (кільце 4-5-8-6).

Надійність як властивість об'єкта не може бути розрахована без уведення такого фундаментального поняття, як «відмова». Процес функціонування мережі у часі потрібно розділити на два потоки випадкових відрізків часу, а саме – потік випадкових відрізків часу роботи і потік випадкових відрізків часу ремонтів. Тоді відмова – це миттєвий перехід із робочого (працездатного) стану в неробочий (непрацездатний), а відновлення – це миттєвий перехід із непрацездатного стану в працездатний. Якщо не ввести поняття «відмова», то обчислити надійність мережі неможливо. Критерієм відмови для перших 3-х структур є відсутність шляху для руху цільового продукту від початкового до кінцевого вузла. Для кільцевої структури такий критерій відмови

застосувати немає можливості, тому що цільовий продукт подається від початкового вузла до всіх інших вузлів одночасно, тобто паралельно. Тоді працездатним станом буде покривне дерево мережі – це граф, у якому для кожної пари вузлів існує шлях, який їх з'єднує. У такий спосіб усі стани можна поділити на дві множини: працездатні стани (покривне дерево існує) і непрацездатні стани (структура незв'язна). Імовірність існування кожного стану визначається за формулою Я. Бернуллі, яка при однаковій надійності ділянок дозволяє отримати поліном, що характеризує надійність структури. Показником надійності може бути ймовірність безвідмовної роботи або коефіцієнт готовності.

Якщо структура представлена лише одним елементом, то надійність структури лінійно залежить від надійності ділянки  $R=r$  при всіх значеннях  $0 \leq r \leq 1$ . Тобто графік функції  $R=f(r)$  буде прямою  $R=r$  (рис. 2, а). Якщо структура складається з двох послідовно з'єднаних ділянок, то її функцією надійності буде квадратна парабола  $R=r^2$ ; з трьох ділянок – кубічна парабола  $R=r^3$ ; з  $p$  ділянок – парабола степені  $p$ :  $R=r^p$ . Графік функції  $R=r^p$  максимально наближається до осі абсцис, не перетинає бісектрису  $R=r$  і завжди розташований нижче цієї прямої. Це означає, що послідовне поєднання ділянок має завжди меншу надійність, ніж надійність  $r$  однієї ділянки.

Якщо структура складається з двох паралельно з'єднаних ділянок (рис. 2, а), то її функція надійності буде  $R=1-(1-r)^2$ ; якщо ділянок три, то  $R=1-(1-r)^3$ ; якщо структура складається з  $p$  ділянок, то  $R=1-(1-r)^p$ . Графік функції  $R=1-(1-r)^p$  наближається до осі ординат, не перетинає бісектрису  $R=r$  і розташований вище цієї прямої. Указане означає, що паралельне з'єднання ділянок має завжди більшу надійність, ніж надійність  $r$  однієї ділянки.



**Рис. 2. Графічне представлення надійності структур мережі: а – сумісний графік; б – область можливих мішаних структур**

Структура кільцевої мережі має функцію надійності у вигляді полінома  $R=f(r)$ , графік якого знаходиться між кривими  $R=r^p$  і  $R=1-(1-r)^p$ . Математичною моделлю надійності мережі можна прийняти поліном

$$R = a_1 r^p + a_2 r^{p-1} + \dots + a_n r^{p-n+1} + T_D r^{p-n},$$


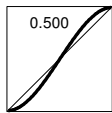
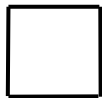

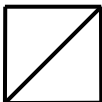
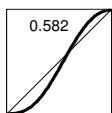

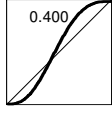
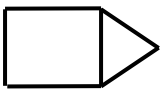

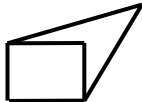
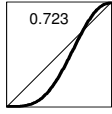
де  $p$  – число ділянок структури;  $n$  – число кілець структури;  $T_D$  – число покривних дерев структури;  $a_i$  – коефіцієнти полінома.

Для одного кільця структури мережі, яке має  $p$  ділянок, поліном буде степені  $p$  та складатиметься з двох членів  $R = a_1r^p + T_{др}r^{p-1}$ ; для структури мережі, що складається з двох кілець,  $R = a_1r^p + a_2r^{p-1} + T_{др}r^{p-2}$ . Кількість членів полінома дорівнює  $n + 1$ , тобто числу кілець на одиницю більше.

Точка перетину функцій  $R=r$  і  $R=f(r)$  має характерну особливість, яка визначає таку граничну надійність ділянки  $r_{zp}$ , що використання при структурному резервуванні ділянок з меншою, ніж  $r_{zp}$ , надійністю призводить до зменшення надійності структури мережі і при цьому завжди буде  $R < r$ . І навпаки, використання ділянок з надійністю  $r > r_{zp}$  завжди приводить до збільшення надійності структури мережі, й тоді завжди буде виконуватися нерівність  $R > r$ . Отже, чим менше значення  $r_{zp}$ , тим при менших значеннях  $r$  лінія полінома перетинає пряму  $R=r$ , тим суттєвішим є вплив топології структури на її надійність. Це означає, що саме таке поєднання ділянок мережі є найкращим, тому що при однакових значеннях  $r$  для всіх аналізованих схем саме така топологія дає найбільшу надійність. Можна побудувати безліч поліномів, які характеризують надійність відповідних кільцевих структур та утворюють область можливих мішаних структур (рис. 2, б). Тоді графічно найкращою мішаною структурою буде та з них, що більшою частиною знаходиться над бісектрисою  $R=r$ .

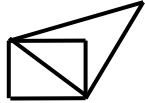

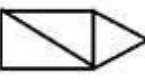


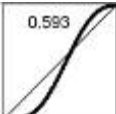



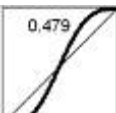

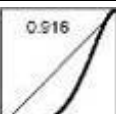
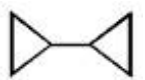
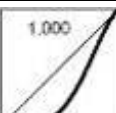

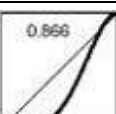



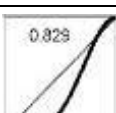
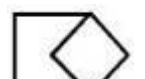
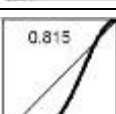

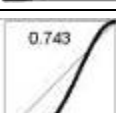
Обчислення коефіцієнтів  $a_i$  полінома  $R=f(r)$  виконано за методом Курта Райншке та реалізовано за допомогою ПЕОМ. Формули надійності деяких простих структур кільцевих мереж наведені в таблицях 1 і 2.

**Таблиця 1. Формули надійності плоских кільцевих структур**

Геометричні характеристики	Топологічна структура	Графік функції	Формула надійності	Значення граничної надійності $r_{zp}$
1	2	3	4	5
m=3 n=1 p=3			$R = -2r^3 + 3r^2$	0,500
m=4 n=1 p=4			$R = -3r^4 + 4r^3$	0,768
m=4 n=2 p=5			$R = 4r^5 - 11r^4 + 8r^3$	0,582
m=4 n=3 p=6			$R = -6r^6 + 24r^5 - 33r^4 + 16r^3$	0,400
m=5 n=2 p=6			$R = 6r^6 - 16r^5 + 11r^4$	0,748
m=5 n=2 p=6			$R = 7r^6 - 18r^5 + 12r^4$	0,723

Примітка: **m** – число вузлів; **n** – число кілець; **p** – число ділянок



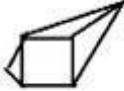




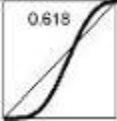




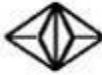


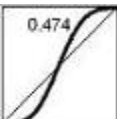

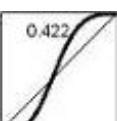

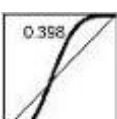
Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
m=5 n=3 p=7			$R = -8r^7 + 31r^6 - 42r^5 + 20r^4$	0,659
m=5 n=3 p=7			$R = -8r^7 + 32r^6 - 44r^5 + 21r^4$	0,633
m=5 n=3 p=7			$R = -10r^7 + 39r^6 - 52r^5 + 24r^4$	0,593
m=5 n=4 p=8			$R = 12r^8 - 62r^7 + 123r^6 - 112r^5 + 40r^4$	0,515
			$R = 14r^8 - 72r^7 + 142r^6 - 128r^5 + 45r^4$	0,479
m=6 n=1 p=6			$R = -5r^6 + 6r^5$	0,916
m=6 n=2 p=7			$R = 4r^7 - 12r^6 + 9r^5$	1
			$R = 6r^7 - 17r^6 + 12r^5$	0,866
			$R = 8r^7 - 21r^6 + 14r^5$	0,842
			$R = 9r^7 - 23r^6 + 15r^5$	0,829
			$R = 10r^7 - 25r^6 + 16r^5$	0,815
			$R = -12r^8 + 48r^7 - 65r^6 + 30r^5$	0,743







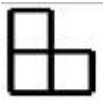



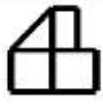

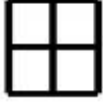



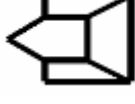
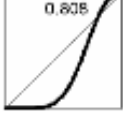

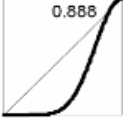
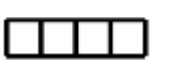
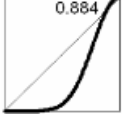
Продовження табл. 1

1	2	3	4	5
			$R = -15r^8 + 56r^7 - 72r^6 + 32r^5$	0,747
			$R = -14r^8 + 54r^7 - 71r^6 + 32r^5$	0,735
			$R = -16r^8 + 61r^7 - 79r^6 + 35r^5$	0,710
			$R = -17r^8 + 64r^7 - 82r^6 + 36r^5$	0,706
m=6 n=4 p=9			$R = 16r^9 - 79r^8 + 152r^7 - 136r^6 + 48r^5$	0,727
			$R = 12r^9 - 66r^8 + 138r^7 - 131r^6 + 48r^5$	0,700
			$R = 16r^9 - 82r^8 + 162r^7 - 147r^6 + 52r^5$	0,694
			$R = 16r^9 - 84r^8 + 168r^7 - 153r^6 + 54r^5$	0,684
			$R = 18r^9 - 92r^8 + 180r^7 - 161r^6 + 56r^5$	0,681
			$R = 16r^9 - 84r^8 + 169r^7 - 155r^6 + 55r^5$	0,668
			$R = 20r^9 - 101r^8 + 196r^7 - 174r^6 + 60r^5$	0,657
			$R = 20r^9 - 102r^8 + 199r^7 - 177r^6 + 61r^5$	0,652

Продовження табл. 1

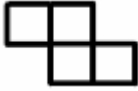
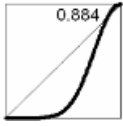

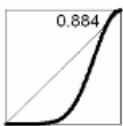
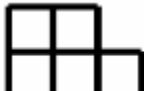
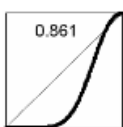
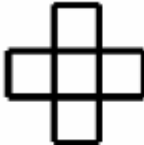
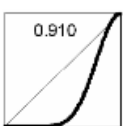
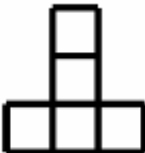
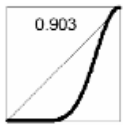
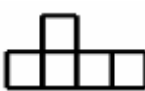
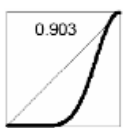
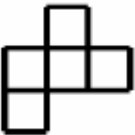
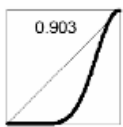
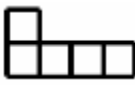
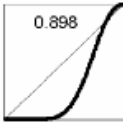
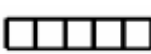
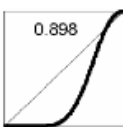
1	2	3	4	5
			$R = 22r^9 - 111r^8 + 214r^7 - 188r^6 + 64r^5$	0,644
			$R = 20r^9 - 104r^8 + 206r^7 - 185r^6 + 64r^5$	0,629
			$R = 22r^9 - 112r^8 + 218r^7 - 193r^6 + 66r^5$	0,626
			$R = 24r^9 - 121r^8 + 233r^7 - 204r^6 + 69r^5$	0,618
			$R = 26r^9 - 132r^8 + 255r^7 - 223r^6 + 75r^5$	0,591
m=6 n=6 p=11			$R = 46r^{11} - 334r^{10} + 1086r^9 - 1857r^8 + 1820r^7 - 974r^6 + 224r^5$	0,507
			$R = 36r^{11} - 272r^{10} + 868r^9 - 1503r^8 + 1496r^7 - 816r^6 + 192r^5$	0,489
			$R = 42r^{11} - 314r^{10} + 992r^9 - 1700r^8 + 1673r^7 - 901r^6 + 209r^5$	0,474
m=6 n=7 p=12			$R = -54r^{12} + 466r^{11} - 1744r^{10} + 3678r^9 - 4735r^8 + 3736r^7 - 1682r^6 + 336r^5$	0,422
			$R = -64r^{12} + 552r^{11} - 2064r^{10} + 4344r^9 - 5571r^8 + 4368r^7 - 1948r^6 + 384r^5$	0,398

Таблиця 2. Формули надійності кільцевих водопровідних мереж

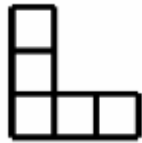
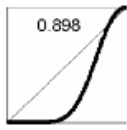
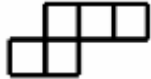
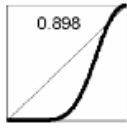
Геометричні характеристики	Структура мережі	Графік функції	Формула надійності	Гранична надійність $r_{sp}$
1	2	3	4	5
m=4 n=1 p=4			$R = -3r^4 + 4r^3$	0,768
m=6 n=2 p=7			$R = 9r^7 - 23r^6 + 15r^5$	0,828
m=8 n=3 p=10			$R = -27r^{10} + 102r^9 - 130r^8 + 56r^7$	0,862
			$R = -27r^{10} + 102r^9 - 130r^8 + 56r^7$	0,862
m=9 n=4 p=12			$R = 70r^{12} - 346r^{11} + 649r^{10} - 548r^9 + 176r^8$	0,840
			$R = 70r^{12} - 346r^{11} + 649r^{10} - 548r^9 + 176r^8$	0,840
			$R = 79r^{12} - 388r^{11} + 722r^{10} - 604r^9 + 192r^8$	0,826
			$R = 84r^{12} - 414r^{11} + 771r^{10} - 644r^9 + 204r^8$	0,812
			$R = 94r^{12} - 456r^{11} + 837r^{10} - 690r^9 + 216r^8$	0,808
m=10 n=4 p=13			$R = 81r^{13} - 405r^{12} + 735r^{11} - 648r^{10} + 208r^9$	0,888
			$R = 81r^{13} - 405r^{12} + 766r^{11} - 650r^{10} + 209r^9$	0,884



Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
			$R = 81r^{13} - 405r^{12} + 766r^{11} - 650r^{10} + 209r^9$	0,884
			$R = 81r^{13} - 405r^{12} + 766r^{11} - 650r^{10} + 209r^9$	0,884
m=11 n=5 p=15			$R = -237r^{15} + 1453r^{14} - 3589r^{13} + 4468r^{12} - 2806r^{11} + 712r^{10}$	0,861
m=12 n=5 p=16			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3780r^{14} + 4752r^{13} - 3008r^{12} + 768r^{11}$	0,910
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3786r^{14} + 4772r^{13} - 3030r^{12} + 776r^{11}$	0,903
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3786r^{14} + 4772r^{13} - 3030r^{12} + 776r^{11}$	0,903
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3786r^{14} + 4772r^{13} - 3030r^{12} + 776r^{11}$	0,903
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3789r^{14} + 4782r^{13} - 3041r^{12} + 780r^{11}$	0,898
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3789r^{14} + 4782r^{13} - 3041r^{12} + 780r^{11}$	0,898

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3789r^{14} + 4782r^{13} - 3041r^{12} + 780r^{11}$	0,898
			$R = -243r^{16} + 1512r^{15} - 3789r^{14} + 4782r^{13} - 3041r^{12} + 780r^{11}$	0,898

**Висновки.** Запропонований метод оцінювання надійності кільцевих топологічних структур методами теорії графів та теорії ймовірностей дозволяє вибрати кращу структуру трубопроводної мережі при її проектуванні або реконструкції.

#### Література

1. Найманов А.Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети / А.Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – №12. – С. 11 – 16.
2. Найманов А.Я. Возможные нормативы надежности систем водоснабжения и водоотведения / А.Я. Найманов, А.А. Найманова // Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. – Вип. 71. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2012. – С. 397 – 402.
3. Гальперин Е.М. Совершенствование расчетной модели функционирования кольцевой водопроводной сети (в порядке обсуждения) / Е.М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – №2. – С. 51 – 55.
4. Самойленко Н.И. Анализ функциональной надежности различных конструкций магистральных трубопроводов / Н.И. Самойленко, И.А. Гавриленко // Коммунальное хозяйство городов: научно-технический сборник. – Вип. 86. – К.: Техніка, 2009. – С. 197 – 203.
5. Самойленко Н.И. Математическая модель функциональной надежности перемычки магистральных трубопроводов / Н.И. Самойленко, М.В. Булаенко, О.Н. Штельма // Коммунальное хозяйство городов: научно-технический сборник. – Вип. 101. – Харків: ХНАМГ, 2011. – С. 464 – 468.
6. Новохатній В.Г. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: дис. ... доктора технічних наук: 05.23.04 – водопостачання, каналізація / Валерій Гаврилович Новохатній. – К.: КНУБА, 2012. – 351 с.

Надійшла до редакції 22.12.2014

© В.Г. Новохатній