

Izabela Zimoch

Bezpieczeństwo działania systemu zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociągowej

Wymieniona w ustawie z 7 czerwca 2001 r o zbiorowym zaopatrzeniu w wodę i zbiorowym odprowadzaniu ścieków (tekst jednolity z 2006 r., DzU nr 123, poz. 858) właściwość niezawodnej eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę uwzględnia zarówno jego bezawaryjne działanie (niezawodność techniczna), jak również niezawodność bezpieczeństwa, która jest interpretowana jako zdolność systemu wodociągowego do bezpiecznego wykonywania swoich funkcji w danym środowisku. Bezpieczeństwo określone jest jako stan braku zagrożenia, stan spokoju i pewności. Zatem zapewnienie bezpieczeństwa funkcjonowania całego systemu zaopatrzenia w wodę powinno stanowić priorytet działalności przedsiębiorstw wodociągowych. Aby osiągnąć bezpieczeństwo, przedsiębiorstwa te podejmują działania optymalizujące proces dostarczania wody zarówno w skali systemowej, rozumianej jako szeroko pojęta gospodarka wodna i wodociągowa, jak i w skali obiektów i urządzeń spełniających określone zadania podczas oczyszczania wody i jej transportu do odbiorców.

Pomimo podjęcia wszelkich możliwych i ekonomicznie uzasadnionych środków zapobiegawczych w przedsiębiorstwie wodociągowym, praktycznie nie istnieje możliwość całkowitego zabezpieczenia wody dostarczanej odbiorcom przed potencjalną możliwością zmiany jej składu. Szczególnie istotnym zagadnieniem jest proces powstawania ubocznych produktów dezynfekcji w rozległych sieciach wodociągowych. Zagrożenie to jest potęgowane przez obecne warunki hydrauliczne eksploatacji większości systemów wodociągowych w Polsce. Konsekwencją zmniejszenia zapotrzebowania na wodę są małe prędkości przepływu, a co za tym idzie – długi czas przetrzymania wody w podsystemie dystrybucji (kilka dób) oraz zmienne kierunki transportu wody w sieci wodociągowej, co spowodowało odkładanie w przewodach osadów nie tylko mineralnych, ale również organicznych. Te czynniki w obecności chloru w wodzie, gwarantującego minimalizację zagrożenia mikrobiologicznego skażenia wody, zwiększają ryzyko powstawania trihalometanów w wodzie przebywającej w sieci wodociągowej.

Konieczność analizy ryzyka zmian jakości wody w funkcji zawartości THM wynika z faktu zagrożenia zdrowotnego, jakie niesie obecność tych związków w wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi, a także trudności precyzyjnego określenia warunków i częstotliwości występowania tych zmian. Duże ilości trihalometanów, w szczególności chloroformu, mogą być przyczyną skarg konsumentów na zapach wody, a przy długim czasie ekspozycji mogą

prowadzić do ich zachorowań (schorzenia wątroby, nerek, układu krążenia). Najczęstszymi negatywnymi skutkami spożywania wody z podwyższoną zawartością chloroformu jest wzrost poczucia senności i nudności, jak również zaburzenia wzroku, bóle głowy i żołądka, zmęczenie, nerwobóle oraz ogólna utrata aktywności fizycznej. Aby racjonalnie zminimalizować skutki występowania THM należy tak zarządzać procesem technologicznym oczyszczania wody, aby jak najmniejsze ilości ich prekursorów znajdowały się w dostarczanej wodzie, przy jednocześnie ekonomicznie uzasadnionym stopniu ich usuwania, gdyż wszelkie podejmowane działania powodują koszty, często nieuzasadnione, ponoszone przez konsumentów w cenie świadczonych usług wodociągowych [1].

W obliczu tych zagrożeń, a także uregulowań prawnych i uwarunkowań ekonomicznych, przedsiębiorstwa wodociągowe podejmują próby szacowania zagrożenia wywołanego zmianami jakości wody w sieci wodociągowej, spowodowanymi m.in. trihalometanami. Pomocne w tych działaniach są komputerowe modele symulacyjne, pozwalające na szeroką analizę różnych normalnych i ekstremalnych przypadków eksploatacyjnych. Wyniki symulacji stanowią nie tylko podstawę oceny i interpretacji ryzyka, jakie ponosi przedsiębiorstwo podczas wieloletniej eksploatacji systemu wodociągowego oraz zapewnienia bezpieczeństwa zdrowotnego konsumentów, ale również dają możliwość opracowania planów działań minimalizujących skutki i koszty utraty bezpieczeństwa funkcjonowania wodociągu.

Podstawy teoretyczne analizy bezpieczeństwa i ryzyka zmian jakości wody w systemie wodociągowym

Bezpieczeństwo i ryzyko to pojęcia, które w teorii eksploatacji systemów technicznych są ze sobą ściśle powiązane. Miarą niezawodności bezpieczeństwa jest prawdopodobieństwo braku skutków katastroficznych. Ryzyko związane jest z dwoma pojęciami – prawdopodobieństwem (lub częstością) wystąpienia danego zdarzenia, zdefiniowanym jako zagrożenie bezpieczeństwa eksploatacji, oraz skutkami tego zdarzenia. Ryzyko wyrażane jest formułą matematyczną [2–5]:

$$r = pC \quad (1)$$

w której:

p – miara zawodności funkcjonowania systemu, odpowiadająca kategorii częstości (prawdopodobieństwa)

C – miara konsekwencji, odpowiadająca kategoriom skutków (szkód wyrażonych w jednostkach finansowych lub kategoriach fizycznych, np. powierzchnia skażonego ekosystemu oraz szkód moralnych)

Tabela 1. Wybrane metody analizy ryzyka eksploatacji systemów technicznych [17]
Table 1. Examples of risk analysis methods [17]

Metoda	Opis i zastosowanie
Analiza drzewa zdarzeń (ETA)	Technika identyfikacji zagrożeń i analizowania częstości, w której stosuje się rozumowanie indukcyjne służące do przełożenia różnych zdarzeń inicjujących na możliwe rezultaty
Analiza rodzajów i skutków niezdatności oraz analiza rodzajów skutków i krytyczności niezdatności (FMEA, FMECA)	Podstawowa technika identyfikacji zagrożeń i analizowania częstości, w której analizuje się wszystkie rodzaje awarii, jakie mogą wystąpić w obiekcie i jego wyposażeniu, pod kątem ich wpływu na funkcjonowanie pozostałych elementów składowych systemu
Analiza drzewa niezdatności (FTA)	Technika identyfikacji zagrożeń i analizowania częstości, w której rozpoczyna się od niepożądanego zdarzenia i wyznacza się wszystkie sposoby jego pojawienia się, a następnie przedstawia się je w sposób graficzny
Badanie zagrożeń i gotowości operacyjnej, (HAZOP)	Podstawowa technika identyfikacji zagrożeń, w której w sposób systematyczny ocenia się każdą część systemu w celu przedstawienia sposobu pojawiania się odstępstw od zamysłu projektowego, z uwzględnieniem możliwości wywołania komplikacji
Analiza niezawodności człowieka (HRA)	Technika analizowania częstości, która bada wpływ działania człowieka na pracę systemu i ocenia wpływ błędów ludzkich na bezpieczeństwo i produktywność systemu
Wstępna analiza zagrożeń (PHA)	Technika identyfikacji zagrożeń i analizowania częstości, która może być stosowana we wczesnym stadium projektowania do identyfikacji zagrożeń i oceny ich krytyczności
Schemat blokowy niezawodności	Technika analizowania częstości, w której tworzy się model systemu w oparciu o nadmiar informacji w celu oceny jego nieuszkodzalności

ETA – Event Tree Analysis, FMEA – Fault Modes and Effects Analysis, FMECA – Fault Modes, Effects and Criticality Analysis, FTA – Fault Tree Analysis, HAZOP – Hazard and Operability Study, HRA – Human Reliability Assessment, PHA – Preliminary Hazard Analysis

W oparciu o doniesienia literaturowe [2–16] można jednoznacznie stwierdzić, że w praktyce wodociągowej powszechnie stosowane są dwie niezależne metodyki szacowania ryzyka – jakościowa i ilościowa. Procedury jakościowe nie uwzględniają liczbowego wyznaczenia poziomu ryzyka (z zastosowaniem probabilistyki), lecz pozwalają określić wyłącznie jego względny poziom oraz ustalić kategorię akceptacji – ryzyko tolerowane, kontrolowane i nieakceptowane. W procedurach analitycznych arbitralnie, najczęściej w oparciu o metody eksperckie, definiuje się skale odnoszące się zarówno do poziomu skutków zdarzeń niepożądanych, jak i częstości ich występowania. Występują tu pojęcia nieprecyzyjne, określające częstość wystąpienia danego zdarzenia (nieprawdopodobne, mało prawdopodobne, okazjonalne, prawdopodobne i bardzo prawdopodobne) oraz pojęcia odniesione do konsekwencji skutków (pomijalne, marginalne, znaczące, poważne i katastrofalne). Istotą procedury jakościowej jest utworzenie kombinacji przyjętych poziomów częstości i skutków zdarzeń niepożądanych i odniesienie ich do przyjętych kategorii ryzyka [2–5].

W praktyce wodociągowej szczególne znaczenie znalazła metoda o charakterze uniwersalnym, tzw. matryca ryzyka, należąca do metod jakościowo-ilościowych. Procedury badań metodą matrycową wymagają identyfikacji zagrożeń eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę (scenariusze awaryjne) pod względem prawdopodobieństwa ich wystąpienia oraz potencjalnych skutków. W metodzie tej poszczególnym kategoriom prawdopodobieństwa wystąpienia nieoczekiwanych zdarzeń eksploatacyjnych przypisuje się wagi częstości (W_1), natomiast kategorie konsekwencji tych zdarzeń opisuje się liczbową skalą wag skutków (W_2). Matematyczna interpretacja ryzyka, jako funkcja prawdopodobieństwa zdarzeń niepożądanych i ich skutków, pozwala w metodzie matrycowej wyznaczyć jego liczbowy poziom, będący podstawą przypisania analizowanego zdarzenia do danej kategorii ryzyka (najczęściej – tolerowane, kontrolowane i nieakceptowane) [2–5]:

$$r = W_1 W_2 \quad (2)$$

Procedury ilościowe natomiast w ścisły matematyczny sposób (za pomocą funkcji gęstości) opisują wystąpienie określonego niepożądanego zdarzenia, powodującego

wymierne straty. Pozwalają one na określenie liczbowych miar ryzyka w sytuacji, gdy analizę można przeprowadzić w oparciu o archiwalne dane eksploatacyjne systemu. Ilościowe szacowanie ryzyka prowadzi więc do precyzyjnego określenia prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń awaryjnych eksploatacji systemu wodociągowego, potencjalnych skutków awarii i poziomu występującego ryzyka. W kolejnym kroku procedury analitycznej otrzymany poziom ryzyka odnosi się do ustalonego wcześniej ryzyka akceptowanego. Metoda ta jest jednak czasochłonna i wymaga od użytkownika systemu dużej wiedzy teoretycznej. W tabeli 1 przedstawiono najczęściej stosowane metody szacowania ryzyka eksploatacji systemów technicznych [17].

W ocenie eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę, z powodu trudności stosowania ilościowych procedur szacowania ryzyka, znalazły zastosowanie metody jakościowe, które jednak – ze względu na charakter ekspercki – nie zawsze w pełni satysfakcjonują operatorów systemów wodociągowych. Analiza ryzyka eksploatacji wodociągu w funkcji zmian jakości wody w podsystemie dystrybucji jest zadaniem bardzo trudnym [1,4,5,9,11]. Trudności te są spowodowane częstością występowania tych zdarzeń, wynikającą z ciągle zmieniających się warunków technicznych, hydraulicznych, ekonomicznych, jak i środowiskowych eksploatacji systemów wodociągowych. Ponadto trudności te wynikają z licznych przeszkód dotyczących precyzyjnego oszacowania skutków tych zdarzeń, choćby nawet odnoszących się do skorelowania przypadków zgonów będących skutkiem długoterminowego spożywania wody z podwyższoną zawartością trihalometanów.

Złożoność i wieloaspektowość powstawania THM w zmiennych warunkach eksploatacji systemu wodociągowego, dynamiczne współzależności pomiędzy czynnikami kształtującymi ten proces, skorelowane zmienne losowe, których nie można opisać za pomocą matematycznych zależności utrudniają, a nawet uniemożliwiają przeprowadzenie wieloparametrycznej analizy ryzyka. Dopiero wykorzystanie symulacyjnej metody Monte-Carlo (M-C) pozwala na przeprowadzenie pełnej analizy. Metoda M-C umożliwia jednocześnie rozpatrywanie wielu założeń, w krótkim czasie dając wyniki będące odzwierciedleniem rzeczywistej i przyszłej pracy systemu. Najprościej metodę M-C można opisać jako technikę badania częstości. Symulacja

metodą M-C opiera się na konstrukcji sztucznego procesu losowego, w którym wartość oczekiwana $E(X)$ jest równa pewnej szukanej wielkości X , będącej rozwiązaniem zdefiniowanego zadania. Dzięki równoczesnemu wykorzystaniu generatorów liczb losowych można śledzić równoważne zmiany zachodzące w systemie rzeczywistym i probabilistycznym. Proces M-C jest procesem losowym, w którym (przy różnych krokach symulacyjnych) otrzymuje się różne wyniki (x_i) realizacji zmiennej losowej (X). W przypadku M niezależnych kroków symulacji powstaje ciąg wartości x_1, x_2, \dots, x_M , przy czym każda z tych wartości jest realizacją procesu losowego X_i ($i=1, \dots, M$) i wszystkie te procesy są identyczne i niezależne stochastycznie. Według prawa wielkich liczb Chinczyna, przy odpowiednio dużej liczbie symulacji (M), błąd średniej wyników jest bardzo mały ($\epsilon=0$):

$$\lim_{M \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i - X\right| < \epsilon\right) = 1 \quad (3)$$

Na podstawie centralnego twierdzenia granicznego, badaną zmienną losową charakteryzuje natomiast rozkład asymptotycznie normalny $N(X, \text{Var}(X)/\sqrt{M})$, którego estymator punktowy parametru X przyjmuje wartość średnią z uzyskanych realizacji opisany zależnością [1,18]:

$$\bar{X} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x_i \quad (4)$$

w której:

x_i – realizacja zmiennej losowej X

M – liczba kroków symulacji

Tak utworzony zbiór realizacji zmiennej losowej (X) w kolejnych krokach badań poddaje się pełnej analizie statystycznej. Ponieważ analiza ryzyka metodą M-C bazuje w głównie mierze na procesach stochastycznych, dlatego na początku szacowania ryzyka należy przeprowadzić analizę korelacji, która wyjaśni zależności pomiędzy rozpatrywanymi zmiennymi, a następnie za pomocą rozkładu zmiennej losowej i testów statystycznych wyznaczyć funkcję gęstości rozkładu zmiennej losowej.

Metodyka badań analizy stanów jakości wody w sieci wodociągowej – program Stany

Jednym z celów analizy niezawodności bezpieczeństwa eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę jest wyznaczenie prawdopodobieństwa przebywania systemu w dowolnym ze stanów, odnoszonych do jakości wody dostarczanej do odbiorców. W badaniach [1] przyjęto stężenie chloroformu w wodzie, jako identyfikator przynależności do któregoś z pięciu zdefiniowanych stanów jakości. Wybór chloroformu jako identyfikatora stanu jakości uzasadniają następujące czynniki:

- jest to uboczny produkt dezynfekcji wody, którego ilość w sieci wodociągowej zależy od wielu czynników, m.in. lokalizacji punktu pomiarowego (odległości od układu zasilania), dawki chloru do dezynfekcji i/lub podczas dochlorowania wody, zawartości prekursorów THM w wodzie, temperatury wody, stanu sanitarnego przewodów wodociągowych itp.,

- potencjalne szkodliwe oddziaływanie na zdrowie człowieka,

- pośrednia ocena stanu mikrobiologicznej jakości wody,
- możliwość zastosowania modeli hydraulicznych i jakościowych pakietu komputerowego EpaNet, w przypadku rzeczywistych systemów wodociągowych.

W zaproponowanej metodyce analizy ryzyka przyjęto stężenie chloroformu w dowolnym punkcie podsystemu dystrybucji wody w ilości większej niż 10 mg/m^3 , przy jednoczesnej wartości tego wskaźnika na wyjściu z zakładu oczyszczania $2-3 \text{ mg/m}^3$, jako zdarzenie inicjujące wystąpienie zagrożenia zmiany jakości wody. W opracowanym modelu Stany wyróżniono cztery wartości graniczne stężeń chloroformu w wodzie, będące podstawą zdefiniowania pięciu stanów jakości eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę (tab. 2).

Tabela 2. Stan jakości eksploatacji wodociągu oraz kategorie prawdopodobieństwa jego wystąpienia zależnie od stężenia chloroformu w wodzie wodociągowej

Table 2. Quality state of water supply system operation and category of the probability of this quality state's occurrence as a function of chloroform concentration in the tap water

Stan jakości eksploatacji systemu	Kategoria prawdopodobieństwa	Stężenie CHCl_3 mg/m^3	Waga (W_1)
1	bardzo prawdopodobne	<10	5
2	prawdopodobne	10+30	4
3	mało prawdopodobne	30+60	3
4	możliwe	60+90	2
5	niewykluczone	≥ 90	1

Algorytm modelu Stany w pierwszym kroku analizy uruchamia procedury obliczeniowe wskaźników jakości wody programu EpaNet wg wszystkich zdefiniowanych scenariuszy eksploatacyjnych działania systemu wodociągowego. Końcowym wynikiem tego kroku jest wyznaczenie stężenia chloroformu w wodzie w każdym punkcie modelu w zadanym horyzoncie czasowym symulacji, które jest podstawą utworzenia trójwymiarowej macierzy przejść systemu między kolejnymi stanami jakości systemu w czasie. Procedury obliczeniowe oparte są na metodzie Monte Carlo przejścia systemu ze stanu „m” do stanu „n” na podstawie prawdopodobieństwa przejścia. Wynikiem iteracyjnych powtórzeń poszczególnych przejść jest wyznaczenie czasu przebywania systemu w poszczególnych pięciu stanach jakości. Algorytm symulacyjny rozpoczyna się zdarzeniem przebywania systemu wodociągowego w pierwszym stanie jakości i obejmuje łączną liczbę powtórzeń 10 mln. Końcowym etapem procedur analizy ryzyka jest wyznaczenie prawdopodobieństwa przebywania systemu w danym stanie jakości na podstawie wygenerowanych czasów.

Ocena eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę Wrocławia w funkcji zawartości THM

W oparciu o analizę zmian jakości wody w podsystemie dystrybucji wody we Wrocławiu (lata 2002–2007) przeprowadzono szczegółową analizę ryzyka, stosując chloroform jako identyfikator przynależności systemu wodociągowego do zdefiniowanego stanu niezawodności w analizie bezpieczeństwa funkcjonowania systemu w aspekcie wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej. Wykorzystując procedury symulacyjne metody Monte Carlo, w programie Stany przeprowadzono symulację 25 scenariuszy obliczeniowych, zawierających 16 przypadków eksploatacyjnych wrocławskiego systemu wodociągowego modelowanych programem EpaNet. W rozważanych przypadkach obliczeniowych eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę uwzględniono zmienny wpływ oddziaływania ścian przewodów wodociągowych ($k_w=0,08 \text{ m/s}$, $0,12 \text{ m/s}$, $0,16 \text{ m/s}$,

Tabela 3. Prawdopodobieństwo przebywania systemu wodociągowego w danym stanie jakości eksploatacji
Table 3. Probability of water supply system's occurrence in the given operating state

Podsystem dystrybucji wody	Stan jakości eksploatacji systemu	Stężenie CHCl_3 mg/m^3	Prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanie jakości	Waga (W_1)
Wrocław	1	<10	0,18779934	5
	2	10÷30	0,52804948	4
	3	30÷60	0,25640349	3
	4	60÷90	0,02462796	2
	5	>90	0,00311973	1

0,24 m/s) na szybkość i ilość powstającego w sieci chloroformu, różne wartości stężeń granicznych powstającego chloroformu (80 mg/m^3 i 160 mg/m^3) oraz jego zmienne stężenia na wejściu do podsystemu dystrybucji wody z układów zasilania (3 mg/m^3 , 5 mg/m^3 , 10 mg/m^3 , 15 mg/m^3).

Analizując tak zdefiniowane przypadki eksploatacyjne funkcjonowania systemu wodociągowego badane modelem EpaNet, uzyskano zbiór stężeń chloroformu w wodzie w każdym punkcie modelu hydraulicznego w zadanym horyzoncie czasowym symulacji wynoszącym 120 godzin. Łączny czas symulacji przyjętych scenariuszy obliczeniowych wyniósł 2343 tys. godzin. Rozważane przypadki funkcjonowania systemu zaopatrzenia Wrocławia w wodę charakteryzowały się całkowitą liczbą przejść między stanami eksploatacyjnymi wynoszącą 54521 zdarzeń. Końcowym etapem procedur obliczeniowych modelem Stany było wyznaczenie prawdopodobieństwa przebywania systemu w każdym z pięciu zdefiniowanym stanów jakości eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę (tab. 3).

Wnioski

◆ Przeprowadzona analiza niezawodności bezpieczeństwa działania systemu zaopatrzenia Wrocławia w wodę, odniesiona do zmian stężenia chloroformu w podsystemie dystrybucji wody wykazała, iż chloroform może być ważnym wskaźnikiem określającym zmiany jakości wody w czasie jej transportu siecią wodociągową, a tym samym wielkością pozwalającą oszacować poziom ryzyka dostawy wody.

◆ Opracowany algorytm i program komputerowy Stany może być zastosowany również w przypadku innych kontrolowanych w procesie monitoringu wskaźników jakości wody. Model ten daje możliwość analizowania zdarzeń, które incydentalnie pojawiają się w rzeczywistych warunkach eksploatacji systemu wodociągowego, stwarzając potencjalne zagrożenie utraty niezawodności bezpieczeństwa. Charakterystyka liczbowa (prawdopodobieństwo) przebywania systemu w danym stanie, z zadanym krokiem czasowym, stanowi wielkość będącą podstawą określenia granicznych, akceptowalnych zarówno przez dostawcę wody, jak i jej odbiorców, częstości zdefiniowanych zdarzeń eksploatacyjnych.

◆ Szczegółowe badania zachowania systemu wodociągowego w różnych warunkach eksploatacyjnych pozwalają na opracowanie racjonalnych planów bezpieczeństwa wody, a tym samym na minimalizację skutków zdarzeń katastrofalnych. Zastosowanie procedur symulacyjnych Stany w praktyce badań i analiz jakości wody pozwala ponadto na optymalizację procesu monitoringu jakości wody nie tylko w zakresie ilości badanych punktów pomiarowych, ale i częstości dokonywanych badań, a co za tym idzie – również w zakresie ekonomicznym poprzez racjonalizowanie niezbędnych kosztów monitoringu.

◆ We wrocławskim podsystemie dystrybucji wody odnotowano, w przyjętym okresie analizy 2002–2007, jedynie incydentalne przekroczenia stężenia chloroformu w wodzie, przypadające na miesiące letnie, szczególnie sierpień. Prawdopodobieństwo wystąpienia chloroformu w ilości poniżej 30 mg/m^3 osiągnęło wartość 0,715849, natomiast prawdopodobieństwo zdarzeń uwzględniających również przypadki nieznacznego przekroczenia dopuszczalnego stężenia chloroformu, przy jednoczesnym zachowaniu dopuszczalnej zawartości sumy THM, osiągnęło 0,972252. Zatem częstość tych zdarzeń, jak i ich skutki stanowią zjawiska kontrolowane przez dostawcę wody.

LITERATURA

1. I. ZIMOCH: Opracowanie modelu niezawodności funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę (SZW) w aspekcie wtórnego zanieczyszczenia wody w sieci wodociągowej. Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego PB nr 5 T07E 044 25, Gliwice 2007 (praca niepublikowana).
2. J. RAK: Istota ryzyka w funkcjonowaniu systemu zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.
3. J. RAK: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN* 2005, vol. 28.
4. I. ZIMOCH: Reliability and risk analysis usage for water supply system management. *Polish Journal of Environmental Studies* 2008, Vol. 17, No. 3A, pp. 622–626.
5. I. ZIMOCH: Metody analizy efektywności SZW w funkcji jakości transportowanej wody. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Gniezno 2008, tom II, ss. 151–158.
6. A.J. DUNN, D.A. FRODSHAM, R.V. KILROY: Predicting the risk to permit compliance of new sewage treatment works. *Water Science Technology* 1998, Vol. 38, No. 3, pp. 7–14.
7. L. FEWTRALL, J. BARTRAM: Water quality: Guidelines, Standards and Health – Assessment of Risk and Risk Management for Water-related Infectious Disease. IWA Publishing, London 2001.
8. P. GALE: Using risk assessment to identify future research requirements. *Journal AWWA* 2002, Vol. 94, No. 9, pp. 30–38.
9. M.J. LAINE, S. DEMOTIER, K. ODEH, W. SCHON, P. CHARLES: Risk assessment for drinking water production assessing the potential risk due to the presence of *Cryptosporidium* oocysts in water. Conf. proc. "IWA 2nd World Water Congress", Berlin 2001.
10. J.H.M. VANLIEVERLOO, E.J.M. BLOKKER, G. MEDEMA: Quantitative microbial risk assessment of distributed drinking water using faecal indicator incidence and concentration. *Journal of Water and Health* 2007, Vol. 5, No 1, pp. 131–149.
11. S.J.T. POLLARD: Risk Management for Water and Wastewater Utilities. IWA Publishing, London 2008.
12. J. RAK: Introduction in the method of graphic risk distribution. *Polish Journal of Environmental Studies* 2007, Vol. 16, No. 2A, pp. 781–783.

13. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, A. WŁOCH: Method for risk assessment in water supply system operating by means of the logical trees methods. Conf. proc. "International Probabilistic Symposium", Berlin 2006, pp. 279–288.
14. M.T. TODINOV: Reliability and Risk Models: Setting Reliability Requirements. John Wiley & Sons, Chichester 2005.
15. I. ZIMOCH: Analiza zmian jakości wody jako element zarządzania procesem monitoringu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2006, nr 11, ss. 78–81.
16. I. ZIMOCH, A. WIECZYSTY: Analiza porównawcza metod określania niezawodności stacji uzdatniania wody na przykładzie Dobczyc. *Monografie PAN 2001*, vol. 2, ss. 259–282.
17. PN-IEC60300-3-9. Analiza ryzyka w systemach technicznych, Polska Norma 1999.
18. R. IWANEJKO, T. LUBOWIECKA, Ł. RYKAŁA: Zastosowanie metody Monte-Carlo do oceny niezawodności obiektów wodociągowych. Mat. konf. „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody” Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Szczyrk 2003, ss. 97–108.

Zimoch, I. Operational Safety of the Water Supply System Under Conditions of Water Quality Variations in the Water-pipe Network. *Ochrona Środowiska* 2009, Vol. 31, No. 3, pp. 51–55.

Abstract: The procedure dealt with in risk analysis (risk matrix method) is reviewed, and the operational safety reliability of the water supply system under conditions of water quality variations in the water-pipe network is analyzed. Water quality variations in the pipes were assessed by analyzing the content of trihalomethanes (THM) at different points of the water-pipe network. Presented is also one of the elements of the safety analysis model (computer program 'Stany'), which – on the basis of the Monte Carlo method – makes it possible to determine the probability of the

system's occurrence in one of the five water quality states defined. The model offers the possibility of analyzing events that randomly occur under real conditions of water distribution system operation and thus produce a potential hazard of the loss of safety reliability. Using the results of water quality analyses (THM) for the water supply system of the city of Wrocław (referring to the time span of 2002–2007), the risk of exceeding the admissible chloroform concentration in the tap water was determined. The safety reliability analysis included both the variable operation state of the water treatment train and the unstable operating conditions in the water-pipe network.

Keywords: Watersupplysystem, water-pipenetwork, risk analysis, safety reliability, Monte Carlo method, THM.