

Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK¹
Dorota PAPCIAK²
Jadwiga KALETA³
Alicja PUSZKAREWICZ⁴

ANALIZA NIEZAWODNOŚCI STACJI UZDATNIANIA WODY

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę składają się z połączonych ze sobą elementów (podsystemów) stanowiących integralną całość, współpracujących ze sobą w sposób ciągły w celu zapewnienia dla konsumentów wody o odpowiedniej jakości. W przypadku gdy jakość wody w źródle nie odpowiada normatywom stawianym wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi, woda musi być poddana procesom uzdatniania. Niezawodność funkcjonowania stacji uzdatniania wody jest jednym z podstawowych elementów szeroko rozumianej analizy niezawodności i bezpieczeństwa całego systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Niezawodność dostawy wody polega na zapewnieniu stabilnych warunków, umożliwiających pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania na wodę w odpowiedniej ilości i wymaganej jakości w dowolnym, dogodnym dla konsumentów wody czasie. W pracy przedstawiono podstawy analizy niezawodności, podano podstawowe miary oraz zasady wykorzystania struktur niezawodnościowych. Obliczenia wykonano dla stacji uzdatniania wody na podstawie schematu niezawodnościowego metodą jednoparametryczną. Na podstawie danych z eksploatacyjnych stacji uzdatniania wody (SUW) wchodzącej w skład systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta liczącego ok 80 tys. mieszkańców sporządzono schemat niewodności stacji oraz przeprowadzono obliczenia wskaźnika gotowości K. W metodzie wykorzystano podstawowe struktury niezawodnościowe. Wyznaczoną miarę niezawodności porównano z wartościami kryterialnymi.

Słowa kluczowe: stacja uzdatniania wody, niezawodność, bezpieczeństwo, ryzyko

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Barbara Tchórzewska-Cieślak, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651435, cbarbara@prz.edu.pl

² Dorota Papciak, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

³ Jadwiga Kaleta, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

⁴ Alicja Puskarewicz, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

1. Wprowadzenie

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) zgodnie z Ustawą z dnia 17 lipca 2009 r. o zmianie ustawy o zarządzaniu kryzysowym (Dz. U. z 2009 r. Nr 131, poz.1076) należą do infrastruktury krytycznej, a niezawodne i bezpieczne funkcjonowanie wszystkich jego podsystemów od ujęcia wody poprzez jej uzdatnianie oraz dystrybucję do konsumentów warunkują bezpieczeństwo dostawy wody.

Bezpieczeństwo SZZW ma swoje międzynarodowe regulacje prawne, których źródłem są przede wszystkim wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia – WHO (ang. *World Health Organization*). W 2004 roku, w trzeciej edycji wytycznych dotyczących jakości wody do spożycia (*Guidelines for Drinking-Water Quality*), organizacja WHO przedstawiła założenia do opracowania tzw. Planu Bezpieczeństwa Wodnego (ang. *Water Safety Plan – WSP*), które są przeznaczone dla systemów zbiorowego zaopatrzenia ludności w wodę i które wychodzą naprzeciw wymaganiom odnośnie do ochrony infrastruktury krytycznej.

Stan bezpieczeństwa zwykle jest akceptowany, jeśli system spełnia wymagania bezpieczeństwa sformułowane w przepisach prawnych i normach [3,8,10,11,12].

W odniesieniu do konsumentów wody do spożycia bezpieczeństwo jest rozumiane jako prawdopodobieństwo uniknięcia zagrożenia wynikającego ze spożycia wody o jakości niezgodnej z obowiązującym normatywem lub z braku wody [1,2,6,8,9,11,12]. Niezawodność dostawy wody polega na zapewnieniu stabilnych warunków, umożliwiających pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania na wodę w odpowiedniej ilości i wymaganej jakości w dowolnym, dogodnym dla konsumentów wody czasie, a także w akceptowalnej przez nich cenie [5,13].

2. Metodyka badań

2.1 Miary niezawodności

Ilościowo niezawodność systemów opisuje się, wykorzystując do tego celu wskaźniki niezawodności tzw. miary. Są to charakterystyki funkcyjne lub liczbowe uwzględniające właściwości systemu i jego elementów oraz opisujące procesy losowe związane z ich funkcjonowaniem. Wśród wskaźników można wyróżnić wskaźniki o charakterze podstawowym, opisujące prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanach niezawodności lub zawodności oraz wskaźniki uzupełniające np. średni czas przebywania systemu w określonych stanach. Do podstawowych wskaźników stosowanych w analizie niezawodności SZW należą [7,5,13].

Średni czas pracy bezuszkodzeniowej T_p jest wartością oczekiwaną zmiennej losowej T_p określającej czas pracy (zdatności) systemu (lub jego elementów), między dwoma kolejnymi uszkodzeniami [13].

$$T_p = \frac{1}{k+z} \cdot \left(\sum_{i=1}^k t_{pi} + z \cdot t \right) \quad (1)$$

t - czas obserwacji,

t_{pi} - wartość i -tego czasu pracy obiektów uszkodzających się,

k - liczba okresów pracy obiektów uszkodzających się,

z - liczba okresów pracy obiektów nieuszkodzających się

$f(t)$ - gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej T_p .

Średni czas naprawy T_n jest sumą czasu oczekiwania na naprawę T_d i czasu naprawy rzeczywistej (do moment włączenia elementu do eksploatacji) T_0 .

$$T_n = T_d + T_0 \quad (2)$$

Średni czas naprawy jest wartością oczekiwaną zmiennej losowej T_n określającej czas naprawy.

$$T_n = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{ni} \quad (3)$$

$f_o(t)$ - gęstość zmiennej losowej T_o ,

n_o - liczba napraw w badanym okresie,

t_{ni} - czas trwania i - tej naprawy.

Intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$

$$\lambda = \frac{1}{T_{ps}}, \quad (4)$$

$$\lambda(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} \quad (5)$$

T_{ps} - średnia wartość czasu pracy pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami,

$n(t, t + \Delta t)$ - liczba wszystkich uszkodzeń w przedziale czasu Δt ,

N - liczba badanych elementów lub w przypadku systemów liniowych dł. w km,

Δt - czas obserwacji.

Intensywność odnowy $\mu(t)$ określa liczbę niesprawności w jednostce czasu, można ją wyznaczyć z danych eksploatacyjnych wg wzoru:

$$\mu(t) = \frac{n(t, t + \Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} \quad (6)$$

$n(t, t + \Delta t)$ - liczba elementów, których odnowa zakończyła się w przedziale czasu $(t, t + \Delta t)$,

$n(t)$ - liczba elementów, których odnowa zakończyła się do czasu t ,
 Δt - długość okresu obserwacji.

Wskaźnik gotowości $K(t)$ określa prawdopodobieństwo, że system będzie w stanie niezawodności. Wraz ze wzrostem długości czasu eksploatacji systemu, wartość wskaźnika gotowości $K(t)$ zmierza do granicznej wartości, która nosi nazwę stacjonarnego wskaźnika gotowości K [5,7,13]

$$K = \lim_{t \rightarrow \infty} K(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} = \frac{T_p}{T_p + T_n} = \frac{\frac{T_p}{T_n}}{\frac{T_p}{T_n} + 1} \quad (7)$$

Wskaźnik zawodności U określa prawdopodobieństwo, że system będzie znajdował się w stanie zawodności.

$$U = 1 - K \quad (8)$$

2.2. Analiza niezawodności układu technologicznego SUW na podstawie schematu technologicznego - metoda jednoparametryczna

W trakcie sporządzania schematu niezawodnościowego, jego elementy traktuje się jako ogniwa pracujące z określonym prawdopodobieństwem, określającym zdarzenie pracy bezuszkodzeniowej. Można wyróżnić następujące struktury niezawodnościowe [5,7,13].:

a) Struktura szeregową- jeżeli uszkodzenie dowolnego elementu powoduje uszkodzenie całego podsystemu, to odpowiadające mu ogniwa niezawodnościowe należy sytuować w szeregowej strukturze niezawodnościowej

Dla struktury szeregowej wskaźnik gotowości K_s , jest równy iloczynowi niezawodności poszczególnych jej elementów składowych:

$$K = \prod_{i=1}^n K_i \quad (9)$$

jeżeli dla każdego „i”:

$$K_i = K_0 \text{ to } K = K_0^n \quad (10)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$, n - liczba elementów.

- b) Struktura progowa- jeżeli uszkodzenie podsystemu następuje z chwilą uszkodzenia „k” z pośród „M” wszystkich jednorodnych elementów, to ogniwa niezawodnościowe odpowiadające tym elementom należy sytuować w jednorodnej progowej strukturze typu „M-k z M”

Niezawodność jednorodnej struktury progowej wynosi [13]:

$$K_S = \sum_{k=0}^{k_{dop}} \binom{M}{k} \cdot K_0^{M-k} \cdot K_{p0}^k \quad (11)$$

gdzie:

- k - liczba elementów uszkodzonych,
 k_{dop} - dopuszczalna liczba elementów uszkodzonych,
 K_S - wskaźnik gotowości struktury progowej,
 K_0 - wskaźnik gotowości pojedynczego elementu,
 K_{p0} - wskaźnik postoju pojedynczego elementu
M - liczba wszystkich elementów.

$$\binom{M}{k} = \frac{M!}{k!(M-k)!} - \text{wartość współczynnika dwumianowego} \quad (12)$$

- c) Struktura równoległa - jeżeli uszkodzenie podsystemu następuje z chwilą uszkodzenia wszystkich jednorodnych elementów, to poszczególne ogniwa odpowiadające tym elementom należy sytuować w równoległej strukturze niezawodnościowej. Struktura równoległa jest szczególnym przypadkiem struktury progowej. Niezawodność struktury wyraża się wzorem:

$$K_S = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - K_j) \quad (13)$$

gdzie:

- K_S - wskaźnik gotowości struktury równoległej,
 K_j - wskaźnik gotowości pojedynczego elementu,
M - liczba wszystkich elementów.

2.3. Wymagane wartości wskaźników niezawodności

W tabeli 1 przedstawiono wartości wymaganego poziomu niezawodności dla SZW [4,13].

Tabela 1. Wymagane wartości wskaźnika K

Table 1. The required values K

Kategoria wodociągu	Stopień pokrycia całkowitego zapotrzebowania na wodę [%]	Wymagany wskaźnik gotowości K_w
I- wodociągi duże, liczba mieszkańców >500 000	100	$\geq 0,9917809$
	≥ 70	$\geq 0,9945206$
	< 70	$\geq 0,9999453$
II- wodociągi średnie, liczba mieszkańców 50 000-500 000	100	$\geq 0,9835617$
	≥ 70	$\geq 0,9917809$
	< 70	$\geq 0,99945421$
I- wodociągi duże, liczba mieszkańców $\leq 50 000$	100	$\geq 0,9671233$
	≥ 70	$\geq 0,9835617$
	< 70	$\geq 0,9972603$

3. Przykład aplikacyjny

Analizie poddano układ stacji uzdatniania wody podziemnej dla miasta liczącego ok 80 tys. mieszkańców.

Urządzenia wodne do poboru wody to ujęcia pompowe:

- SI w skład którego wchodzi 5 szt. studni wierconych ($Q_{\text{emax}} 183 \text{ m}^3/\text{h}$).

- S II w skład którego wchodzi 22 szt. studni wierconych ($Q_{\text{emax}} = 715 \text{ m}^3/\text{h}$).

Projektowana maksymalna wydajność stacji uzdatniania wody (SUW) to $715 \text{ m}^3/\text{h}$; średnia roczna np. w 2012/2013 roku wyniosła około $265 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ujmowana woda kierowana jest do studni zbiorczej (czas zatrzymania 2-4 godziny, w zależności od aktualnej produkcji wody). Następnie woda kierowana jest do „napowietrzalni” (kaskady natleniającej). Tuż pod kaskadą umiejscowione jest dozowanie utleniacza chemicznego jakim jest nadmanganian potasu oraz koagulantu PAX – 18. Kolejnym etapem uzdatniania wody są pionowe komory koagulacyjno-sedymentacyjne o czasie kontaktu 6 – 8 godzin. Czas zatrzymania w osadnikach wynosi kilkanaście godzin. Następnym etapem jest filtracja wody (filtry trójwarstwowe: piasek kwarcowy, wpracowane złożo manganowe, antracyt, prędkość filtracji około 3 m/h), a końcowym dezynfekcja za pomocą podchlorynu sodu (rys. 1)

Analizę niezawodności SUW wykonano na podstawie schematu technologicznego oraz danych eksploatacyjnych uzyskanych od przedsiębiorstwa wodociągowego. Symbole na rysunku 2 oznaczają:

Sb- studnia zbiorcza

A - pompownia I st

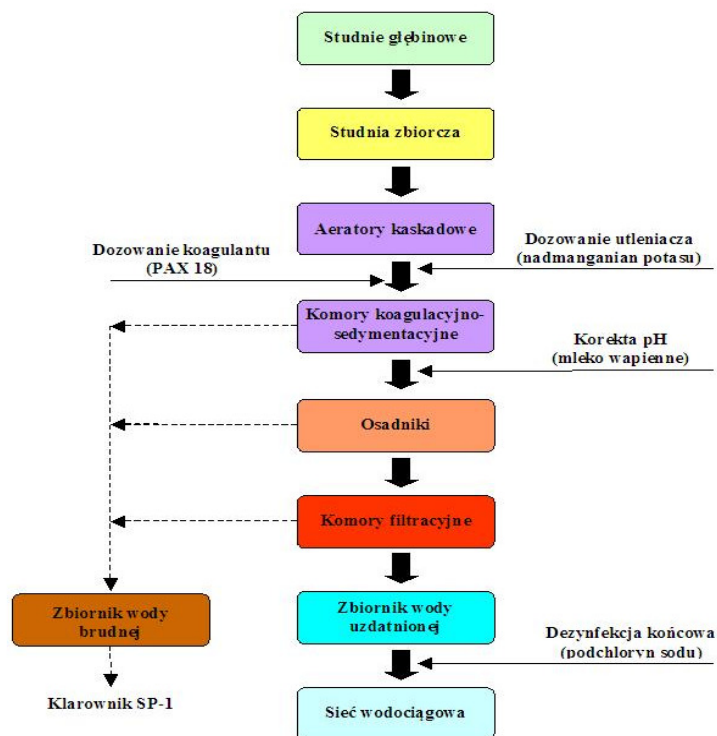
B - aeratory

C - osadniki poziome

F - filtry

B - pompownia II st

ZB - zbiorniki wody czystej.



Rys. 1. Schemat technologiczny SUW

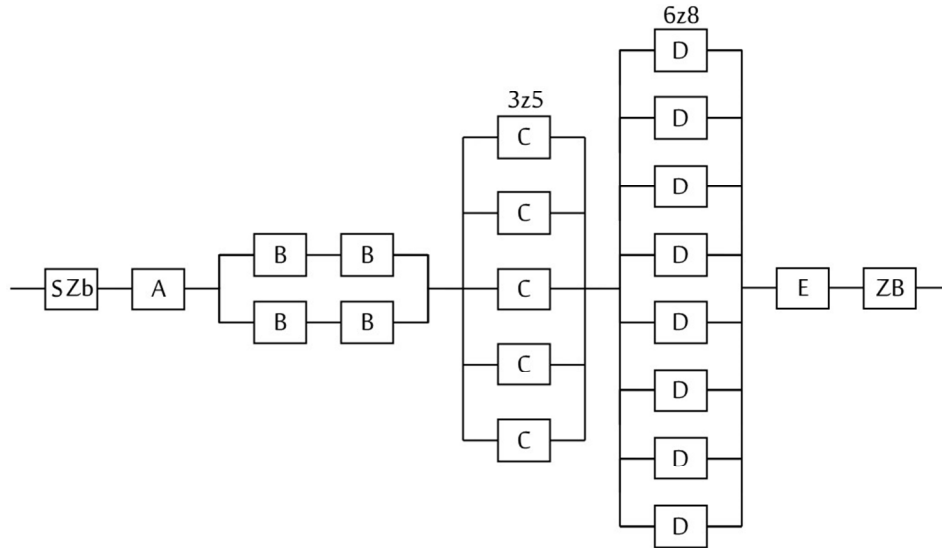
Fig. 1. The scheme of water treatment plant

W tabeli 2 zamieszczono wartości wskaźników niezawodności K dla poszczególnych obiektów SUW. Dla pompowni wartość K_A wyznaczono na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 3. Pozostałe wartości wskaźników przyjęto wg danych literaturowych [5].

Tabela 2. Wartości wskaźników K przyjęte do obliczeń

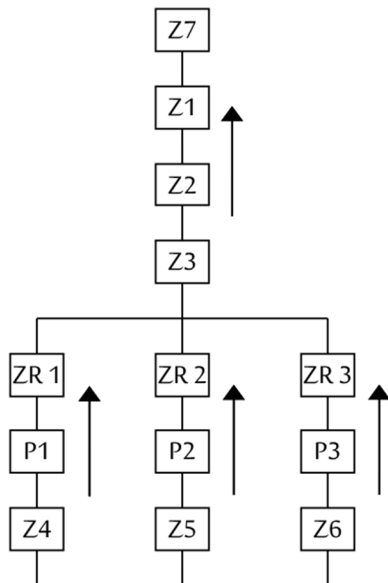
Table 2. The values of K index

Symbol obiektu SUW	K
SZb	0,994
A	0,988
B	0,999
C	0,995
D	0,961
E	0,988
ZB	0,994
P1,P2,P3	0,956
Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,Z6,Z7	0,998
ZR1,ZR2,ZR3	0,999



Rys. 2. Schemat niezawodnościowy SUW

Fig. 2. The scheme of WTP



Rys. 3. Schemat niezawodnościowy pompowni

Fig. 3. The scheme of pump station

Dla pompowni (struktura równoległa 1 z 3), przejęto następujące oznaczenia: P1, P2, P3 – pompy; Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7 – zawory odcinające; ZR1, ZR2, ZR3 – zawory zwrotne

Na podstawie wzorów (9-13) obliczono wartości wskaźników niezawodności K dla poszczególnych struktur:

- SZb - A

$$K_{SZbA} = 0,994 \cdot 0,998 = 0,992$$

- B

$$K_B = 1 - [1 - (0,999)^2]^2 = 0,999$$

- C 3 z 5

$$K_{pC} = 1 - K_C$$

$$K'_C = \binom{5}{5-0} \cdot K_C^{5-0} \cdot K_{pC}^0 + \binom{5}{5-1} \cdot K_C^{5-1} \cdot K_{pC}^1 + \binom{5}{5-2} \cdot K_C^{5-2} \cdot K_{pC}^2 = 0,999$$

- D 6 z 8

$$K'_D = \binom{8}{8-0} \cdot K_D^{8-0} \cdot K_{pD}^0 + \binom{8}{8-1} \cdot K_D^{8-1} \cdot K_{pD}^1 + \binom{8}{8-2} \cdot K_D^{8-2} \cdot K_{pD}^2 = 0,997$$

Dla całości: K=0,9851

Analizując wyznaczoną wartość K z wartością wymaganymi dla miast o liczbie mieszkańców poniżej 50 000 oraz zakładając wymagane 100% pokrycie zapotrzebowania na wodę $K_w \geq 0,9671233$ zgodnie z tab. 1 oceniono, że wskaźnik niezawodności dostawy wody mieści się w wartościach normatywnych.

4. Wnioski

- Na podstawie analizy stwierdza się, że wartość wskaźnika niezawodności układu technologicznego SUW mieści się w wartościach zalecanych.
- Analiza niezawodności układu technologicznego wykazała, że stopień rezerwowania poszczególnych etapów uzdatniania wody jest wystarczający, a układ technologiczny może pracować również w stanach awaryjnych niektórych urządzeń zapewniając przy tym odpowiednią jakość wody uzdatnionej.
- Można natomiast rozważyć modernizację zbiorników wody czystej.

Literatura

- [1] Aven T.: Reliability and Risk Analysis. Elsevier, London 1992.
- [2] Haimes Y.Y., Moser D., Stakhin E.: Risk Based Decision Making in Water Resources. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 12, 2006, s. 401-415.
- [3] Hradey S.E.: Drinking water quality – a risk management approach. Water, 26(1), 2001, s. 29-32.
- [4] Iwanejko R.: Preliminary analysis of risks attributed to operation of small surface water intakes. Mat. konf. „Water Supply and Water Quality”, Wydawn. PZITS O/Wielkopolski, Poznań–Gniezno, I, 2008, s. 229-239.

- [5] Kwietniewski M., Roman M., Kłos-Trębaczkiwicz H.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.
- [6] Rak J.: A study of the qualitative methods for risk assessment in water supply systems. Environment Protection Engineering, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, z. 3-4, s. 123-134, 2003.
- [7] Rak J.: Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 111, Inżynieria Środowiska, z. 20, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1993.
- [8] Rak J.: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. PAN, Komitet Inżynierii Środowiska, t. 28, Lublin 2005.
- [9] Rak J.: Selected problems of water supply safety. Environmental Protection Engineering, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, 35, 2009, s. 29-35.
- [10] Rak, J., Pietrucha-Urbanik, K. New directions for the protection and evolution of water supply systems - smart water supply. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA, z. 62 (3/I/2015), pp. 365-373. DOI: 10.7862/rb.2015.121.
- [11] Rak J, Tchórzewska-Cieślak B.: Ryzyko w eksploatacji systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Wydawnictwo Sidel-Przywecki, 2013, s. 1-164.
- [12] Tchórzewska-Cieślak B. Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2011. s. 1-217.
- [13] Wieczysty A., Iwanejko R., Lubowiecka T.: Podnoszenie niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. Metody oceny podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. PAN, Wydawn. Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2001.

ANALYSIS OF RELIABILITY OF WATER TREATMENT STATION

Summary

Collective water supply systems (CWSS) consist of interconnected elements (subsystems) constitute an integral whole, working together on a continuous basis to ensure consumers of water of appropriate quality. If the water quality does not match the source normative values posed water intended for human consumption, the water must be subjected to treatment processes. Reliability of the water treatment plant is one of the basic elements of the broader analysis of reliability and safety of the entire system of collective water supply. The reliability of water supply is to ensure stable conditions, allowing to cover the current and prospective demand for water in sufficient quantity and quality required at any convenient time for water consumers. The paper presents the basics of reliability analysis, are given basic measures and the rules for the use of structures reliability. Calculations were made for the water treatment plant on the basis of the reliability scheme one way method. Based on data from the operating water treatment plants (WTP), which is part of a system of collective water supply a city of about 80 thousand. residents prepared reliability scheme station and the calculations of the indicator K. Method uses the basic structure reliability. The determined reliability as compared with the values of criteria.

Keywords: water treatment, reliability, security, risk

DOI:10.7862/rb.2016.234

Przesłano do redakcji: 24.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.