

УДК 628.16

Г. С. ТУРЧИНА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ НАДЕЖНОСТИ С
УЧЕТОМ ЗНАЧИМОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В КОЛЬЦЕВЫХ СИСТЕМАХ
ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Аннотация. Статья посвящена проблеме учета неравнозначности различных участков трубопроводов в кольцевой системе подачи и распределения воды при расчете параметрической надежности. Предложена методика нахождения показателей безотказной работы с учетом влияния значимости участков трубопроводов.

Ключевые слова: надежность, вероятность безотказной работы, кольцевая водопроводная сеть, алгебра логики, мостиковые системы.

Рассматривая систему подачи и распределения воды (СПРВ) с точки зрения составления параллельно-последовательной схемы для решения с применением теории вероятности, можно столкнуться с определенными проблемами [2]. Систему подачи и распределения воды можно рассматривать как с точки зрения непосредственно подачи (забор воды из сети), так и транспортирования (т. е. воду нужно донести до определенного участка посредством перемещения через другие). Также любую кольцевую систему подачи и распределения воды можно рассматривать как мостиковую – с точки зрения алгебры логики [8, 9, 14]. Помимо отсутствия четкой нормативной базы [6, 11, 12, 16, 17] в этих вопросах, в научной сфере также плохо раскрыты данные темы.

В алгебре логики есть подходящий метод расчета под такие задачи – метод минимальных сечений, где «минимальным сечением» является связка элементов, работоспособное состояние которых обеспечивает заданное по условию работоспособное состояние системы, при этом совсем не обязательно в группу входят все элементы системы. Решение всех возможных связок элементов, в совокупности обеспечивающих работоспособное состояние для конкретной задачи, является значением конечной вероятности работоспособного состояния всей системы.

Чтобы в случае приведения кольцевой сети подачи и распределения воды к схеме последовательно-параллельных соединений последняя смогла более шире и точнее учитывать некоторые функциональные и конструктивные особенности, было предложено рассматривать математическую модель СПРВ как совокупность параметрической (функциональной), конструктивной и эксплуатационной (обслуживание системы) надежности.

Как уже было представлено выше, функциональная надежность обеспечивает основные функции – транзит и забор воды из системы с требуемыми параметрами. Согласно нормам подача воды от расчетной должна составлять не менее 70 %. При этом следует также учитывать, что, в отличие от конструктивной надежности, где рассматривается надежность самого элемента и влияющих на нее факторов, понижение количества воды, подаваемой на участке, может быть вследствие не только поломки самого участка, но и снижения подачи воды на смежных участках или отсутствия возможности подачи дополнительного количества воды через другие участки из-за недостаточной запроектированной площади сечения труб. Таким образом, при построении схемы функциональной надежности СПРВ (рис. 1) трубопровод и смежные с ним участки следует соединять параллельно, создавая таким образом как бы функциональную единицу, ведь сказаться на параметрах трубопровода может снижение подачи воды на смежных участках, однако отказ только одного из них, при условиях

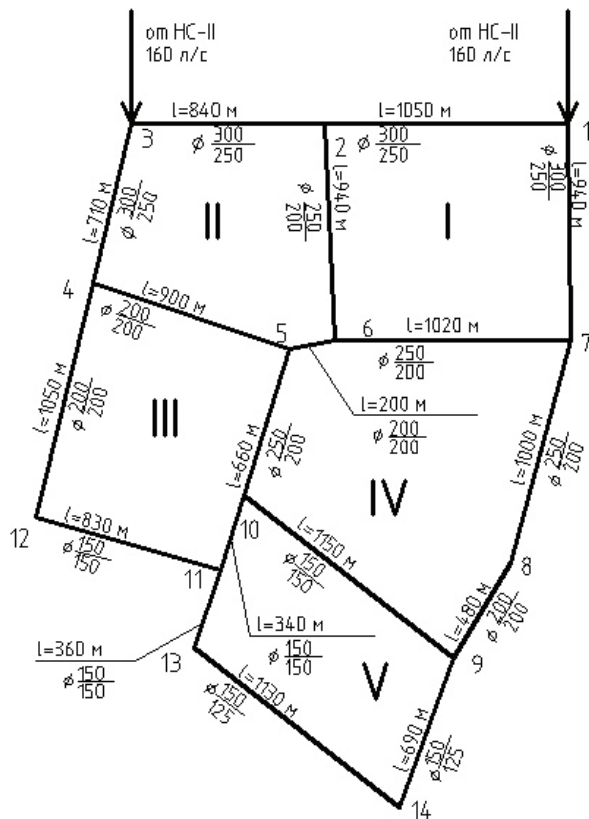


Рисунок 1 – Схема водопроводной сети.

резервирования пропускной способности, не приведет к отказу всей подсистемы. При этом, согласно нормативной документации, подача воды на любом уз участках ниже от расчетной более чем на 30 % считается отказом систем.

Для проведения расчета удобней воспользоваться обозначениями, принятыми в алгебре логики, где параллельное соединение можно выразить в виде дизъюнкций (логический оператор «или», \vee), а последовательное – конъюнкций (логический оператор «и», \wedge) (табл. 1, 2).

Отобразив всю последовательность соединений участков рисунка 1 с помощью конъюнкций и дизъюнкций, согласно алгебре логики, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}
 & (P_{1-2} \vee P_{1-7} \vee P_{2-3} \vee P_{2-6}) \wedge (P_{1-2} \vee P_{2-3} \vee P_{2-6} \vee P_{3-4}) \wedge (P_{1-7} \vee P_{1-2} \vee P_{6-7} \vee P_{7-8}) \wedge (P_{2-6} \vee P_{1-2} \vee P_{2-3} \vee P_{6-7} \vee P_{5-6}) \wedge \\
 & \wedge (P_{3-4} \vee P_{2-3} \vee P_{4-5} \vee P_{4-12}) \wedge (P_{4-5} \vee P_{3-4} \vee P_{5-6} \vee P_{5-10} \vee P_{4-12}) \wedge (P_{5-6} \vee P_{2-6} \vee P_{6-7} \vee P_{4-5} \vee P_{5-10}) \wedge (P_{6-7} \vee P_{1-7} \vee P_{7-8} \vee \\
 & \vee P_{2-6} \vee P_{5-6}) \wedge (P_{7-8} \vee P_{1-7} \vee P_{6-7} \vee P_{8-9}) \wedge (P_{8-9} \vee P_{7-8} \vee P_{9-10} \vee P_{9-14}) \wedge (P_{4-12} \vee P_{3-4} \vee P_{4-5} \vee P_{11-12}) \wedge (P_{11-12} \vee \\
 & \vee P_{4-12} \vee P_{10-11} \vee P_{11-13}) \wedge (P_{5-10} \vee P_{5-6} \vee P_{4-5} \vee P_{9-10} \vee P_{10-11}) \wedge (P_{10-11} \vee P_{5-10} \vee P_{9-10} \vee P_{11-12} \vee P_{11-13}) \wedge (P_{9-10} \vee \\
 & \vee P_{5-10} \vee P_{10-11} \vee P_{8-9} \vee P_{9-14}) \wedge P_{9-14} \vee P_{8-9} \vee P_{9-10} \vee P_{13-14}) \wedge (P_{13-14} \vee P_{9-14} \vee P_{11-13}) \vee (P_{11-13} \vee P_{10-11} \vee P_{11-12} \vee \\
 & \vee P_{13-14}).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Дальнейшее решение производим согласно формулам теории вероятности [1].

Параметр вероятности безотказной работы: а) для двух параллельно соединенных элементов; б) для последовательного соединения элементов:

$$\text{а) } P_{a,b} = 1 - [(1 - P_a) \cdot (1 - P_b)]; \tag{2}$$

$$\text{б) } P_{a,b} = P_a \cdot P_b. \tag{3}$$

Для расчета были приняты два вида материала – чугун (значение диаметра на рисунке над чертой) и пластик (значение диаметра на рисунке под чертой).

В результате получили следующие значения:

Таблица 1 – Результаты расчета показателей надежности участков кольцевой сети (для $t = 1$ год) из чугунных труб ($\lambda = 0,43$ 1/км-год, $\mu = 175$ 1/год [13])

№ уч.	d , мм	l , км	$Q_{\text{пут.}}$, л/с	$P_i = e^{-\lambda t}$	$K_{pi} = \mu / \mu + \lambda l_i$
1	2	3	4	7	10
1–2	300	1,05	22	0,636702	0,997427
1–7	300	0,94	20	0,667539	0,997696
6–7	250	1,02	22	0,644968	0,997500
2–6	250	0,94	21	0,667539	0,997696
5–6	200	0,2	5	0,917602	0,999509
4–5	200	0,9	20	0,679118	0,997793
3–4	300	0,71	15	0,736926	0,998258
2–3	300	0,84	18	0,696866	0,997940
5–10	250	0,66	15	0,752939	0,998381
10–11	150	0,34	9	0,863998	0,999165
11–12	150	0,83	18	0,699868	0,997965
4–12	200	1,05	22	0,636702	0,997427
7–8	250	1	22	0,650538	0,997549
8–9	200	0,48	14	0,813525	0,998822
9–10	150	1,15	26	0,609907	0,997182
9–14	150	0,69	15	0,743290	0,998307
13–14	150	1,13	26	0,615174	0,997231
11–13	150	0,36	10	0,856600	0,999116
Σ		14,29			

Таблица 2 – Результаты расчета показателей надежности участков кольцевой сети (для $t = 1$ год) из полиэтиленовых труб ($\lambda = 0,02$ 1/км-год, $\mu = 175$ 1/год [13])

№ уч.	d , мм	l , км	$Q_{\text{пут.}}$, л/с	$P_i = e^{-\lambda t}$	$K_{pi} = \mu / \mu + \lambda l_i$
1	2	3	4	5	10
1–2	250	1,05	22	0,979221	0,999880
1–7	250	0,94	20	0,981378	0,999893
6–7	200	1,02	22	0,979809	0,999883
2–6	200	0,94	21	0,981378	0,999893
5–6	200	0,2	5	0,996008	0,999977
4–5	200	0,9	20	0,982163	0,999897
3–4	250	0,71	15	0,985902	0,999919
2–3	250	0,84	18	0,983342	0,999904
5–10	200	0,66	15	0,986888	0,999925
10–11	150	0,34	9	0,993224	0,999961
11–12	150	0,83	18	0,983539	0,999905
4–12	200	1,05	22	0,979221	0,999880
7–8	200	1	22	0,980201	0,999886
8–9	200	0,48	14	0,990447	0,999945
9–10	150	1,15	26	0,977265	0,999869
9–14	125	0,69	15	0,986296	0,999921
13–14	125	1,13	26	0,977656	0,999871
11–13	150	0,36	10	0,992827	0,999959
Σ		14,29			

$$P_{\text{чугун}} = 0,667; P_{\text{пластик}} = 0,878.$$

Однако стоит уделить внимание тому, что трубопроводы в водопроводной сети имеют различные диаметры, а следовательно, в случае поломки количество воды, которое могут дополнительно транспортировать через себя смежные участки, также будет отличаться. Возможно, будет уместным учет влияния диаметров трубопроводов смежных участков, с точки зрения резервирования пропускной способности, на случай поломки одной из труб.

Вопросами неравнозначности элементов в различных отраслях науки занимались И. А. Рябинин (военная техника, электроника) [14], А. В. Горопашная (информационные технологии, электроника) [4], Ю. В. Доронина (экологический мониторинг) [5], А. А. Ионин (газоснабжение) [7], Н. И. Самойленко (водоснабжение) [13] и другие. Корни предложенной методики уходят в разработанный А. А. Иониным подход для расчета надежности с учетом значимости участков в зависимости от расхода в трубах.

Ввиду того, что в водоснабжении понижение подачи воды более чем на 30 % от расчетной считается отказом трубопровода, для улучшения ситуации с доставкой недостающей воды через смежные участки может вводиться резервирование пропускной способности трубопровода. Поэтому для расчета значимости участков в дальнейшем будет более перспективно опираться на площадь живого сечения труб, а не расчетный расход.

Учет значимости участков может быть полезным, так как ввиду разного диаметра труб, поступление количества жидкости из различных участков будет разным. Это особенно скажется в случае, если в системе не предусматривалось резервирование живого сечения труб, в таком случае поломка одного участка может иметь большие последствия, чем временное перекрытия подачи воды на других участках.

Т. о. при расчете будет целесообразным ввести, своего рода, коэффициент значимости в зависимости от диаметров участков.

Для этого находим величину относительного сечения труб на участке сети C_i :

$$C_i = \frac{f_i}{F} = \frac{d_i^2}{D^2} = \left(\frac{d_i}{D}\right)^2, \quad (4)$$

где d_i и f_i – диаметр (м) и площадь (м²) сечения труб, которые являются смежными с расчетным участком;

D и F – условный диаметр (м) и площадь сечения трубопровода (м²) для пропуска всего подаваемого в сеть расхода воды Q при скорости течения $V = 1$ м/с,

$$D = d_{c(1)} + d_{c(2)} + \dots + d_{c(n-1)} + d_{c(n)}.$$

Так как определяется влияние отключения других участков на снижение подачи воды в расчетном трубопроводе, естественно будет находить C_i только для смежных труб. Ввиду того, что отключение одного из смежных участков не обязательно приводит к уменьшению подачи воды ниже 70 % от расчетной, т. е. параметрическому отказу, следовательно, логично будет соединять данные участки параллельно. Аналогичным в структурно-логической схеме подсистемы будет соединение смежных труб с расчетным.

Таким образом, получаются отдельные подсистемы, позволяющие произвести расчет вероятности работы (P) отдельного участка с учетом влияния параметров смежных участков (снижение подачи воды на них, количество подключенных участков, площадь живого сечения труб). Пример расчета одной из подсистем приведена ниже. Так как за отказ системы можно считать невыполнение функции подачи воды в требуемом объеме одного из трубопроводов, следовательно, каждую из групп участков соединяем последовательно друг с другом в структурно-логической схеме и соответственно формуле (3) находим вероятность безотказной работы всей системы.

Расчет для участка 1–2 ($d = 0,25$ м), материал – полиэтилен (табл. 3, 4). Смежными ему являются участки 1–7 ($d = 0,25$ м), 2–3 ($d = 0,25$ м) и 2–6 ($d = 0,20$ м). Соответственно, сумма всех диаметров составит 0,70 м. Тогда коэффициенты значимости для смежных участков составят $C_{1-7} = 0,357$, $C_{2-3} = 0,357$, $C_{2-6} = 0,286$. Следом перемножаем P_i и C_i . Затем ведем расчет участков как параллельно соединенных элементов в структурно-логической схеме.

Таблица 3 – Пример расчета одной из подсистем

	№ уч-ка	Диаметр	C_i	$P_i = e^{-\lambda t}$	$C_i P_i$
Основной	1–2	0,25		0,979221	0,979221
Смежные	1–7	0,25	0,357	0,981378	0,350
	2–3	0,25	0,357	0,983342	0,351
	2–6	0,20	0,286	0,981378	0,281
		0,7	1,0	$P_{(подсист)} = 0,994$	

Таблица 4 – Расчетные показатели вероятности безотказной работы отдельных участков с учетом влияния пропускной способности смежных участков

Полиэтилен						Чугун					
№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i	№ уч.	P_i
1–2	0,994	3–4	0,996	7–8	0,994	1–2	0,890	3–4	0,996	7–8	0,994
1–7	0,994	2–3	0,995	8–9	0,997	1–7	0,994	2–3	0,995	8–9	0,997
6–7	0,992	5–10	0,995	9–10	0,990	6–7	0,992	5–10	0,995	9–10	0,990
2–6	0,992	10–11	0,997	9–14	0,996	2–6	0,992	10–11	0,997	9–14	0,996
5–6	0,998	11–12	0,995	13–14	0,978	5–6	0,998	11–12	0,995	13–14	0,978
4–5	0,993	4–12	0,994	11–13	0,998	4–5	0,993	4–12	0,994	11–13	0,998

После расчета всех подсистем получаем показатель параметрической вероятности безотказной работы с учетом влияния пропускной способности смежных участков. Для представленной в примере кольцевой системы подачи и распределения воды из материала полиэтилен, $P_{\text{парам.ПЭ}} = 0,894$, при той же системе и материале трубопроводов чугун – $P_{\text{парам.чугун}} = 0,800$. Этот показатель является одним из трех важных компонентов в решении задач надежности СПРВ с точки зрения особенностей сооружений: конструктивной, параметрической и эксплуатационной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, М. И. О методологии исследования надёжности стареющих элементов систем водопровода и канализации [Текст] / М. И. Алексеев, Ю. А. Ермолин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – Вып. № 9. – С. 2–4.
2. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании [Текст] / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Каишиати. – М.: Стройиздат, 1988. – 384 с.
3. Голинкевич, Т. А. Прикладная теория надежности [Текст] / Т. А. Голинкевич. – М.: Высшая школа, 1985. – 160 с.
4. Горопашная, А. В. Адаптация логико-вероятностных методов оценки веса, зависимости, вклада, ущерба и активности элементов для немонотонных логических функций [Текст] / А. В. Горопашная // International scientific school «Modelling and analysis of safety and risk in complex systems»: proceedings [of the Seventh Intern. sci. school MA SR-2007, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 4–8, 2007] / [под ред. И. А. Рябинина, Е. Д. Соложенцева]. – Saint Petersburg: Inst. of problems of mechanical engineering of Russ. acad. of sciences (IPME RAS), 2007. – P. 409–412.
5. Доронина, Ю. В. Метод модернизации информационных систем экологического мониторинга на основе анализа их функциональной нагрузки [Текст] / Ю. В. Доронина, В. О. Рябовая // Тр. СПИИРАН. – 2016. – Выпуск 44. – С. 133–152.
6. ДСТУ 2862-94. Методы расчета показаний надежности [Текст]. – Введ. 1994-12-08. – К.: Держстандарт України, 1994. – 39 с.
7. Ионин, А. А. Надежность систем тепловых сетей [Текст] / А. А. Ионин. – Москва: Стройиздат, 1989. – 265 с. – (НК: Надежность и качество).
8. Круценюк, И. Ю. Математические методы и модели оценки вероятности безотказной работы сети водоснабжения на примере г. Норильска [Текст]: дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.18. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ [Текст] / И. Ю. Круценюк. – Норильск, 2005. – 193 с.
9. Левин, В. И. Логическая теория надежности сложных систем [Текст] / В. И. Левин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с. – (Надежность и качество).
10. Найманов, А. Я. Особенности оценки надежности кольцевой сети водопроводной сети [Текст] / А. Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 12. – С. 11–16.
11. Правила предоставления коммунальных услуг собственникам и пользователям помещений в многоквартирных домах и жилых домов [Текст]. – Москва: Проспект, 2017. – 157 с. – ISBN 978-5-392-26896-2.
12. Про затвердження Правил надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення та типового договору про надання послуг з централізованого опалення, постачання холодної та гарячої води і водовідведення [Электронный ресурс]: Постановою КМУ від 21 липня 2005 р. № 630: із змінами / Законодавство України. – Електрон. дан. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/630-2005-п>. – Загл. с экрана.
13. Ромейко, В. С. Защита трубопроводов от коррозии [Текст] / В. С. Ромейко, В. Г. Баталов, И. А. Ушакова. – М.: ВНИИМП, 2000. – 208 с.
14. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с. – (Б-ка инженера по надежности).

15. Самойленко, Н. И. Функциональная надежность магистральных трубопроводных транспортных систем [Текст] : Монография / Н. И. Самойленко, Т. С. Сенчук. – Х. : Издательство «ХТМТ», ХНАГХ, 2009. – 276 с.
16. СП 31.13330.2012. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84* [Текст]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 124 с.
17. СП 32.13330.2012. Свод правил. Канализация Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 [Текст]. – Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 87 с.

Получено 08.10.2017

Г. С. ТУРЧИНА
МАТЕМАТИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ НАДІЙНОСТІ З
ВРАХУВАННЯМ ЗНАЧУЩОСТІ ТРУБОПРОВІДІВ У КІЛЬЦЕВИХ
СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. Стаття присвячена проблемі врахування нерівнозначності різних ділянок трубопроводу у кільцевій системі подачі та розподілу води при розрахунку параметричної надійності. Запропонована методика знаходження показників надійності безвідмовної роботи з урахуванням впливу коефіцієнтів значущості ділянок трубопроводів.

Ключові слова: надійність, вірогідність безвідмовної роботи, кільцева водопровідна мережа, алгебра логіки, місткові системи.

GALINA TURCHINA
A MATHEMATICAL APPROACH TO SOLVING PROBLEMS OF RELIABILITY,
WITH REGARD TO THE SIGNIFICANCY OF PIPELINES IN THE RING
SYSTEMS OF WATER SUPPLY
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article is devoted to the problem of account of unaccounted in equivalence of different sections of the pipelines in the ring system of the serve and distributing of water at the calculation of parametric reliability. The method of finding of indexes of faultless probability work is offered, with regard to account influencing of coefficient of significancy of sections of the pipelines.

Key words: reliability, probability of faultless work, ring systems of water supply, logical algebra, bridge connection.

Турчина Галина Сергеевна – магістр; преподаватель-стажер кафедры городского строительства и хозяйства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: надежность сетей, методы повышения надежности сетей водоснабжения.

Турчина Галина Сергіївна – магістр; викладач-стажист кафедри міського будівництва та господарства ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: надійність систем, методи підвищення надійності мереж водопостачання.

Turchina Galina – Master; graduate associate Municipal Building and Economy Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: reliability of systems, methods of increasing reliability of water supply nets.