

Izabela Zimoch

Zastosowanie analizy bezpieczeństwa eksploatacji do kontroli funkcjonowania zakładu oczyszczania wody

Współczesny system zaopatrzenia w wodę, jako krytyczna infrastruktura komunalna warunkująca odpowiedni standard życia, powinien mieć takie rozwiązania techniczne i technologiczne, które w codziennych warunkach jego funkcjonowania zapewniają wysoki poziom świadczonych usług wodociągowych. Wszelkie zakłócenia warunków pracy tego systemu, w przypadku braku podjęcia odpowiednich działań ograniczających ich negatywne skutki, mogą przyjąć efekt domina, eskalujący odczucie niebezpieczeństwa przez jego użytkowników. Zatem nadrzędnym elementem funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę jest konieczność utrzymania wymaganej skuteczności technologicznej eksploatacji zakładu oczyszczania wody, warunkującej wysoką jakość wody u odbiorców [1]. Obecnie zakres funkcjonowania układów technologicznych oczyszczania wody kształtowany jest z jednej strony jakością i ilością wody w źródle zasilania oraz zmiennym poborem wody w systemie, z drugiej zaś strony uwarunkowany jest zasadą akceptacji przez konsumentów poziomu usług świadczonych przez przedsiębiorstwo wodociągowe. Proces eksploatacji systemu wodociągowego, w tym zakładu oczyszczania wody, stanowi więc zespół czynności podejmowanych w celu zapewnienia ich niezawodnego działania, podlegających stałej ocenie pod względem technologicznym, technicznym i ekonomicznym.

Najskuteczniejszym obecnie sposobem zapewnienia bezpiecznego funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę jest wdrażanie technik kontroli i analiz bezpieczeństwa, w tym oceny ryzyka opartej na planach bezpieczeństwa wody (Water Safety Plans). Wdrażanie tych planów do codziennej praktyki eksploatacyjnej wodociągów rekomendują wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia [2], jako innowacyjne rozwiązanie zarządzania ryzykiem i bezpieczeństwem zaopatrzenia w wodę. Zarządzanie systemem zaopatrzenia w wodę według procedur przewidzianych w planach bezpieczeństwa wody jest szczególnie istotne w sytuacji konieczności bezwzględnego zapewnienia bezpieczeństwa i minimalizacji ryzyka związanego z eksploatacją przewymiarowanych systemów wodociągowych. Jednym z podstawowych celów w tym zakresie jest optymalizacja kosztów eksploatacji systemu, a co za tym idzie – precyzyjne określenie taryf usług wodociągowych. W tej sytuacji przedsiębiorstwa wodociągowe za priorytetowe uznają wdrażanie innowacyjnych technologii zarówno w sektorze ochrony ujęć wody i układów technologicznych

jej oczyszczania, jak i zarządzania oraz optymalizacji dystrybucji wody, monitoringu jej jakości itp. Innowacja interpretowana jest tu nie tylko jako etymologiczne *inovare*, czyli „tworzenie czegoś nowego”, ale w szerszym ujęciu to proces polegający na przekształcaniu istniejących możliwości w nowe skuteczniejsze rozwiązania i wprowadzanie ich do praktycznego zastosowania. Wdrażanie do codziennej praktyki działalności przedsiębiorstw wodociągowych planów bezpieczeństwa wody jest elementem innowacyjnego rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę, wymuszanego potrzebą minimalizacji ryzyka działalności gospodarczej oraz potrzebą zapewnienia ciągłego bezpieczeństwa i akceptacji przez konsumentów dostawy wody przeznaczonej do spożycia [3–10].

Bezpieczeństwo pracy systemu zaopatrzenia w wodę

Inżynieria niezawodności funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę jest rozwijana i sukcesywnie wdrażana w przedsiębiorstwach wodociągowych od początku lat 70. XX w. Początki rozwoju teorii bezpieczeństwa i ryzyka w obszarze eksploatacji i zarządzania systemami wodociągowymi datuje się na lata 90. ubiegłego stulecia. Bezpieczeństwo związane jest z niezawodnym funkcjonowaniem systemu zaopatrzenia w wodę. Uogólniając, bezpieczeństwo systemu technicznego to cecha określająca pełną – niezawodną – realizację jego zadań. Interpretacja bezpieczeństwa funkcjonowania systemu odnosi się do grupy zdarzeń eksploatacyjnych nienarażonych na negatywne oddziaływanie czynników zewnętrznych i niszczące działanie czynników wewnętrznych, w efekcie błędnych decyzji operatora. W takim ujęciu bezpieczeństwo eksploatacji zakładu oczyszczania wody, odniesione do jego skuteczności (sprawności) technologicznej, definiuje się jako zdolność urządzeń układu technologicznego do oczyszczania przewidywanej ilości wody, w stopniu wynikającym z konieczności ochrony zdrowia konsumentów, w określonych warunkach oddziaływania czynników zewnętrznych (otoczenie) i wewnętrznych (parametry eksploatacyjne), określających skuteczność osiągnięcia optymalnej pracy zakładu oczyszczania wody w zakresie jakości wody tłoczonyj do sieci.

Konieczność prowadzenia ciągłej analizy bezpieczeństwa technologicznego funkcjonowania zakładu oczyszczania wody podyktowana jest zarówno optymalizacją kosztów eksploatacji, jak i odnotowanymi w ostatnich latach incydentalnymi zdarzeniami, które przyniosły straty

nie tylko materialne, ale także środowiskowe i ludzkie. Spektakularnym zdarzeniem była wodopochodna epidemia kryptosporidiozy w kwietniu 1993 r. w Milwaukee (USA), w wyniku której ponad 400 tys. osób zostało zainfekowanych przez pasożytnicze pierwotniaki jelitowe, 4 tys. osób wymagało hospitalizacji, a 120 z nich zmarło [11]. W Walkerton (Kanada) w 2000 r. na skutek skażenia wód podziemnych bakteriami fekalnymi kilka tysięcy mieszkańców cierpiało z powodu dolegliwości żołądkowo-jelitowych, 2 tys. z nich było hospitalizowanych, a 7 osób zmarło [12]. W 1992 r. w Australii, w efekcie zakwitów sinic w rzece Murrumbidgee, zatruciu po spożyciu wody wodociągowej uległo 26 osób [13]. Bardziej tragiczne w skutkach było zdarzenie z 1988 r., które miało miejsce w Brazylii, gdzie na skutek intensywnych zakwitów sinic w toni wodnej zbiornika Itaipu, ponad 2 tys. konsumentów uległo zatruciu po spożyciu wody skażonej toksynami, w tym aż 88 osób ze skutkiem śmiertelnym [13].

Również w Polsce odnotowano przykłady skażenia wody w systemach wodociągowych. W lutym 1979 r. mieszkańcy Mielca przez cztery doby byli pozbawieni wody w efekcie zanieczyszczenia Wisłoki olejem, który w wyniku wycieku z cystern, poprzez system kanalizacji deszczowej dostał się do rzeki. Niemniej jednak w tej sytuacji nie odnotowano zwiększonych dolegliwości gastrycznych u mieszkańców Mielca i okolic [14]. Jeszcze dłużej, bo aż przez trzy tygodnie na przełomie marca i kwietnia 2003 r. pozbawieni wody byli mieszkańcy Nowego Targu z powodu skażenia wody w Białym Dunajcu beztlenowymi bakteriami z rodzaju *Clostridium* [15]. Inny przykład to pojawienie się w marcu 2007 r. na ujściu wody dla 19-tysięcznego Pleszewa bakterii coli, w konsekwencji zatrucia wody gnojowicą pochodzącą z dużych gospodarstw hodowlanych. Mieszkańcy Pleszewa i okolic byli pozbawieni wody przez ponad 3 tygodnie. Uciążliwość tego zdarzenia była wyjątkowa, ponieważ wystąpiło ono w okresie przedświątecznym, a zatem kilkunastodniowy brak dostawy wody był silniej odczuwany przez mieszkańców. W trudnej sytuacji znaleźli się również mieszkańcy terenów, które w 1997 r. zostały zalane wodami powodziowymi. Ucierpeli wówczas między innymi mieszkańcy Wrocławia, którzy byli pozbawieni wody przez ponad 2 tygodnie. W wyniku powodzi zupełnie zalane zostały dwa zakłady wodociągowe „Mokry Dwór” i „Na Grobli” oraz Wrocławska Oczyszczalnia Ścieków „Janówek”. Pełna zdolność technologiczna obu zakładów oczyszczania wody została przywrócona po pół roku, a wysokość strat poniesionych przez MPWiK sp. z o.o. we Wrocławiu wynosiła łącznie 46,6 mln zł [16].

Zdarzenia powodujące zagrożenia w eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę oraz zdrowia konsumentów wody w wymiarze powstałych skutków są bardzo różnorodne – od niezauważalnych aż do znaczących środowiskowo czy finansowo. Niewątpliwie powodują one zagrożenia szeroko rozumianego bezpieczeństwa funkcjonowania systemu zaopatrzenia w wodę. Parametrem ujmującym interpretację bezpieczeństwa eksploatacji systemów technicznych, w tym wodociągowych, jest najczęściej uogólniony wskaźnik bezpieczeństwa, będący prawdopodobieństwem wystąpienia zmiennej losowej „zagrożenie bezpieczeństwa” (X_{ZB}), która w danym czasie (t) nie przekroczy wymaganego poziomu bezpieczeństwa (α_B), przy jednoczesnym zachowaniu odporności systemu (O_B) na zagrożenie na poziomie co najmniej równym wartości wymaganej (β_B) [17–19]. Opanowanie niepożądanego zagrożenia wymaga, aby szybkość jego oddziaływania w czasie nie przekroczyła

szybkości adaptacji systemu, co w zapisie matematycznym przedstawia nierówność:

$$\frac{dX_{ZB}(t)}{dt} \leq \frac{dO_B(t)}{dt} \quad (1)$$

Sukces opanowania niebezpieczeństwa eksploatacji systemu zaopatrzenia w wodę zależy w dużej mierze od ilości informacji, niezbędnych nie tylko do prawidłowej oceny zdarzenia incydentalnego, ale również koniecznych do podjęcia właściwych i optymalnych działań interwencyjnych w sytuacjach zagrożenia czy awarii, które zminimalizują szkody poniesione nie tylko przez eksploatatorów, ale przede wszystkim przez zbiorowych i indywidualnych użytkowników systemu wodociągowego.

Aspekt bezpieczeństwa pracy systemu zaopatrzenia w wodę powinien być rozpatrywany globalnie, z uwzględnieniem zmiennych warunków eksploatacji systemu oczyszczania wody oraz jej dystrybucji. Dokonany przegląd literatury przedmiotu [5–7, 9, 14, 19–21] wskazuje na brak metodyki badawczej ujmującej kompleksowo zagadnienie bezpieczeństwa funkcjonowania systemu wodociągowego zarówno w odniesieniu do eksploatatora, jak i konsumentów wody. Prezentowane w tych pracach procedury oceny bezpieczeństwa systemów wodociągowych stosują probabilistyczne narzędzie analizy, zakładając niezależność zdarzeń eksploatacyjnych występujących w poszczególnych układach technicznych systemu zaopatrzenia w wodę. Nieliczne publikacje [22–24] wskazują na trudności w opracowaniu modelu bezpieczeństwa pracy systemu zaopatrzenia w wodę, który uwzględniałby zarówno zagrożenia konsumentów wody, jak zagrożenie i ryzyko eksploatatora systemu wodociągowego.

W artykule przedstawiono jeden z obszarów badań, jakim jest analiza bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody. W prezentowanej metodyce oceny przyjęto, że pełna gotowość bezpieczeństwa eksploatacji (GBE) zakładu oczyszczania wody gwarantuje wymagany stopień oczyszczania wody, a tym samym ogranicza ryzyko zdrowotne jej konsumentów.

Metodyka oceny bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody

Bezpieczeństwo eksploatacji zakładu oczyszczania wody, w aspekcie jakości wody tłoczony do sieci wodociągowej, opisuje uogólniony wskaźnik bezpieczeństwa w postaci zależności:

$$B_{ZOW}^{JW} = P[X_{ZB}(t) \leq \alpha_B^{JW}; O_B(t) \geq \beta_B^{JW}] \quad (2)$$

w której:

$$\alpha_B^{JW} = P(S \leq S_G) \quad (3)$$

$$\beta_B^{JW} = P(K_{rz} \leq K_{opt}) \quad (4)$$

S – wartość określonego wskaźnika jakości wody surowej
 S_G – graniczna wartość określonego wskaźnika jakości wody surowej

K_{rz} , K_{opt} – rzeczywisty i optymalny koszt oczyszczania wody
 α_B^{JW} – wymagane bezpieczeństwo funkcjonowania zakładu oczyszczania wody w odniesieniu do jakości ujmowanej wody
 β_B^{JW} – zdolność zakładu oczyszczania wody do skutecznego usuwania zanieczyszczeń w zakresie akceptowanych kosztów oczyszczania wody

$X_{ZB}(t) \leq \alpha_B^{JW}$ – zdarzenia eksploatacyjne, w których wartość wskaźnika jakości wody surowej w czasie t nie przekroczy wartości granicznej

$O_B(t) \geq \beta_B^{JW}$ – odporność zakładu oczyszczania wody na zdarzenia eksploatacyjne, których koszty przewyższają akceptowaną (ekonomicznie uzasadnioną) wartość

Uogólniony wskaźnik określony zależnością (2) przedstawia pełną interpretację bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody, która uwzględnia zarówno ocenę dokonaną przez producenta, jak i konsumentów wody. Kompleksowa metoda oceny bezpieczeństwa jakościowego skuteczności oczyszczania wody na podstawie uogólnionego wskaźnika bezpieczeństwa wymaga pełnej identyfikacji zdarzeń losowych, w których jakość wody surowej powoduje zwiększenie kosztów jej oczyszczania, powyżej poziomu optymalnego.

Na podstawie przeanalizowanych danych z eksploatacji krakowskiego i wrocławskiego systemu wodociągowego oraz wybranych zakładów oczyszczania wody w aglomeracji śląskiej, jako wskaźnik jakości wody, reprezentatywny do oceny bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody, przyjęto jej mętność. Uzasadnienie wyboru mętności wody, jako wskaźnika takiej analizy wynika bezpośrednio z jej wpływu na parametry eksploatacyjne oczyszczania wody. Podwyższony poziom mętności zwiększa możliwość wzrostu zawartości w wodzie przyswajalnego węgla organicznego, a co za tym idzie – stwarza dogodne warunki środowiskowe do rozwoju biofilmu w sieci wodociągowej. Ponadto rośnie również prawdopodobieństwo występowania podwyższonej ilości prekursorów THM w wodzie transportowanej przewymiarowaną siecią do konsumentów [25–27].

Zarówno praktyka eksploatacyjna, jak i dokonany przegląd literatury [21, 26–30] wykazały konieczność utrzymania zaostrzonego reżimu technologicznego oczyszczania wody, gwarantującego uzyskanie na wyjściu ze stacji mętności wody około 0,75 NTU. Tak niski próg mętności wody tłoczonyj do sieci wodociągowej znacznie zmniejsza prawdopodobieństwo jej wtórnego zanieczyszczenia w podsystemie dystrybucji w odniesieniu do ilości powstających THM.

Wykorzystanie metodyki analizy bezpieczeństwa jakościowego według formuły (2) wymaga zgromadzenia i weryfikacji zbioru danych, zawierających informacje dotyczące codziennej mętności wody surowej oraz dawek chemikaliów (koagulant) stosowanych w procesie jej oczyszczania. Koszty zakupu reagentów chemicznych wykorzystywanych w układzie technologicznym oczyszczania wody są jednym z zasadniczych elementów (oprócz kosztów zużycia energii), które wpływają na całkowite nakłady finansowe w procesie oczyszczania wody.

W pierwszym kroku procedury badawczej przeprowadza się statystyczną analizę danych obejmującą weryfikację hipotezy H_0 o rozkładzie funkcji gęstości mętności wody surowej. Weryfikację hipotezy H_0 o normalności rozkładu mętności wody surowej przeprowadza się według standardowych metod analitycznych wykorzystujących test zgodności Kołmogorowa-Smirnowa oraz test χ^2 . Przyjęcie hipotezy H_0 na założonym poziomie istotności (α) (najczęściej $\alpha=0,05$ lub $\alpha=0,1$) upoważnia do wykorzystania reguły trzech sigm ($\sigma=D(X)$), obowiązującej w przypadku zmiennej o rozkładzie normalnym. Reguła ta wykorzystywana jest w badaniach statystycznych do eliminacji tzw. obserwacji niewiarygodnych. W opracowanej metodyce zastosowano ją do wyselekcjonowania zdarzeń powodujących ryzyko eksploatacji układu oczyszczania wody, odniesionych do zjawisk naturalnych zachodzących w ujęciu. Za niewiarygodne uznaje się takie obserwacje

(zdarzenia losowe), w których wartość badanego parametru różni się od wartości średniej o więcej niż trzy odchylenia standardowe. Rozpatrywany zakres zmiennych o dowolnym rozkładzie normalnym obejmuje aż 99,7% realizacji zmiennych losowych. Wykorzystując tę zasadę określa się graniczną mętność wody surowej według formuły:

$$M_G = \bar{M} + 3\sigma \quad (5)$$

w której:

\bar{M} – średnia mętność wody surowej, NTU

$\sigma=D(M)$ – odchylenie standardowe w zbiorze obserwacji mętności wody surowej w czasie badań

Wartość dystrybuanty w przypadku mętności granicznej $F(M_G)$ pozwala określić prawdopodobieństwo wystąpienia mętności przewyższającej wartość graniczną. Wystąpienie takiego zdarzenia można uznać za przypadek, w którym układ technologiczny wchodzi w stan zagrożenia bezpieczeństwa, a eksploatacja zmuszona jest w istotnym zakresie ingerować w parametry technologiczne procesu oczyszczania wody, choćby przez konieczność zwiększenia dawki koagulantu. Działania te związane są każdorazowo ze wzrostem kosztów oczyszczania wody. Jako górną granicę optymalnej dawki koagulantu, akceptowanej przez eksploatatora i zarazem gwarantującej otrzymanie wody o mętności poniżej 0,75 NTU, przyjęto wartość modalną, przy której wyznacza się zbiór zmiennych losowych spełniających warunek $M < M_G$. Mając zbiór dyskretnych zmiennych losowych dopasowuje się rozkładu funkcji gęstości (rozkłady Bernoulliego, geometryczny oraz Poissona). Z funkcji dystrybuanty zmiennej losowej wyznacza się prawdopodobieństwo wystąpienia dawki koagulantu większej od granicznej dawki optymalnej ($P(D > D_{opt})$).

W metodyce badawczej bezpieczeństwo eksploatacji zakładu oczyszczania wody w znaczeniu jakości wody oczyszczonej odniesiono do zdarzeń eksploatacyjnych wystąpienia wymaganego efektu technologicznego. Taka interpretacja bezpieczeństwa pozwala zdefiniować prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń charakteryzujących się przekroczeniem mętności granicznej z jednoczesnym użyciem dawki koagulantu mniejszej od dawki optymalnej (D_{opt}), która w takich warunkach eksploatacyjnych nie gwarantuje wymaganej skuteczności technologicznej w postaci:

$$P_{BST} = P(M > M_G) P(D < D_{opt}) \quad (6)$$

w której:

P_{BST} – prawdopodobieństwo braku skuteczności technologicznej układu oczyszczania wody

W przypadku prawdopodobieństwa P_{BST} uogólniony wskaźnik bezpieczeństwa przyjmuje postać:

$$B_{ZOW}^{JW} = P(M < M_G) (1 - P_{BST}) \quad (7)$$

W procedurach analitycznych oceny niezawodności bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody w odniesieniu do jakości wody, niezbędne jest również wyznaczenie ryzyka eksploatatora z tytułu ponoszenia dodatkowych kosztów działalności zakładu oczyszczania wody. Ryzyko to w istotny sposób zależy od prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń eksploatacyjnych, w których mętność wody surowej nie przekracza wartości dopuszczalnej, określonej w przypadku wody przeznaczonej do spożycia (obecnie 1 NTU), przy jednoczesnym użyciu dawki koagulantu większej od optymalnej. Prawdopodobieństwo

wystąpienia tak określonych zdarzeń eksploatacyjnych definiuje zależność:

$$P_{BT} = P(M < NDS)P(D > D_{opt}) \quad (8)$$

w której:

P_{BT} – prawdopodobieństwo błędu technologicznego

Pełna analiza bezpieczeństwa zakładu oczyszczania wody, w ujęciu eksploatatora zakładu wodociągowego i konsumentów wody, powinna uwzględniać oszacowanie uogólnionego wskaźnika bezpieczeństwa (7) oraz wskaźnika niezawodności bezpieczeństwa eksploatacji (P_E) i ryzyka ekonomicznego eksploatacji zakładu oczyszczania wody (r_E), które odnosi się do indywidualnych kosztów ponoszonych przez eksploatatora i może być opisane zależnościami:

$$P_E = 1 - (P_{BST} + P_{BT}) \quad (9)$$

$$r_E = K_B P_{BST} + K_{ZK} P_{BT} \quad (10)$$

w których:

K_B – koszty z tytułu bonifikat za złą jakość dostarczanej wody

K_{ZK} – koszt zakupu koagulantu

Zastosowanie metody badawczej i dyskusja wyników

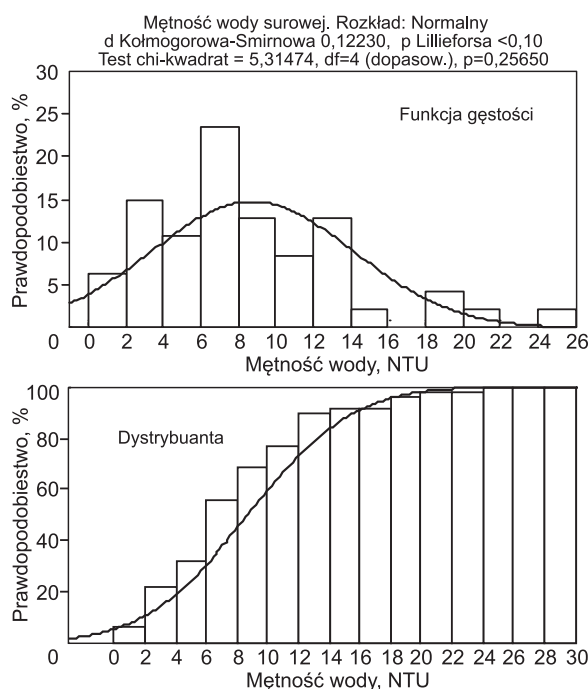
Przedstawioną metodykę oceny bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody, kształtowanego jakością wody w ujęciu, zastosowano w analizie parametrów pracy stacji oczyszczania ujmującej wodę powierzchniową z rzeki o przeciętnej wydajności 38 tys. m³/d (maks. 55 tys. m³/d). Oczyszczanie wody realizowane było w układzie obejmującym wstępną sedimentację wspomaganą okresowo (przy mętności wody surowej >100 NTU) koagulacją (PAX), stabilizację jakości w zbiorniku retencyjnym, klasyczną koagulację (PAX) poprzedzoną wstępnym utlenianiem związków organicznych nadmanganianem sodu, filtrację pospieszną, sorpcję na złożach węgla aktywnego oraz dezynfekcję dwutlenkiem chloru.

Badania przeprowadzono wykorzystując dane dotyczące mętności wody surowej oraz dawek koagulantu pochodzące z 6,5-letniej eksploatacji zakładu oczyszczania wody (lata 2000–2006). W przypadku mętności, zgodnie z metodyką analityczną, wyznaczono podstawowe statystyki opisowe (tab. 1) oraz dokonano weryfikacji hipotezy H_0 o normalności jej rozkładu (na poziomie istotności $\alpha=0,05$). Wyniki testu Kołmogorowa-Smirnowa oraz testu χ^2 wykazały, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 oraz że funkcja gęstości mętności opisana jest rozkładem normalnym (rys. 1). Przy rozkładzie zmiennej losowej $M:N(\bar{M}, D(M))$ wyznaczono dystrybucję mętności granicznej oraz prawdopodobieństwo wystąpienia mętności przewyższającej wartość graniczną.

W dalszym etapie analizy, w przypadku mętności nieprzekraczającej wartości granicznej, utworzono zbiór zmiennej losowej, obejmującej zastosowane w układzie

Tabela 1. Statystyki opisowe mętności ujmowanej wody
Table 1. Descriptive statistics of raw water turbidity

Statystyki opisowe mętności wody, NTU			
średnia (\bar{M})	moda (D_0)	odch. stand. ($D(M)$)	wartość graniczna (M_G)
8,75	7,80	5,40	24,95



Rys. 1. Funkcja gęstości i dystrybucja rozkładu mętności ujmowanej wody

Fig. 1. Density function and distribution function of raw water turbidity

technologicznym dawki koagulantu. W analizie przyjęto górną granicę optymalnej dawki równą wartości modalnej, akceptowanej przez eksploatatora i dającej gwarancję otrzymania wody o mętności poniżej 0,75 NTU. Utworzona baza średnich dobowych dawek koagulantu w latach 2000–2006 poddano wstępnej weryfikacji, a następnie za pomocą programu STATISTICA PL, dopasowywano rozkład do zmiennej dyskretnej. Weryfikacja hipotezy statystycznej pozwoliła, w przypadku dawki koagulantu, przyjąć rozkład Bernoulliego $B(365, 0,97959)$. Wyniki pełnej analizy bezpieczeństwa funkcjonowania zakładu oczyszczania wody, w odniesieniu do jakości ujmowanej wody, przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Parametry bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody

Table 2. Safety parameters of water treatment plant operation

B_{ZOW}^{JW}	P_E	K	GBE
0,9973293	0,9971342	0,9984553	0,9955939

Miarą kompleksowej oceny bezpieczeństwa funkcjonowania układów zasilania w wodę, zarówno w interpretacji technicznej, jak i jakościowej jest gotowość bezpieczeństwa eksploatacyjnego (GBE), kształtowana sprawnością techniczną układu, wyrażoną wskaźnikiem gotowości (K) oraz prawdopodobieństwem niewystąpienia losowych zjawisk w ujęciu, które wymuszają zmianę technologii oczyszczania wody bądź zwiększenie ilości stosowanych reagentów. Zatem gotowość bezpieczeństwa eksploatacyjnego wyraża zależność:

$$GBE = K P_E \quad (11)$$

w której:

$K = T_p / (T_p + T_o)$ – wskaźnik gotowości

T_p – średni czas bezawaryjnej pracy układu, h

T_o – średni czas odnowy, h

P_E – wskaźnik niezawodności bezpieczeństwa eksploatacji wg wzoru (9)

Podsumowanie

Istotnym zagadnieniem w ocenie poprawności eksploatacji zakładu oczyszczania wody jest umiejętność przewidywania warunków pracy układu technologicznego oraz zdarzeń, które mogą spowodować zagrożenie, a w skrajnych przypadkach utratę bezpieczeństwa funkcjonowania zakładu. Pełna analiza bezpieczeństwa powinna obejmować zarówno niezawodność funkcjonowania technicznego ciągu technologicznego oczyszczania wody, wyrażoną wskaźnikiem gotowości, jak również bezpieczeństwo dotyczące jakości wody. Zaprezentowana metodyka kompleksowej oceny bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody uwzględnia interpretację bezpieczeństwa w postaci zintegrowanego parametru, jakim jest gotowość bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Ponadto pozwala ona na podstawie standardowych parametrów operacyjnych pracy zakładu oczyszczania wody oraz wskaźników jakości wody surowej uzyskać szersze informacje o przebiegu procesu technologicznego oczyszczania wody.

Wykorzystanie stosunkowo prostych narzędzi statystycznych umożliwia oszacowanie dodatkowych parametrów oceny, takich jak uogólniony wskaźnik bezpieczeństwa (B_{ZOW}^{IW}), prawdopodobieństwo błędu technologicznego (P_{BT}) oraz prawdopodobieństwo braku skuteczności technologicznej (P_{BST}). Parametry te pozwalają na pełną identyfikację warunków i poprawności eksploatacyjnej zakładu oczyszczania wody, które mogą stanowić podstawę do opracowania procedur planów bezpieczeństwa wody minimalizujących ryzyko eksploatacyjne układów ujmowania i oczyszczania wody.

Zaprezentowana metoda analizy bezpieczeństwa eksploatacji zakładu oczyszczania wody ma charakter uniwersalny i może być zastosowana w przypadku różnych wskaźników jakości wody (np. liczba mikroorganizmów, ogólny węgiel organiczny, żelazo, barwa itp.) oraz parametrów operacyjnych pracy ciągu technologicznego oczyszczania wody (dawka środka dezynfekcyjnego, ilość wody zużytej do płukania złóż filtracyjnych, zużycie energii itp.).

Praca naukowa została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach realizowanego w latach 2010–2013 projektu rozwojowego nr N R14 0006 10 pt. „Opracowanie kompleksowej metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody do odbiorców”.

LITERATURA

1. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi. Dz. U. nr 72, poz. 466.
2. Guidelines for Drinking-water Quality. WHO, Geneva 2004.
3. S. DENCZEW, A. KRÓLIKOWSKI: Podstawy nowoczesnej eksploatacji układów wodociagowych i kanalizacyjnych. Arkady, Warszawa 2002.
4. S. DENCZEW: Koncepcja zrównoważonego systemu eksploatacji wodociągów. *Ochrona Środowiska* 2007, vol. 29, nr 4, ss. 69–71.
5. P. GALE: Using risk assessment to identify future research requirements. *Journal American Water Works Association* 2002, Vol. 94, No. 9, pp. 30–38.
6. J. RAK: Selected problems of water supply safety. *Environment Protection Engineering* 2009, Vol. 35, No. 2, pp. 23–28.
7. J. RAK, K. PIETRUCHA: Some factors of crisis management in water supply system. *Environment Protection Engineering* 2008, Vol. 34, No. 2, pp. 57–65.
8. K. SZATKIEWICZ: Rewizja dyrektywy 98/83/WE w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi, dotycząca oceny zagrożeń i zarządzania ryzykiem. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 41–44.
9. I. ZIMOCZ: Reliability and risk analysis usage for water supply system management. *Polish Journal of Environmental Studies* 2008, Vol. 17, No. 3A, pp. 622–626.
10. D. KOWALSKI: Zarządzanie jakością wody w systemie wodociagowym. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 37–40.
11. D.D. EDWARDS: Troubled waters in Milwaukee. *American Society for Microbiologie News* 1993, Vol. 57, No. 7, pp. 342–345.
12. Ledership and fecal coliforms: Walkerton 2000. *Canadian Medical Association Journal* 2000, Vol. 163, No. 11, p. 1417.
13. A. KABZIŃSKI, T. KABZIŃSKI: Toksyczne zakwity sinicowe – efekty zdrowotne kontaktu z zakwitami sinicowymi. Cz. VI. *Bioskop* 2006, nr 1, ss. 13–20.
14. J. RAK, B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Metody analizy i oceny ryzyka w systemach zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
15. R. IWANEJKO, T. LUBOWIECKA: Analiza ryzyka w systemie zaopatrzenia w wodę. Studium zagadnień. *Czasopismo Techniczne* 2003, z. 7–Ś, ss. 153–168.
16. www.mpwik.wroc.pl.
17. R. IWANEJKO: Ocena bezpieczeństwa konsumentów w aspekcie jakości wody dostarczanej im do spożycia. Mat. konf. „Bezpieczeństwo, niezawodność, diagnostyka urządzeń i systemów gazowych, wodociagowych, kanalizacyjnych i grzewczych”, PZITS Oddział w Krakowie, Zakopane 2001, ss. 149–162.
18. J. RAK: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, vol. 28, Lublin 2005.
19. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Zarządzanie ryzykiem w ramach planów bezpieczeństwa wody. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 4, ss. 57–60.
20. B. TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK: Rozmyty model ryzyka awarii sieci wodociagowej. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 1, ss. 35–40.
21. I. ZIMOCZ: Bezpieczeństwo działania systemu zaopatrzenia w wodę w warunkach zmian jakości wody w sieci wodociagowej. *Ochrona Środowiska* 2009, vol. 31, nr 3, ss. 51–55.
22. M. SUDOL: Monitoring jakości wody w systemie jej dystrybucji w świetle danych literaturowych i badań własnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2007, nr 3, ss. 17–21.
23. M. KWIETNIEWSKI, M. SUDOL: Wskaźniki niezawodności dystrybucji wody o wymaganej jakości. Mat. konf. „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS Oddział Wielkopolski, Poznań 2004, tom 1, ss. 581–590.
24. I. ZIMOCZ: Reliability and risk analysis usage for water supply system management. *Polish Journal of Environmental Studies* 2008, Vol. 17, No. 3A, pp. 622–627.
25. H. BARIBEAU, M. PREVOST, R. DESJARDINS, P. LA-FRANCE: Changes in chlorine and DOX concentrations in distribution systems. *Journal American Water Works Association* 2001, Vol. 93, No. 12, pp. 102–114.
26. D. GATEL, P. SERVAIA, J.C. BLOCK, P. BONNE, J. CA-VARD: Microbial water quality management in the Paris suburbs distribution system. *Journal Water SRT-Aqua* 2000, Vol. 49, No. 5, pp. 231–241.
27. S. OKABE, T. KOKAZI, Y. WATANABE: Biofilm formation potentials in drinking waters treated by different advanced treatment processes. *Water Science and Technology: Water Supply* 2002, Vol. 2, No. 4, pp. 97–104.
28. A.L. KOWAL, M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: Oczyszczanie wody. Podstawy teoretyczne i technologiczne, procesy i urządzenia. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa–Wrocław 2007.
29. M. ŚWIDERSKA-BRÓŹ: Skutki braku stabilności biologicznej wody wodociagowej. *Ochrona Środowiska* 2003, vol. 25, nr 4, ss. 7–12.
30. C.J. VOLK, M.W. LeCHEVALLIER: Impacts of the reduction nutrient levels on bacterial water quality in distribution systems. *Applied and Environmental Microbiology* 1999, Vol. 65, No. 11, pp. 4957–4966.

Zimoch, I. Analysis of Operational Safety as a Tool for Controlling the Functioning of a Water Treatment Plant. *Ochrona Srodowiska* 2011, Vol. 33, No. 2, pp. 39–44.

Abstract: A crucial factor in guaranteeing a correct operation of the water treatment plant is the ability to predict such operating conditions for the treatment train (events) that might produce a risk of operational safety loss or, in extreme circumstances, cause the water treatment plant lose its operational safety. It is imperative that the methods used for a comprehensive analysis of operational safety should entail not only the reliability of the treatment train's functioning but also a probabilistic characterization of water quality safety. With the method proposed here for the comprehensive analysis of the operational safety of a water treatment plant it is possible to interpret the operational safety in terms of an integrated parameter, *i.e.* in terms of the availability of operational safety. Thus, based on the standard operating parameters of the water treatment plant, as well as on the quality parameters of the water being

taken in, it is possible to obtain further information on the course of the water treatment process. It has been demonstrated that the use of relatively simple statistical tools enables the following additional parameters of assessment to be evaluated: a generalized safety factor (B_{ZOW}^{JW}), the probability of technological error (P_{BT}), and the probability of technological efficiency being unavailable (P_{BST}). These parameters allow a full identification of the conditions and operational correctness for the water treatment plant, thus providing a basis for the development of procedures for Water Safety Plans in order to minimize the operational risk for the water intake and water treatment systems. The method of operational safety analysis proposed in this paper for a water treatment plant is versatile and applies to real water treatment plants under conditions of diverse water quality parameters.

Keywords: Water treatment, water supply system, safety analysis, reliability, risk, Water Safety Plans.